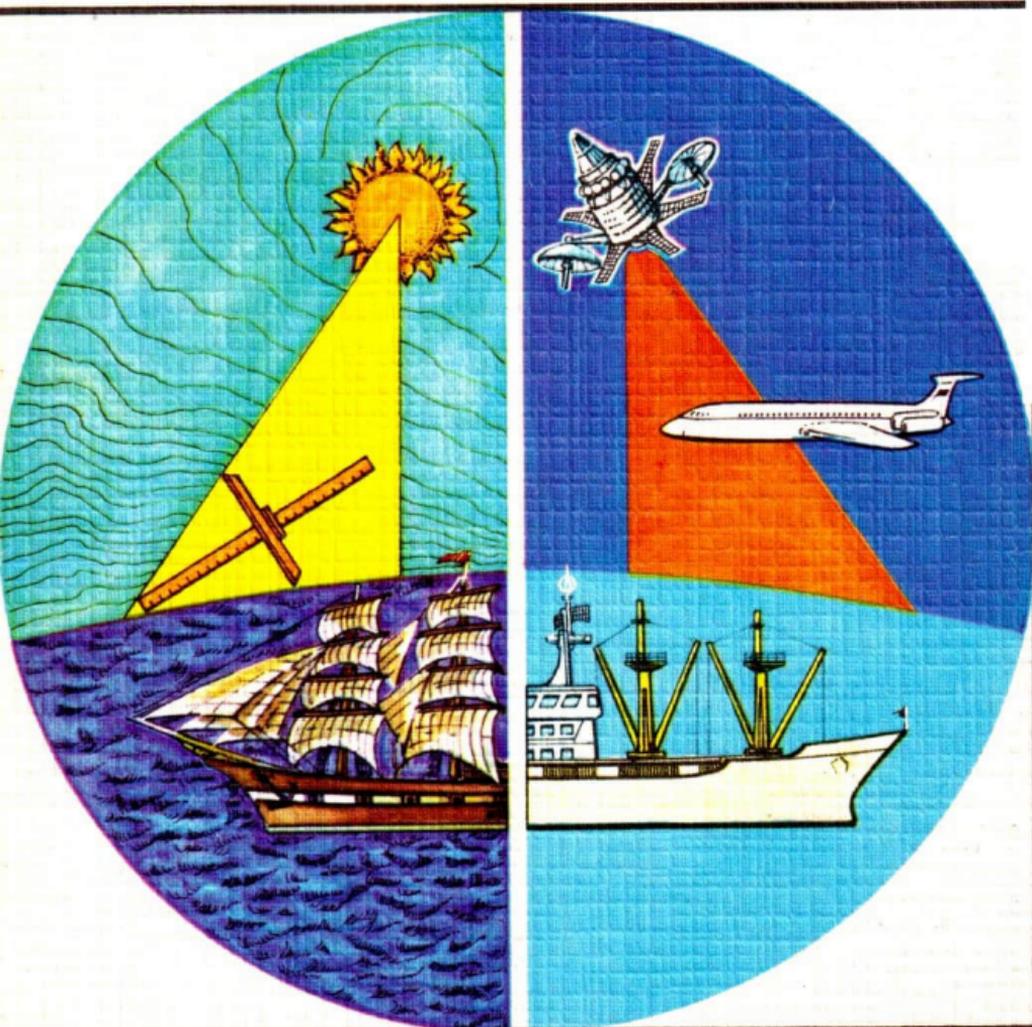


akzent

Walter Conrad

# Vom Jakobsstab zur Satelliten- navigation



---

Walter Conrad

**Vom Jakobsstab  
zur Satellitennavigation**

---

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Walter Conrad, Eisenach

Zeichnungen: Karl-Heinz Barnekow

Farbfotos: Wolfgang G. Schröter

*2., durchgesehene Auflage 1982*

*21.–40.Tausend*

© Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, 1979

VLN 212-475/90/82 LSV 3009

Lektor: Ewald Oetzel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Claus Ritter

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig – III/18/97

Best.-Nr.: 653 589 5

DDR 4,50 M

---

# Inhalt

---

## Die Kunst, richtig anzukommen 7

### Mit Kompaß, Karte und Chronometer 9

Küsten, Winde und Gestirne 9

Hand, die stets nach Süden weist 11

Äpfel gehen über Bord 15

Abstecher zur Kartographie 18

Peilen, Versegeln, Koppeln 26

Himmelskörper im Visier 28

20000 Pfund für eine Uhr 34

### Navigation heute 41

Reicht die Steuermannsschule noch aus? 41

Klassische Verfahren im neuen Gewand 43

Funkwellen und Navigation 56

Vom Zusammenspiel der Geräte 86

### Navigation für morgen 91

Vielseitiger, selbständiger, weitreichender 91

Der Dopplernavigators ist autonom 93

Trägheitskräfte statt Funkwellen 98

OMEGA umspannt den Erdball 103

Satellitennavigation: Funkfeuer in der Umlaufbahn 110

Auf der Suche nach der optimalen Lösung 119

Auf Kurs im Weltraum 121



---

# Die Kunst, richtig anzukommen

---

Am 17. August 1977 erreichte der sowjetische Atomeisbrecher »Arktika« den Nordpol. Wie fand er diesen Punkt inmitten der Eiswüste?

Tausende Frachter durchpflügen die Weltmeere. Wie legt die Schiffsführung den Kurs fest, wie kontrolliert sie ihn? Ein Netz unsichtbarer Luftstraßen umspannt die Erde. Woher weiß der Pilot bei Nacht, über der Wolkendecke, daß er ihnen folgt? Ein Raumschiff nähert sich einer Orbitalstation, um mit ihr gekoppelt zu werden. Wie wird sichergestellt, daß beide einander nicht verfehlen?

Navigation heißt die Kunst, ein Fahrzeug auf bestimmtem Wege von einem Ort zu einem anderen zu führen. Zwar leitet sich der Begriff vom lateinischen »navigare«, Schifffahrt treiben, her – doch Navigation hat heute weit mehr zu leisten, als Schiffe ans Ziel und sicher in den Heimathafen zurück zu bringen.

Die Navigationsverfahren haben sich seit Jahrtausenden entwickelt und ständig gewandelt, Folge der zunehmenden Reiseentfernungen, wachsender Verkehrsdichte und -geschwindigkeiten. Ihre Genauigkeit, Zuverlässigkeit und einfache Handhabung sind Voraussetzungen für Sicherheit, Präzision und für die Ökonomie des Verkehrs. Ihre ganze Vielfalt, ihre sämtlichen Hilfsmittel darzustellen – vom Leuchfeuer bis zur Blindlandung, vom Seehydrographischen Dienst bis zur Organisation der Flugsicherung –, würde den Rahmen dieses Buches weit überschreiten. So soll vor allem von Hilfsmitteln des Sichzurechtfindens auf See und bei Streckenflügen die Rede sein.

*Spiegelsextant aus dem Jahre 1793*



---

# Mit Kompaß, Karte und Chronometer

---

## Küsten, Winde und Gestirne

Im Mittelmeer und im Schwarzen Meer herrschte schon vor Jahrtausenden reger Verkehr. Schiffe aus vielen Häfen liefen die Kupferinsel Zypern an, löschten Ladung in Kreta, in Alexandria oder an einem der zahlreichen Handels- und Umschlagplätze längs der Mittelmeerküste.

Phönizische und karthagische Seeleute fuhren durch die Säulen des Herkules (Gibraltar) zu den Zinninseln, nach Britannien, wandten sich von Gibraltar südwärts und erreichten die Breiten von Kamerun, von dessen Gestaden sie Berichte über fellbedeckte, auf Bäumen lebende menschenähnliche Wesen und feuerspeiende Berge mitbrachten.

Raub- und Handelsexpeditionen steuerten für ägyptische Herrscher das »Götterland Punt« auf der Somalihalbinsel an. Mit Gewürzen, seltsamen Tieren, Sklavinnen und Sklaven kehrten sie zurück.

Auf dem Seewege gelangten Waren aus Indien und von den Sundainseln in die Häfen am Roten Meer.

Polynesiens Seefahrer nutzten die Kräfte der Muskeln, des Windes und Meeresströmungen nicht nur für Reisen von Insel zu Insel, sondern unter anderem auch, um die mehr als 4000 km von Tahiti bis Neuseeland zurückzulegen.

Wie fanden die alten Seefahrer ihren Weg, ihr Ziel, wie schließlich – nach oft jahrelanger Fahrt – zurück? Wie navigierten sie?

*Nürnberger Uhr aus dem 16. Jahrhundert*



*Eines der ägyptischen Handelsschiffe, die nach Punt fahren*

Seefahrt war vor allem Schiffahrt in Sichtweite der Küste (noch Hansekapitäne bevorzugten sie). Man orientierte sich an markanten Geländepunkten und -formen. Für die Nacht ging man vor Anker.

Fehlten natürliche Landmarken an viel befahrenen Routen, ersetzte und ergänzte man sie durch Pfähle, Steinmale und später – besonders in Hafennähe – durch Leuchttürme. Der »Pharos« bei Alexandria, um 280 v. u. Z. errichtet, war keineswegs der einzige. Auch die Hafeneinfahrten von Ostia, Boulogne und zahlreiche andere waren »befeuert«. Einer dieser Leuchttürme, bei La Coruña in Spanien, blieb bis heute erhalten. Später waren auch Kirchtürme wichtige Orientierungspunkte.

Was aber tun, wenn Sturm die Seefahrer auf die offene See verschlagen hatte?

Schon der biblische Noah wußte sich zu helfen: Er ließ Vögel frei. Ihr Flug wies die Richtung zum Land. Noachs Nachfahren in der Südsee taten es ihm nach. Die gefiederten Wegweiser waren allerdings nur ein Notbehelf,

normalerweise standen andere und zuverlässigere Navigationshilfen zur Verfügung.

Die Alten waren gute Naturbeobachter. Sie kannten den Lauf der Sonne, des Mondes und zahlreiche Sternbilder, und sie bedienten sich dieses Wissens, dem die Astronomie ihren Ruf als eine der ältesten Wissenschaften verdankt. Priester sagten Naturereignisse wie Mond- und Sonnenfinsternisse voraus und betätigten sich als Kalendermacher. Vor allem aber waren Seeleute Nutznießer der wachsenden astronomischen Kenntnisse.

Der Polarstern galt den Wikingern bei ihren Fahrten an den Küsten Nordeuropas, in den Gewässern um Grönland, Island, Spitzbergen und für ihre Reisen an die nordamerikanische Küste als Leitstern, er war aber auch im Mittelmeerraum bekannt.

Im Stillen Ozean gab es keinen »Polarstern« zur einfachen Festlegung der Südrichtung. Man fand sie auf dem Umweg über das »Südliche Kreuz«, kannte außerdem zahlreiche andere Sternbilder zur Festlegung von Ost- und Westrichtung.

Charakteristische Wolkenbildungen ließen auf noch unter dem Horizont verborgene Inseln schließen; die stetige Dünung des Pazifik diente als Richtungsmerkmal.

Erfahrene »Nautiker« und »Navigatoren«, die im Besitz dieser von Generation zu Generation übermittelten Kenntnisse waren, liefen selten Gefahr, völlig in die Irre zu segeln oder zu rudern.

## Hand, die stets nach Süden weist

Was wir in den vorangegangenen Absätzen streiften, war in erster Linie »Schönwetter-Navigation«. Bei wolkenverhangenem Himmel, bei Nacht, Nebel und aufgewühlter See versagte sie.

Die großen Entdeckungsreisen und die auf dem Fuße folgende Ausplünderung der entdeckten Gebiete, die Versuche der Seemächte, sich die Beute abzujagen, die Kauffahrtei und nicht zuletzt der Sklavenhandel setzten günstig gewählte Segelrouten und damit eine möglichst wetterunabhängige Navigation voraus. Selbst Piraten von



*Der Magnetberg (aus der »Historie des Herzogs Ernst von Bayern«, Augsburg 1480)*

der Karibischen See bis zum Gelben Meer mußten ihre Schlupfwinkel jederzeit wieder anlaufen können.

Unentbehrliches Navigationsinstrument dieser Epoche wurde der Magnetkompaß. Wann und von wem erstmals die geheimnisvolle Kraft beobachtet wurde, die leichtbewegliche Eisenstückchen in die Nord-Süd-Richtung zu drehen suchte, ist nicht bekannt. Wie sehr sie das Denken beschäftigte und anregte, beweisen Märchen und Sagen – so die im Norden Europas wie im Orient überlieferten Geschichten vom Magnetberg, der alle Eisenteile der Schiffe, die ihm zu nahe kamen, mit unwiderstehlicher Gewalt an sich riß.

Fern im Osten, vor allem in China, waren magnetische Richtungsweiser Jahrhunderte, vielleicht Jahrtausende eher als in Europa bekannt. Chroniken und Reisebeschreibungen berichten darüber.

So sollen schon 1100 Jahre vor der Zeitrechnung Mitglieder einer ausländischen Gesandtschaft am chinesischen Hof fünf »magnetische Wagen« als Geschenk erhalten haben, damit sie auf der langen Heimreise nicht die Orientierung verloren.

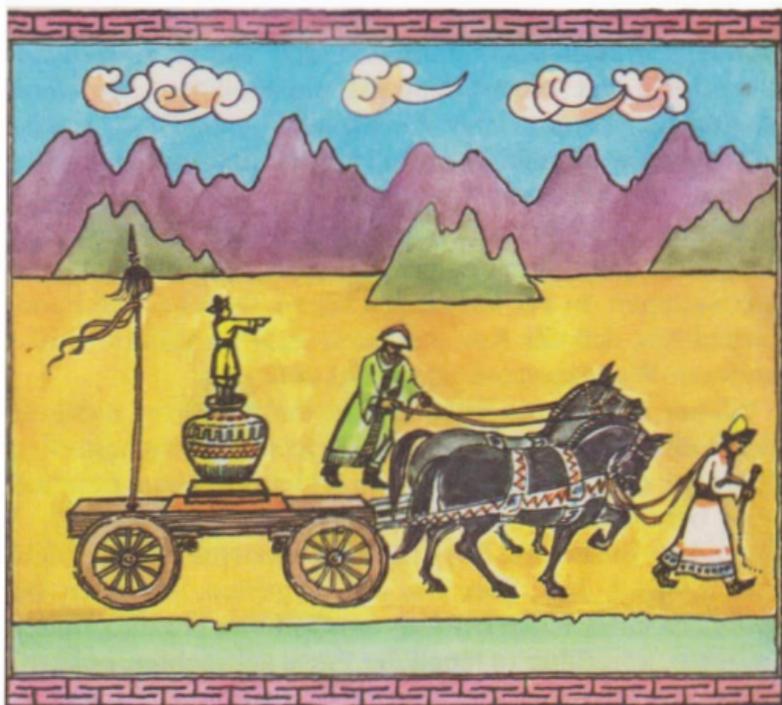
Solche Wagen waren für Fahrten durch Wüsten- und Steppengebiete im Gebrauch. Sie trugen eine kleine, leicht drehbare Figur, deren einer Arm mit ausgestreckter Hand ständig nach Süden wies. Ein altchinesischer Ausdruck für den Kompaß verdankt ihr seine Herkunft: »Hand, die stets nach Süden weist.«

Die erste genauere Darstellung eines magnetischen Richtungsweisers für Seereisen stammt zwar aus viel späterer Zeit (11. Jh.), aber es besteht kein Zweifel, daß der Schiffskompaß Zeitgenosse oder naher Nachfahre des magnetischen Wagens war und sogar bereits die magnetische Mißweisung berücksichtigte.

Um das Magnetstäbchen (oder die Magnetnadel) möglichst reibungsfrei zu lagern und geringfügige Schiffschwankungen unwirksam zu machen, befestigte man es auf einem schwimmenden Brettchen. Man gab ihm verschiedene Gestalt: Fisch, Eidechse, Frosch usw.

Gegen Ende des 12. oder zu Beginn des 13. Jahrhunderts

*»Magnetischer Wagen« der Chinesen*



gelangte der Kompaß, mit großer Wahrscheinlichkeit über arabische Seefahrer, nach Europa. Mittelmeer-Kapitäne benutzten ihn als erste. Für den oder die Wiederentdecker werden mehrere Namen genannt, unter ihnen Pierre Pelegrin du Maricourt (13. Jh.) und Flavio di Gioja (Anfang des 14. Jh.); doch in ihren Beschreibungen des Kompasses berichten sie vermutlich längst Bekanntes.

Schon in einem Gedicht aus dem 13. Jahrhundert – es kritisiert die oft wechselnde Haltung des Heiligen Vaters in politischen und religiösen Fragen – werden Kompaß und Polarstern als bekannt vorausgesetzt:

»So ist als Leuchte aufgesteckt  
die Nadel, daß in keiner Weise  
das Schiff kann irren auf der Reise.  
Hin nach dem Stern weist ihre Spitze,  
und sicher weiß auf seinem Sitze  
der Steu'rer richt'gen Weg zu halten.  
Wie diesen glänzend hellen Stern,  
so sah' ich unsren Vater gern.«

Die über der Windrose spielende Magnetnadel ist eine wahrscheinlich italienische Erfindung aus dem 13. Jahrhundert. Zweihundert Jahre danach waren nahezu alle Seeschiffe mit einem Kompaß ausgerüstet. Als wenig später die kardanische Aufhängung eingeführt wurde, hatte er im wesentlichen die auch heute noch gebräuchliche Gestalt angenommen.

Wurden die Wirkungen des den Erdball umspannenden Magnetfeldes nur im Fernen Osten entdeckt? Das ist kaum anzunehmen. In der Tat deuten Sagen, Berichte und Funde darauf hin, daß der Kompaß auch anderen Völkern und in anderen Weltgegenden längst bekannt war.

Sicher ist, daß die Wikinger bei ihren Fahrten nicht nur den Leitstern, sondern auch *Leitsteine* aus magnetischem Material und mit geeigneten Markierungen zur Orientierung benutzten.

Andere Funde und Berichte sind umstritten, auch solche aus jüngster Zeit: Ein von den Olmeken, einstigen Bewohnern eines Küstenstrichs am Golf von Mexiko, hinterlassener, sorgfältig in längliche Form gebrachter, polierter Stein aus Magnetierz. B. trägt linienförmige Gravierung

gen. Diente er als Kompaß? Wenn ja, wären den Völkern Mittel- und Südamerikas magnetische Richtungsweiser bekannt gewesen, längst bevor Europäer – eben mit Hilfe solcher Richtungsweiser – den Weg zu ihnen fanden.

## Äpfel gehen über Bord

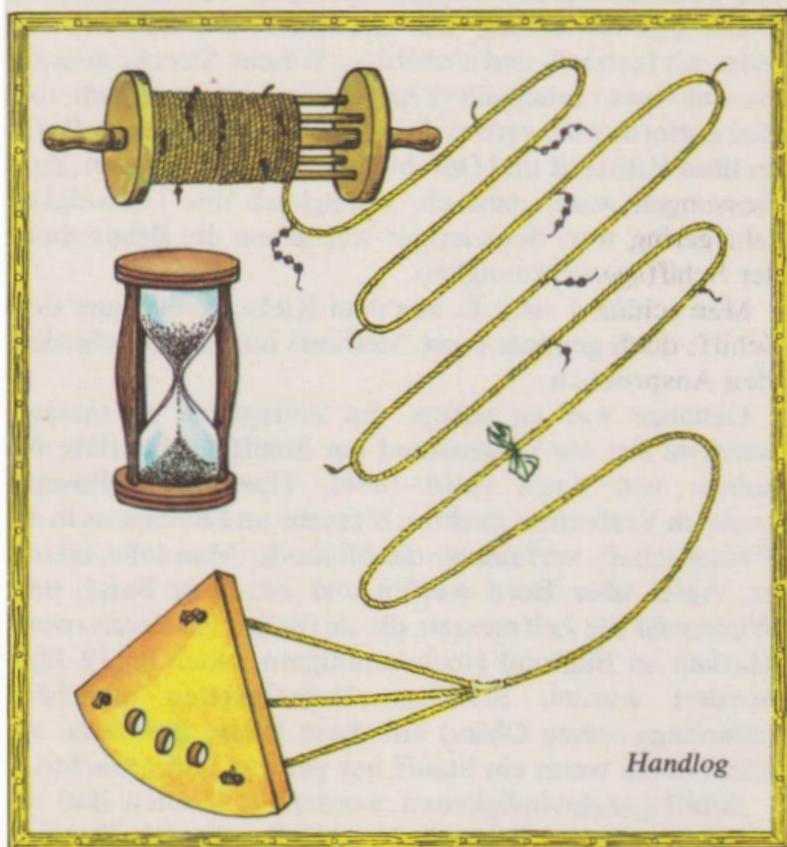
Die Einführung des Kompasses hatte für die Seefahrt erstrangige Bedeutung. Der Kurs eines Schiffes war nun jederzeit feststell- und einhaltbar. Welche Strecke man auf diesem Kurs zurückgelegt hatte, wie weit man noch vom Ziel entfernt war, verriet der Kompaß jedoch nicht. Dafür mußten Fahrtzeit und Geschwindigkeit bekannt sein. Zeitmessungen waren einfach, wenngleich ihre Genauigkeit sehr gering war. Schwieriger war schon die Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit.

Man schätzte sie z. B. aus dem Kielschaum hinter dem Schiff; doch genügte diese Methode nur allerbescheidensten Ansprüchen.

Genauer war es schon, die Zeitspanne zu messen, während der ein Gegenstand am Schiff vorbeitrieb. Nikolaus von Kues (1401–1464), Theologe, Philosoph, zugleich Verfechter exakten Messens und Rechnens in der Wissenschaft, verfeinerte die Methode: Man solle, meinte er, Äpfel über Bord werfen und mit einer Sand- oder Wasseruhr die Zeit messen, die sie für das Passieren zweier Marken an Bug und Heck benötigten. Noch im 19. Jahrhundert wurden Schiffsgeschwindigkeiten manchmal (allerdings »ohne Obst«) auf diese Weise bestimmt, vor allem dann, wenn ein Schiff nur geringe Fahrt machte.

Schiffsgeschwindigkeiten werden in Knoten (kn) angegeben (1 kn = 1 Seemeile/h = 1 852 m/h). Die Bezeichnung erinnert an eine bis in unser Jahrhundert weit verbreitete Einrichtung zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit, das 1577 von dem Mechaniker und Kupferstecher Humphray Cole erfundene Handlog.

Ein über das Heck geworfener, schwimmender Körper bleibt um so rascher hinter dem Schiff zurück, je schneller dieses fährt. Befestigt man eine dünne Leine am Schwimmkörper, die an Bord ohne nennenswerte Reibung abrollt,



braucht man zur Geschwindigkeitsbestimmung nur die in einer Zeiteinheit ausgelaufene Leinenlänge zu messen.

Als Schwimmkörper dient das Logscheit, ein Brettchen in Viertelkreisform. Es ist am Bogenrand so beschwert, daß es aufrecht stehend schwimmt. Drei kurze Leinenstücke (der »Hahnenfuß«) halten es stets quer zur Strömung.

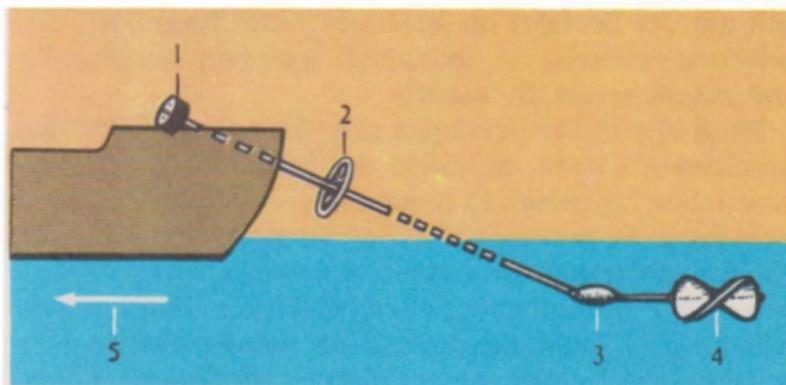
Das Vorderende der Logleine, der Vorläufer, bringt das Logscheit vor Beginn der Messung aus den Wirbeln am Heck. Die Logleine läuft über eine Handtrommel ab und trägt in gleichmäßigen Abständen Knoten als Längensmarkierungen.

Zur Messung wurde das Logscheit über Bord geworfen und eine Sanduhr durch Umdrehen »in Betrieb« gesetzt, sobald der erste Knoten (am Vorläuferende) der lose gehaltenen Leine durch die Hand des Beobachters glitt. Dieser hielt die Leine an, sobald die Sanduhr abgelaufen war, und zählte die abgerollten Knoten. Laufzeit der Sanduhr und Knotenabstände waren so aufeinander abgestimmt, daß die Zahl der Knoten unmittelbar die Fahrgeschwindigkeit in Seemeilen/Stunde, eben in »Knoten«, angab.

Weitaus einfacher läßt sich die Schiffsgeschwindigkeit durch Logeinrichtungen bestimmen, bei denen kleine Schaufeln oder Flügel durch das am Schiff vorbeiströmende Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit mehr oder weniger rasch gedreht und die Umdrehungen während eines Zeitabschnitts gezählt werden. Sie wurden bereits vor unserer Zeitrechnung, später auch von Leonardo da Vinci vorgeschlagen, erlangten aber erst in Gestalt des um 1800 verwirklichten *Propellerlogs* Bedeutung.

Seine Funktion bedarf keiner weiteren Erklärung. Er-

*Das Propellerlog. 1 – Zählwerk; 2 – Schwungrad; 3 – Beschwerung (hält Propeller waagrecht); 4 – Propeller; 5 – Fahrtrichtung*



setzt man das Zählwerk durch ein Tachometer, ist eine ständige Geschwindigkeitsanzeige auf der Brücke, im Maschinenleitstand usw. möglich. Allerdings messen die vorgestellten Loge nicht die Geschwindigkeit »über Grund«, sondern die Geschwindigkeit gegenüber dem Wasser in Fahrtrichtung des Schiffes. Beide können – z. B. durch Strömungseinflüsse – erheblich voneinander abweichen (vgl. S. 98).

Die »Handbreit Wasser unter dem Kiel«, die man jedem Schiff wünscht, war in den Anfängen der Seefahrt ebenso wichtig wie heute. Doch interessierte die Wassertiefe nur insoweit, als sie für gefahrloses Manövrieren und Navigieren ausreichen mußte. Die Einrichtungen zum *Loten* waren dementsprechend einfach:

Ein mit Tiefenmarken versehener *Lotstab* wurde senkrecht bis zur Grundberührung über Bord gehalten, oder man bediente sich des Handlots, einer ebenfalls markierten, am Unterende beschwerten Leine, die zum Grund abgelassen wurde. Die Wassertiefe wurde in »Faden« ausgerufen, einer zunächst beinahe von Land zu Land unterschiedlichen Einheit, die zwischen 1,5 m und 2 m betrug.

## Abstecher zur Kartographie

»Seefahrt ist so zuverlässig wie ihre Karten« – dieser alte Spruch gilt nach wie vor (allein für Reisen Europa–Ostasien sind oft über 2000 Karten an Bord). Wir haben die Existenz verlässlicher Seekarten stillschweigend vorausgesetzt. Solche Karten aber entstanden nicht vor, sondern erst mit der Seefahrt als Resümee vieler Tausender Einzelbeobachtungen, die gesammelt, geordnet, ausgewertet und zusammengefaßt wurden.

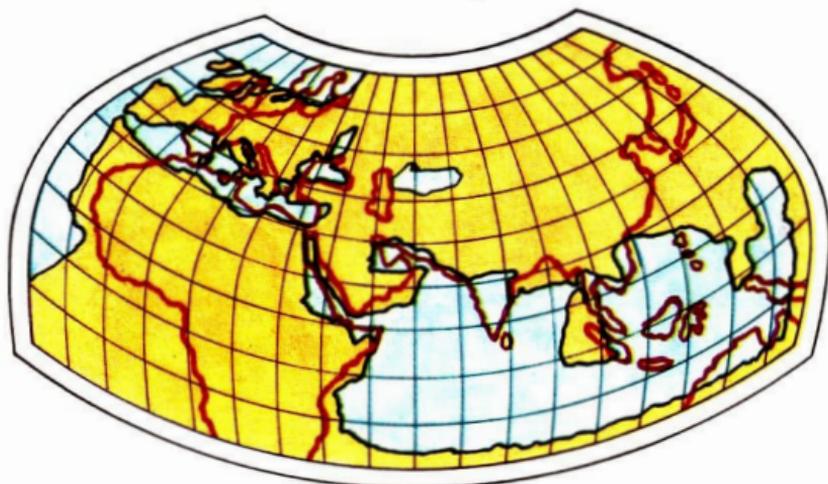
Noch ehe es Darstellungen gab, die man als Seekarten bezeichnen könnte, existierte der *Periplus*, die »Umsegelung«(sbeschreibung). Er beschreibt, im Sinne des Wortes, was Seeleute und Gelehrte auf ihren Reisen längs der Küsten sahen und vermerkten, aber auch, was sie unterwegs über unbekannte Länder erfuhren. Häfen, Flußmündungen, Schiffahrtshindernisse wurden ebenso festgehalten wie Entfernungen zwischen Siedlungen, Eigen-

arten der Bewohner, empfehlenswerte Handels- und Tauschwaren, besondere klimatische Erscheinungen usw.

Unter den erhalten gebliebenen Peripeln, Zeugnissen der sorgfältigen, fleißigen Arbeit ihrer Autoren, ist der berühmteste der griechische »Periplus des Erythräischen Meeres« (im 1. Jh. entstanden). Er beschreibt die ostafrikanische Küste bis in Äquatornähe und läßt, was sich für die Zukunft als sehr wichtig erweisen sollte, keinen Zweifel daran, daß die Bewohner jener Gebiete eine annähernd richtige Vorstellung von der Gestalt des afrikanischen Kontinents hatten. Er schildert Küsten des indischen Subkontinents, warnt die Schiffer vor dem Gangeshochwasser und nennt Waren, z. B. Pfeffer und vorzügliches Leinen, die in jenen Gegenden zu haben seien.

Die meisten Praktiker der Nautik konnten weder lesen noch schreiben. Ein Periplus half ihnen daher nicht allzuviel; für Fahrten auf offenem Meer war er ohnehin

*Weltkarte nach Klaudios Ptolemaios. Die Weltkarte des Ptolemaios enthält einen folgenreichen Fehler: Das Mittelmeer ist in der Länge verzerrt und reicht 20° zu weit nach Westen. Der »westliche« Weg nach Asien schien damit wesentlich kürzer, als er in Wirklichkeit ist. Es ist nicht ausgeschlossen, daß Kolumbus auch wegen dieses Fehlers die mittel- und südamerikanischen Küsten für Küsten Asiens hielt, vielleicht überhaupt nur wegen der scheinbar geringen Entfernungen seine Reise wagte.*



 nach Ptolemaios

 tatsächliche Lage



Seekarte aus einem Atlas des 16. Jahrhunderts

weder gedacht noch geeignet. Eine anschaulich-bildliche, auf die Bedürfnisse der Seefahrt zugeschnittene Darstellung mußte an seine Stelle treten.



Vorbilder für Karten gab es seit langem. Bekannte Beispiele sind unter anderem:

- die »babylonische Weltkarte« aus dem 6. Jh. v. u. Z.,
- die Weltkarte des Eratosthenes (um 200 v. u. Z.),
- die auf den Astronomen und Geographen Klaudios Ptolemaios zurückgehenden Karten (um 140),

– aus späterer Zeit die Weltkarte des Abu Abdallah Muhammad Idrisi (kurz »Edrisi« genannt, um 1150).

Diese Karten zeigten die Welt so, wie man sie kannte – oder sich vorstellte. Spezialkarten wie die auf römische Karten zurückgehenden Peutingerschen Tafeln (nach einem Augsburger Patrizier und Humanisten benannt), die – Urahnen unseres Straßenatlas – vor allem Wegekarten mit eingetragenen Raststationen und Entfernungen für den Gebrauch der Kaufleute und Kuriere waren und (unter anderem durch das übliche Buchrollenformat bedingt) in grober Verzerrung das Gebiet von Spanien bis Indien wiedergaben, blieben selten. Seekarten fehlten so gut wie völlig.

Sie erscheinen im 13. Jahrhundert (nach manchen Quellen noch früher), als sich in Spanien – besonders aber auf den Balearen – und in Italien wachsende geographische Kenntnisse und die sich entwickelnde Kunst des Kartenzeichnens und vervielfältigens zusammenfinden.

Der *Portolan(o)* entsteht. Er wendet sich ausschließlich an Seefahrer und gibt Küstenverlauf, Inseln, günstige Fahrwasser, Häfen, Riffe, Untiefen und andere wichtige Einzelheiten in teilweise erstaunlicher Fülle wieder. Das Binnenland interessiert kaum und wird allenfalls grob dargestellt.

Richtungs- und Entfernungsangaben der Portolani waren genauer als die bisheriger Karten, wie sie etwa in Klöstern entstanden waren. Sie mußten es sein, denn der Nautiker benutzte und benötigte sie als Handwerkszeug, dessen Qualität über Wohl und Wehe von Schiff und Besatzung entscheiden konnte.

Seit Hipparch (um 190 bis um 125 v. u. Z.) hatte man sich die Erde mit einem Gradnetz überzogen gedacht und Orte durch ihre geographische Länge und Breite angegeben. Ptolemaios z. B. erfaßte die Koordinaten von etwa 8 000 Siedlungen tabellarisch. Als Nullmeridian setzte er die geographische Länge der westlichsten der Kanarischen Inseln fest, »Ende« der damals bekannten Welt. Doch gerade Längenmessungen bereiteten zu jener Zeit und, wie wir erfahren werden, noch für Jahrhunderte so erhebliche Schwierigkeiten, daß man es meistens bei Schätzungen bewenden ließ. Erhebliche Fehler entstanden ferner durch

die örtlich verschiedene, meist allenfalls grob bekannte magnetische Mißweisung.

Das als Karte darzustellende Stück Erdoberfläche ist, vereinfacht ausgedrückt, Teil einer Kugeloberfläche, die Karte eine Ebene. Eine Kugelfläche läßt sich jedoch nicht so auf eine Ebene projizieren, daß gleichzeitig die richtigen Größenverhältnisse von Winkeln, Strecken und Flächen gewahrt bleiben.

Alle im Laufe der Zeit entstandenen *Kartennetzentwürfe* sind daher keine wirklichen Projektionen, sondern Kompromißlösungen, bei denen man sich bemüht, die für den Verwendungszweck der Karte wichtigste Größe bzw. Eigenschaft möglichst getreu nachzubilden.

Für Navigatoren in See- und Luftfahrt z. B. ist besonders wichtig, daß ein Geradeauskurs als Gerade in die Karte eingezeichnet oder umgekehrt der zu steuernde Kurs aus der Verbindung zweier Kartenpunkte (Start und Ziel) abgelesen werden kann. Das bedeutet, daß bei gleichbleibendem Kurs alle Meridiane unter gleichem Winkel geschnitten werden; die Kurslinie ist eine Loxodrome (»Schieflaufende«).

Den Kartennetzentwurf, der diese Forderung erfüllt, verdanken wir dem Geographen und Kartographen Gerhard Kremer (latinisiert Mercator, 1512–1594). 1569 stellte er ihn in seiner in Duisburg veröffentlichten »Weltkarte für Seefahrer« vor.

Längen- und Breitengrade erscheinen im *Mercatorentwurf* als sich rechtwinklig schneidende Geraden. Weil aber die auf der Karte parallelen Längengrade in Wirklichkeit nach den Polen hin bis zur Vereinigung aufeinander zulaufen, sind auch diesmal Verzerrungen unvermeidlich. Durch Vergrößerung der Breitenkreisdistanzen in Richtung auf die Pole läßt sich jedoch »Winkeltreue« erreichen.

Der Mercatorentwurf hat sich so bewährt, daß er heute für die meisten Navigationskarten herangezogen wird. Nur in hohen Breiten, wo die Verzerrungen sehr erheblich sind, wird er durch andere Kartennetzentwürfe ersetzt.





Asienkarte aus dem Jahre 1660

## Peilen, Versegeln, Koppeln

Karte, Kompaß und Log verbesserten die Navigation in Sichtweite der Küsten erheblich, denn sie ermöglichten es, zu messen statt zu schätzen.

Bei der *Kreuzpeilung* z. B. stellt man die Richtungen zu zwei (oder mehr) in der Karte verzeichneten Punkten an Land fest. Überträgt man diese Richtungen in die Karte, ergibt der Schnittpunkt der so erhaltenen *Standlinien* den Schiffsort.

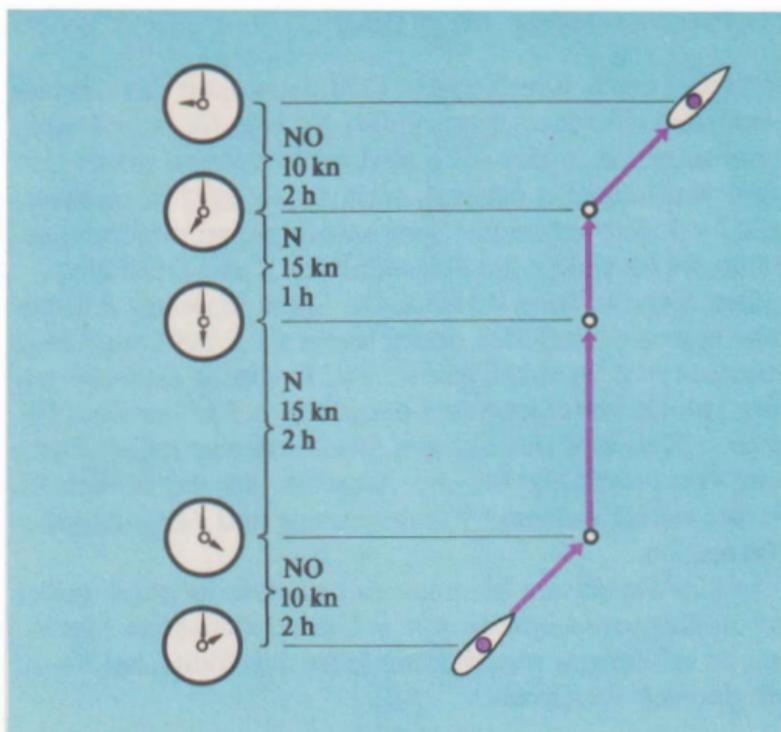
Ist nur ein Festpunkt auszumachen, hilft man sich durch *Versegeln* einer Standlinie: Die Richtung zum gleichen Punkt wird zweimal, und zwar mit zeitlichem Abstand, festgestellt. Aus diesen Messungen und aus der inzwischen vom Schiff mit bekanntem Kurs zurückgelegten Strecke läßt sich der Schiffsort bestimmen.

Auf hoher See sind diese Verfahren nicht anwendbar. Einen Ausweg eröffnet die *Koppelnavigation*: Bewegen wir uns von einem bekannten Ort aus ein bekanntes Stück in bekannte Richtung, verfügen wir außerdem über eine Karte, ist der erreichte Punkt mit Lineal und Winkelmesser bestimmbar. Betrachten wir diesen Punkt erneut als Ausgangsort, können wir das Verfahren wiederholen. Die Reiseroute stellt sich in der Karte als Folge aneinandergereihter Geradenstücke dar. Der Endpunkt jedes Stücks ist zugleich Anfang des folgenden. Diese *Koppelnavigation* wird in der Seefahrt – aber auch beim Durchqueren von Wüsten und Steppen – seit langem angewandt. Die von Kompaß, Uhr und Log (bei Landreisen vom Kilometer- oder Schrittzähler) abgelesenen Werte werden in bestimmten Zeitabständen, spätestens aber bei jeder Kursänderung, als Entfernungen in die Karte übertragen und auf diese Weise miteinander verknüpft, also »gekoppelt«.

Umgekehrt läßt sich, wenn Kurs und Geschwindigkeit bekannt sind, die Ankunft an einem Zielort näherungsweise vorausberechnen.

Die Koppelnavigation – wir beschränken uns jetzt auf die Seefahrt – weist Mängel auf:

– Weil bei jeder Kursänderung gemessen werden muß, ist sie aufwendig und zeitraubend. Das fällt besonders ins



Seit Jahrhunderten angewandt: Koppelnavigation mit Angaben des Kurses (NO bzw. N), der Geschwindigkeit (10 kn bzw. 15 kn) und der Zeit (2 h bzw. 1 h)

- Gewicht, wenn solche Änderungen oft nötig sind (Küstennähe, schwieriges Fahrwasser);
- jeder Meß- oder Ablesefehler geht in alle nachfolgenden Resultate ein, Fehler und Ungenauigkeiten summieren sich;
  - Einflüsse von Strömungen, Wind usw. kommen in den Messungen zunächst nicht zum Ausdruck. Das Log bestimmt die Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Wasser, nicht die Geschwindigkeit »über Grund«; Strömungen erscheinen als Erhöhung oder Verminderung der Fahrtgeschwindigkeit oder bewirken seitliche Versetzungen.
- Koppelnavigation allein genügt daher keinen hohen Genauigkeitsansprüchen. Man muß ihre Resultate kontrollieren und korrigieren können. Andererseits hat sie nach wie vor Bedeutung, um eine ungefähre Position als Ausgangspunkt genauer Standortbestimmungen zu finden.

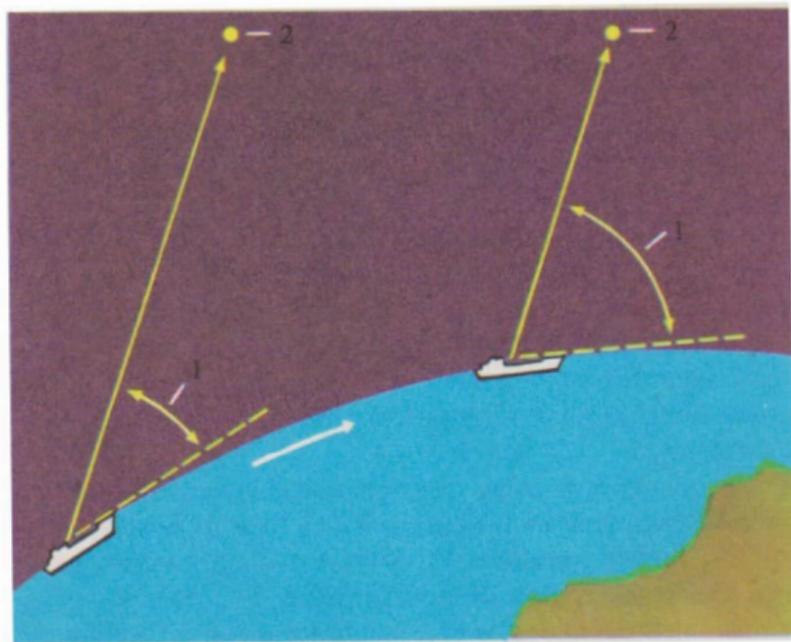
## Himmelskörper im Visier

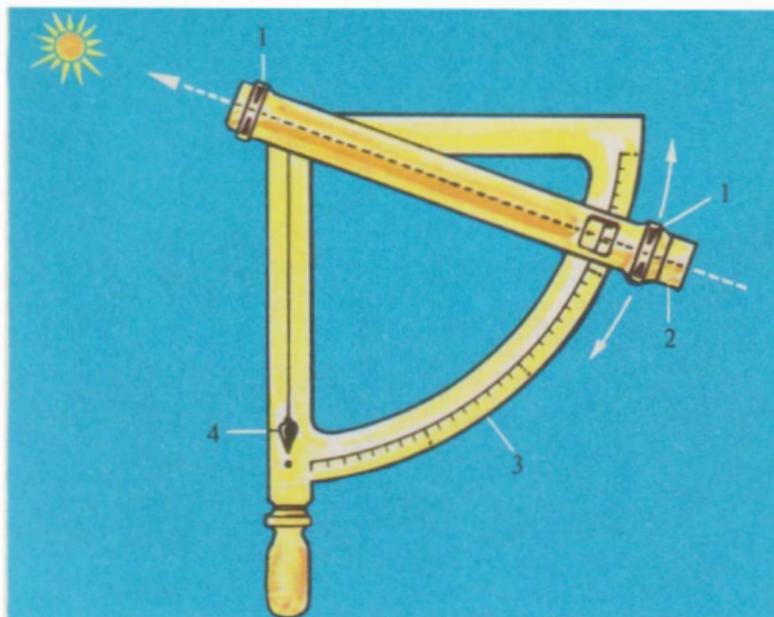
Während des 8. Kreuzzuges (1270) fragte, ob des rundum landlosen Horizonts beunruhigt, Ludwig IX. von Frankreich seinen Kapitän: »Wo sind wir?« Worauf dieser, auf einen Kartenpunkt tippend, erklärte: »Hier – wenn Majestät Ihr Lager schon bei Sonnenaufgang zu verlassen geruhen, werden Majestät die heidnische Küste erblicken.«

Der Kapitän behielt recht. Ob Seine Majestät darüber sehr erstaunt war oder derlei Kenntnisse bei Untertanen voraussetzte, ist nicht überliefert. Erstmals erfahren wir hier jedoch vom Gebrauch der Karte auf hoher See. Die genaue Kenntnis des eigenen Standorts war jedoch nicht nur Voraussetzung für die Antwort auf die königliche Frage; sie ist vielmehr Voraussetzung und Ausgang jeder Navigation.

In den Weiten des Weltmeeres war diese Kenntnis außer durch Koppelnavigation nur mit astronomischen Methoden zu erlangen – tagsüber mit Hilfe der Sonne, bei Nacht mit der von Gestirnen.

*Die Höhe eines Sterns (1) hängt von der geographischen Breite ab.  
2 – Stern*



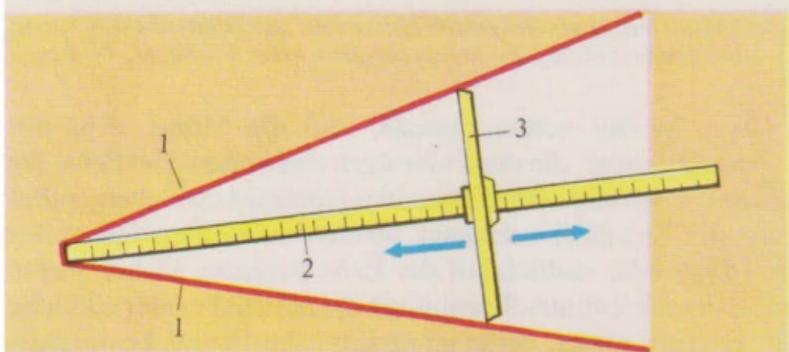
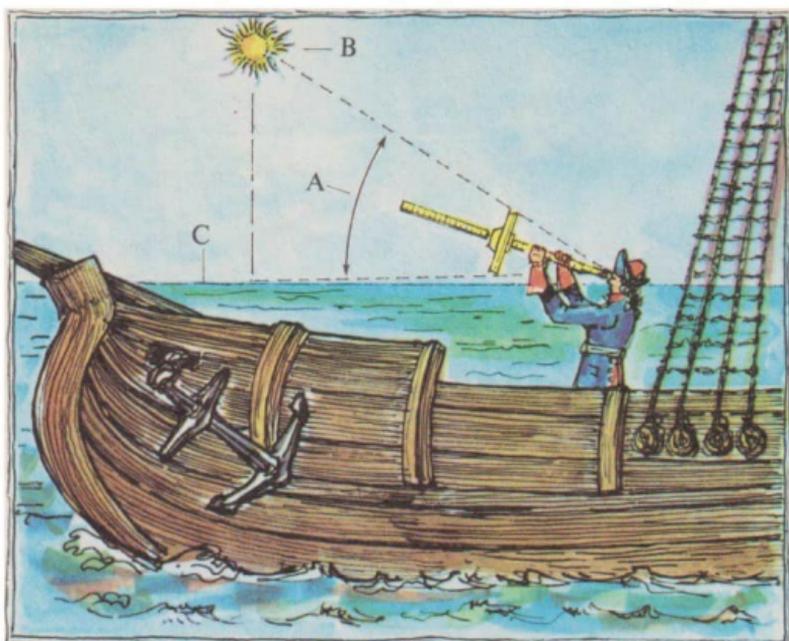


*Der Quadrant, eines der ersten Hilfsmittel zur Breitenbestimmung.  
1 – Visiereinrichtung; 2 – schwenkbarer Arm; 3 – Skale; 4 – Lot*

Man wußte schon damals, daß die Höhe, d. h. der Winkelabstand, die der Polarstern und andere Gestirne, die Sonne eingeschlossen, über dem Horizont erreichen, außer von der Zeit davon abhängt, ob ein Beobachter sich weiter nördlich oder südlich auf der Erde befindet. Daher mußte sich umgekehrt aus Sternhöhen die nördliche oder südliche Lage eines Ortes, seine geographische Breite, bestimmen lassen, sofern

- die Höhen wichtiger Himmelskörper bekannt und z. B. in Tabellen festgehalten waren,
- die so fixierten mit beobachteten Werten verglichen werden konnten.

Beides setzt Winkelmessungen voraus. Mit ihnen hatten sich vor allem chinesische und babylonische Astronomen schon vor Jahrtausenden beschäftigt. Durch Holzschnitte und Kupferstiche – wengleich aus späterer Zeit stammend – sind uns ihre Winkelmeßinstrumente überliefert, vor allem der *Quadrant*: Vor einem lotrecht stehenden Viertelkreis aus Holz, Metall oder auch Mauerwerk konnten über einen drehbaren Zeiger mit Zieleinrichtung



*Der Jakobsstab und seine Anwendung. 1 – Visierlinien; 2 – Skale; 3 – verschiebbares Querholz; A – Sternhöhe; B – Stern; C – Kimm*

Himmelskörper anvisiert und ihre Höhenwinkel an einer Skale auf dem Kreisbogen abgelesen werden. Bei hinreichend großer und stabiler Ausführung des Quadranten waren Winkelgenauigkeiten bis zu Minutenbruchteilen zu erreichen. Als man den Viertel- durch einen Sechstelkreis ersetzte, entstand der *Sextant*.

Auf schwankenden Schiffsplanken wären fest stehende Quadranten nutzlos gewesen. Man verkleinerte sie so, daß sie – allerdings auf Kosten der Meßgenauigkeit – in der

Hand gehalten werden konnten; ein Lot kontrollierte die senkrechte Stellung.

Ein einfach zu handhabendes Winkelmeßinstrument ist der sogenannte Jakobsstab. Um den Winkel zwischen zwei Objekten zu bestimmen, wird sein Querholz verschoben, bis diese in Verlängerung der Visierlinien *Auge—Enden des Querholzes* erscheinen. An einer Skale auf dem Längsstab kann der Winkel abgelesen werden. Zur Messung von

*Ortsbestimmung mit Hilfe des Sextanten auf einem Schiff des 16. Jahrhunderts*

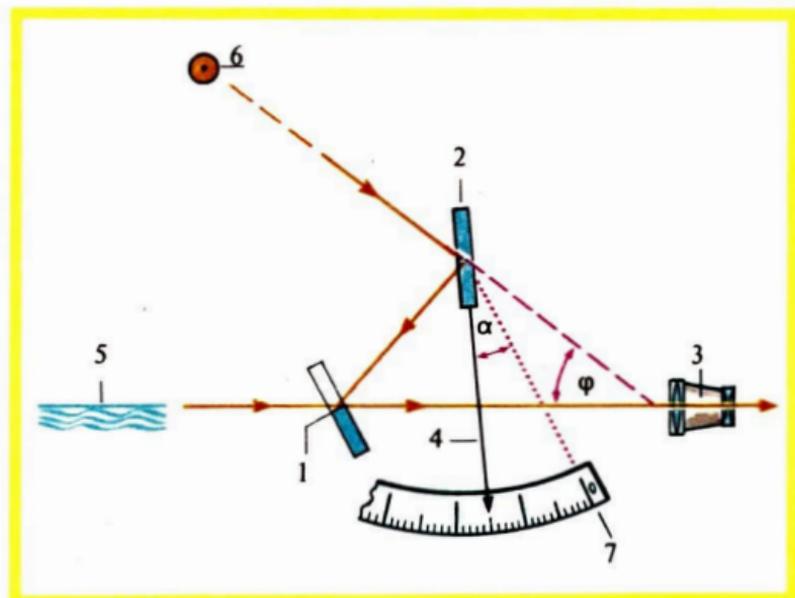


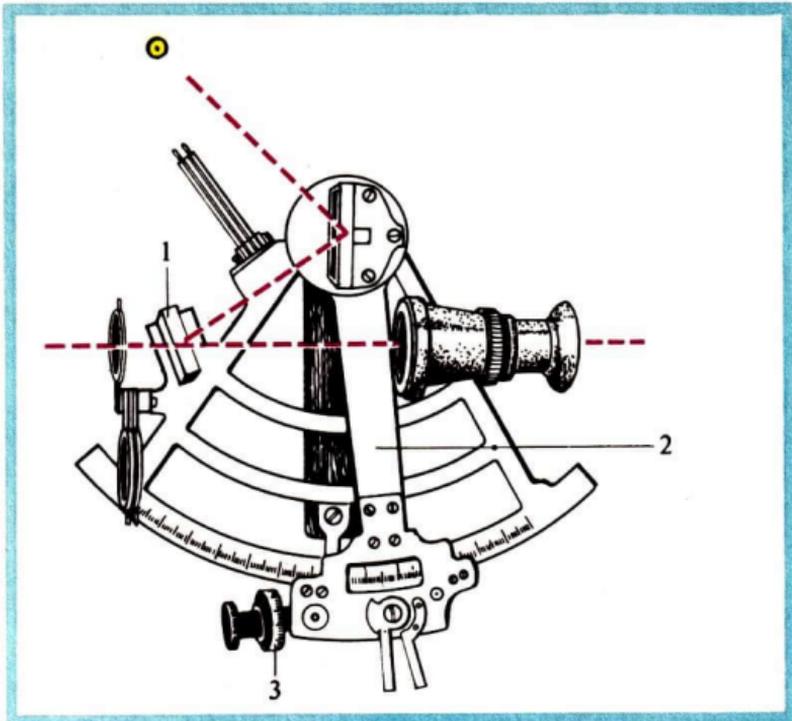
Sternhöhen auf See wird der Jakobsstab in einer lotrechten Ebene gehalten und außer dem Stern die Kimm anvisiert.

Der Jakobsstab war bereits Mathematikern, Astronomen und Landmessern der Antike bekannt, geriet aber später nahezu in Vergessenheit. Erst im 13./14. Jahrhundert tauchte er zunächst bei arabischen Seefahrern wieder auf. Seit dieser Zeit wurden bis ins 18. Jahrhundert hinein Gestirnhöhen auf See vorwiegend mit seiner Hilfe gemessen.

Waren schon die Anfang des 17. Jahrhunderts erfundenen Fernrohre dem Seemann eine große Hilfe, so ermöglichten ein rundes Jahrhundert später die mit der Ausweitung von Wissenschaft und Produktion einhergehenden vermehrten Erfahrungen und Kenntnisse in der feinmechanischen Fertigung, durch Kombination der Winkelmeßgeräte und des Fernrohrs ein Instrument zu entwickeln, das bis zum heutigen Tage jedes seegehende Schiff mit sich führt. Es ist der *Spiegelsextant*. Er geht

*Strahlengang im Spiegelsextanten. Aus geometrischen und physikalischen Gründen (Reflexionsgesetz) gilt stets:  $\varphi = 2\alpha$ . 1 – fester Spiegel; 2 – drehbarer Spiegel; 3 – Fernrohr; 4 – Alhidade; 5 – Kimm; 6 – Gestirn; 7 – (entspricht parallel stehenden Spiegeln)*





*Spiegelsextant. 1 – fester Spiegel; 2 – Alhidade mit drehbarem Spiegel; 3 – Feineinstellung*

wahrscheinlich auf einen Vorschlag Newtons zurück und wurde um 1730 von John Hadley (gest. 1744) ausgeführt.

Die beiden Objekte, deren Winkelabstand gemessen werden soll, werden nicht – wie beim Jakobsstab – einzeln anvisiert, sondern in einem Fernrohr zur Deckung gebracht. Das geschieht durch die sinnreiche Anordnung zweier Spiegel. Einer, in Verlängerung der Fernrohrachse liegend, ist fest und nur in der unteren Hälfte verspiegelt. Der zweite, am Drehpunkt eines über eine Gradskale bewegbaren Zeigers (Alhidade) angebracht, wird mit diesem geschwenkt.

Um die Höhe eines Gestirns zu messen, wendet sich der Beobachter diesem zu und visiert zunächst durch den unbelegten Teil des Spiegels und durch das Fernrohr die Kimm an. Die Alhidade wird nun so geschwenkt, daß das Bild des Gestirns nach Reflexion am drehbaren und am

belegten Teil des festen Spiegels im Fernrohr erscheint und genau »auf der Kimm« sitzt. An der Skale kann unmittelbar die Winkelhöhe abgelesen werden.

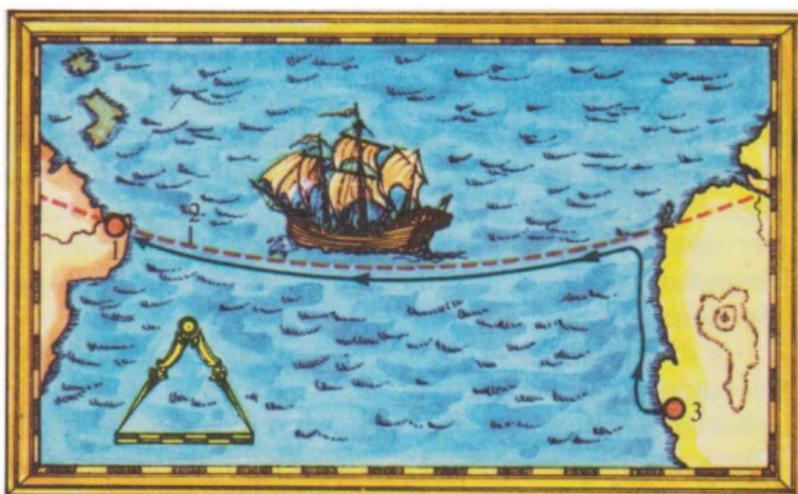
Der Winkelabstand zweier Sterne oder anderer Objekte wird entsprechend festgestellt. Getönte Gläser als Blendschutz, ein Nonius zum Ablesen kleiner Skalenteile usw. erleichtern das Arbeiten mit dem Spiegelsextanten.

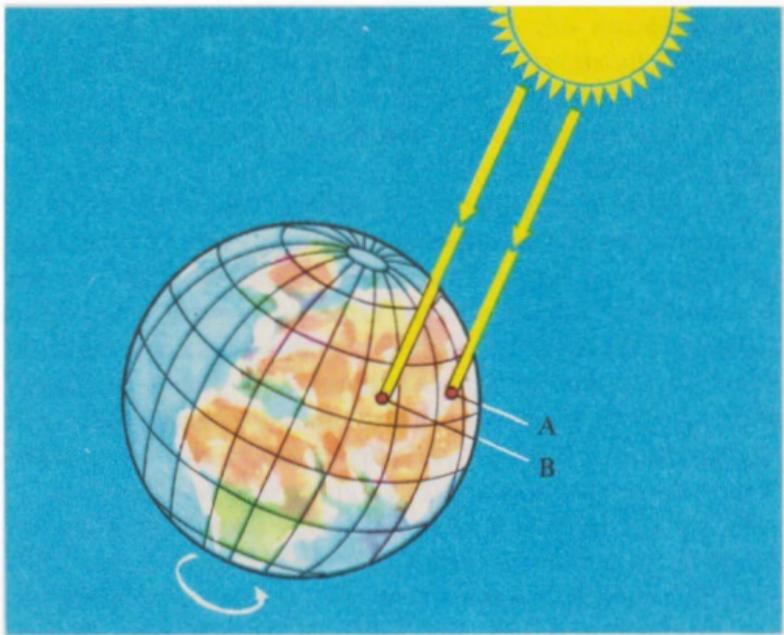
## 20 000 Pfund für eine Uhr

Zur Bestimmung des Schiffsortes sind zwei Angaben nötig, die der geographischen Breite und die der geographischen Länge. Erhielt man jene auf relativ einfache Weise, bereitete diese vielen Nautikergenerationen ganz erhebliche Schwierigkeiten.

Zwar war auch die Länge durch astronomische Beobachtungen zu bestimmen, z. B. indem man die Winkelabstände bekannter Gestirne vom Mond maß; doch setzten diese Verfahren neben teilweise umständlichen Berechnungen genaue und sehr ausführliche Tabellen für Mond- und Gestirnstellungen voraus. Diese aber fehlten noch.

*Solange keine exakte Längenbestimmung möglich war, half man sich mit Breitensegelei. 1 – Zielhafen; 2 – Breitenkreis des Zielhafens; 3 – Heimathafen*





*Mittag ist es am Ort A eher als am Ort B.*

Man half sich, indem man die geographische Länge durch Koppeln (s. S. 26) näherungsweise bestimmte oder Breitensegelei betrieb: Ein Schiff, das z. B. einen westlich gelegenen Hafen erreichen wollte, steuerte zunächst nahe der heimatlichen Küste dessen Breitengrad an und folgte diesem dann nach Westen.

Die Mängel dieser Behelfslösung traten um so deutlicher in Erscheinung, je mehr sich der Seeverkehr ausweitete und sich als Folge von Entdeckungen und Handel in Ost-West-Richtung und umgekehrt über viele Längengrade erstreckte.

Die astronomische Breitenbestimmung mußte durch ein ähnlich genaues und praktikables Verfahren zur Längenmessung ergänzt werden. Neben ständiger Verbesserung der astronomischen Tafelwerke hatte die Wissenschaft eine im Prinzip verblüffend einfache Methode anzubieten.

Als Folge der Erddrehung tritt Mittag, der Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes, in Moskau eher ein als in Berlin, in Berlin eher als in Paris usw. Alle 4 min passiert die Sonne

einen anderen der 360 Längengrade. Erreicht die Sonne ihren Höchststand an zwei Orten mit einer Zeitdifferenz von 20 min, liegen diese um fünf Längengrade auseinander. Die Längenbestimmung kann so auf Zeitmessungen zurückgeführt werden.

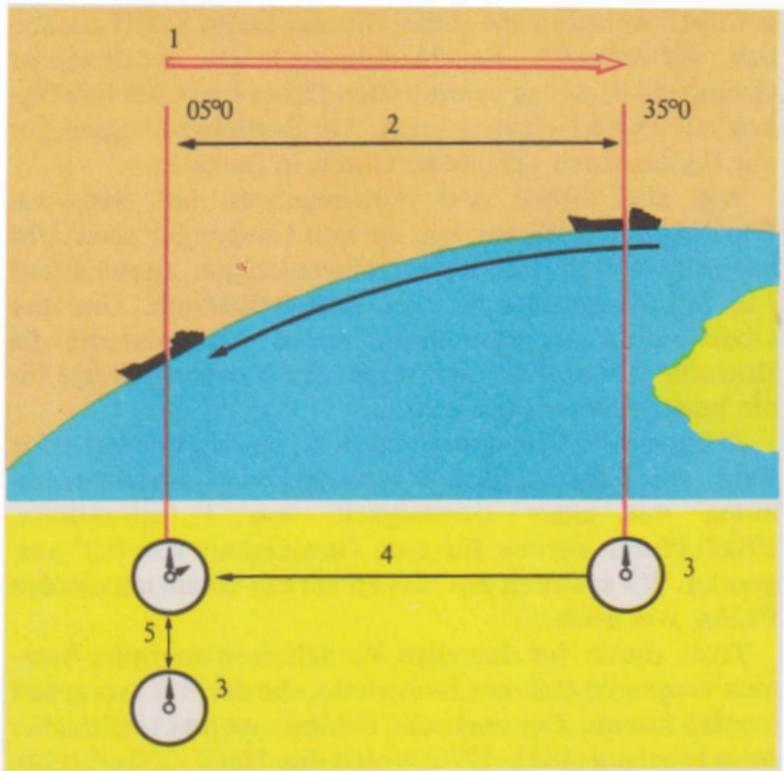
Man stellt eine Uhr am Ausgangsort auf Ortszeit, d. h. so, daß sie genau beim höchsten Sonnenstand 12 Uhr zeigt, und nimmt sie mit auf die Reise, ohne sie während des Reiseverlaufs nachzustellen. Unterwegs wird jeweils der Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes beobachtet und die Zeitdifferenz zur »mitgenommenen Zeit« abgelesen (bzw. heute zur Ortszeit des durch Greenwich/England gehenden Nullmeridians). Diese Zeitspanne liefert die Längendifferenz zum Ausgangsort (bzw. zum Nullmeridian).

Ist es am Beobachtungsort 40 min eher Mittag als am Ausgangsort, befindet sich der Beobachter zehn Längengrade ostwärts von diesem; »verspätet« sich der höchste Sonnenstand um 2 h, hat der Beobachter dreißig Längengrade in westlicher Richtung hinter sich gebracht.

Ist die Länge des Ausgangsortes bekannt und außerdem die Breite des Beobachtungsortes bestimmt, läßt sich dieser in der Karte aufsuchen.

Dieses einfache Rezept bringt ein Problem mit sich: Neben Beobachtungsfehlern gehen auch alle Gangabweichungen der Uhr in die Längenbestimmung ein. Gerade sie erwiesen sich als äußerst schwer aus dem Wege zu räumendes Hindernis. Die mitgeführte Uhr muß während der ganzen Reisedauer ohne Korrektur richtig gehen und bei der Rückkehr noch ebenso die Ortszeit des Heimathafens anzeigen wie bei der Ausreise. Die verfügbaren Uhren liefen jedoch ungenau und verfälschten die Resultate der Längenbestimmung erheblich. Ging z. B. nach mehrmonatiger Reise die Borduhr nur 2 min vor oder nach (eine Genauigkeit, die zunächst unerreichbar war), so bedeutete das auf Äquatorbreite einen Entfernungsfehler von rund  $\pm 55$  km, auf mitteleuropäischen Breiten immerhin noch von etwa  $\pm 35$  km.

Für genaue Navigation in Handels- oder Kriegsschiffahrt oder gar für ein Treffen auf See, wie es beispielsweise nötig war, wenn die mit geraubten Edelmetallen beladenen



*Längenbestimmung durch Messen der Ortszeit. 1 – Erddrehung; 2 – Differenz 30°; 3 – Ortszeit »Mittag«; 4 – Uhr fährt mit, sie wird nicht verstellt; 5 – Differenz 2 h*

Galeonen der spanischen »Silberflotte« westlich der Azoren von ihrem Geleitschutz erwartet wurden, reichte das nicht aus. Manche kleine Insel wurde wegen ungenauer Längenangaben mehrmals entdeckt, und zu Beginn des 18. Jahrhunderts strandete ein ganzes englisches Geschwader infolge ungenauer Längenbestimmung.

Präzise Längenbestimmungen wurden eine Frage der präzisen Uhren und damit ein Problem nicht nur der Wissenschaft, sondern vor allem der Technik.

Die üblichen Sanduhren, deren Glas nach jeweils einer halben Stunde gedreht wurde, worauf der Wachgänger die Schiffsglocke anschlug (»glaste«), schieden selbstverständlich von vornherein aus. Pendeluhren, seit dem 17. Jahrhundert mit teilweise hoher Ganggenauigkeit aus-

geführt, versagten ebenfalls. Die auf einem Schiff zusätzlich auftretenden Beschleunigungskräfte wechselnder Größe und Richtung beeinflussten Dauer und Gleichmäßigkeit der Pendelschwingungen. Als Borduhren kamen nur mit Federantrieb versehene Uhren in Betracht.

Wie aber Stöße und Schwingungen auf See, wie Feuchtigkeitseinflüsse, wie die den Gangregler einer Uhr beeinflussenden Temperaturschwankungen ausschalten? Die Schwierigkeiten türmten sich bergehoch. Um ihre Überwindung zu stimulieren, setzte unter anderen die Britische Admiralität (auf Vorschlag Newtons) Preise für die beste »Längenuhr« aus.

Zehntausend Pfund winkten dem, dessen Uhr bei einer Fahrt von England nach Westindien eine Längenbestimmung mit einer Genauigkeit von  $1^\circ$  garantierte, 20 000 Pfund wurden für eine Genauigkeit von  $0,5^\circ$  ausgesetzt. Wir erinnern uns, das entspricht einem maximalen Fehler von 2 min.

Trotz dieser für damalige Verhältnisse enormen Summen vergingen mehrere Jahrzehnte, ehe der Preis vergeben werden konnte. Der englische Feldmesser und Uhrmacher John Harrison (1693–1776) erhielt ihn. Nach 1730 erprobte er seinen »Time keeper« zunächst auf der Route Portsmouth–Lissabon, dann auf Reisen nach Westindien. Während einer viermonatigen Fahrt wich die Uhr nur um 2 min ab, die Bedingungen der Admiralität waren damit erfüllt. Daß Harrison der Preis erst nach langen Kämpfen, Zwistigkeiten und Intrigen zuerkannt wurde, sei am Rande vermerkt.

Außer Harrison hatten auch andere erheblich zur Entwicklung von *Chronometern*, wie man diese präzisen Uhren nannte, beigetragen, z. B. Berthoud in der Schweiz und Le Roys in Frankreich.

Während sich Feuchtigkeitseinwirkungen durch sorgfältige Werkstoffauswahl und hermetisches Abschließen, mechanische Schwingungen und Stöße durch kardanische und elastische Aufhängung der Uhren gering halten ließen, mußte die Beseitigung der Temperatureinflüsse vor allem beim Gangregler, der Unruh, einsetzen. Auch hierfür wurden geeignete Lösungen gefunden.

Nach 1760 wichen Chronometer auf Reisen von mehre-

ren Monaten nur noch bis um 40 s ab, die Länge war bis auf Teile eines Grads bestimmbar. Das »Längenproblem« konnte vorerst als gelöst betrachtet werden.

Sextant und Chronometer, Kompaß und Karte waren bis in unser Jahrhundert die wichtigsten Navigationshilfsmittel auf See. Die feinmechanische Industrie, vor allem die Uhrenindustrie, nutzte die Konstruktionsprinzipien und -merkmale der Chronometer, astronomische und geodätische Instrumente gingen aus dem Sextanten hervor.



---

# Navigation heute

---

## Reicht die Steuermannsschule noch aus?

Wo einst auf abenteuerlichen Fahrten geringe Mengen von Handelsgütern verschifft wurden – durch Seltenheit, Transportrisiko und hohe Profite so teuer, daß sie nur für wenige Begüterte erschwinglich waren –, fließt heute ein ununterbrochener Warenstrom über die Schifffahrtsrouten, befördert von Stück- und Massengutfrachtern, von Containerschiffen und Tankern, von Kühl-, Gefrier- und anderen Spezialschiffen. Hinzu kommen die Fischereifahrzeuge und die Einheiten der Seestreitkräfte vieler Staaten.

Die Segelschifffahrt, in den Klippen zu einem letzten Höhepunkt gelangt, wich Dampfschiffen (um die Jahrhundertwende stand auf der Welt dem Frachtraum der Segler bereits ein vierfach größerer auf Dampfschiffen gegenüber); diese wieder wurden von den Motorschiffen abgelöst, die heute die Meere beherrschen – und wahrscheinlich werden sie eines Tages Schiffen mit Kernenergieantrieb Platz machen müssen.

Wenige Zahlen nur seien genannt, um die gegenwärtige Bedeutung der Seefahrt zu charakterisieren: 1972 zählte man auf der Welt über 6 000 Tanker, über 26 000 Frachter aller Art und mehr als 16 000 Fischereifahrzeuge – wobei nur Einheiten über 100 t berücksichtigt wurden. 1980 sind es etwa 7 000 Tanker, 25 000 Frachter und 19 000 Fischereifahrzeuge.

Diese Zahlen schließen unsere volkseigene Handels-

*Chronometer »Glashütte-Quarz« und (oben) mit Federwerk*

flotte ein. An ihrem Beginn – nach der Zerschlagung des Faschismus – stand, im Sommer 1952, ein fast 50 Jahre alter Dampferveteran. Zum 25jährigen Jubiläum des VEB Deutfracht/Seereederei zeigten 201 moderne Handelsschiffe die DDR-Flagge auf den Meeren. Während eines Vierteljahrhunderts hatte sich die Gesamttragfähigkeit unserer Handelsflotte nahezu um das 1500fache vergrößert.

Größer wurden die Schiffe und schneller; sie sollten sicherer sein und trotz des in manchen Seegebieten – besonders in Küsten- und Hafennähe – beängstigend dichten Verkehrs sicherer fahren.

Auswirkungen auf Methoden und Mittel der Navigation konnten nicht ausbleiben. Sie mußte völlig unabhängig von Tageszeit und Sichtverhältnissen jederzeit genau und schnell den Standort liefern. Die Ortsbestimmung durfte allenfalls nur wenige Minuten dauern; ihr technisches Rüstzeug mußte möglichst auch kleineren Schiffen zugänglich sein. Die Summe dieser Forderungen vermochten die bisher vorgestellten Navigationshilfen nicht zu erfüllen.

Genaueres und rasches Navigieren forderte aber auch – von den zwanziger Jahren ab immer drängender – ein ganz anderer Zweig des Verkehrswesens: Für die Luftfahrt war die Navigation im Sinne des Wortes lebenswichtig, und zwar bei Geschwindigkeiten, die schon damals die der Seefahrt um das Zehnfache (heute bis zum Fünzigfachen und darüber) übertrafen. Jede effektivere Nutzung der Luftstraßen durch dichtere Flugzeugfolge und damit kleinere Abstände von Maschine zu Maschine setzt präzisere Navigations- und Ortungshilfen voraus.

Wesentliches Merkmal moderner Navigationsverfahren ist es daher, auch die Belange der Luftfahrt einzubeziehen. Die Methoden sind meistens so konzipiert, daß sie sich auf See und in der Luft als gleichermaßen brauchbar und nützlich erweisen; in ihrer prinzipiellen Funktionsweise unterscheiden sich auch die Geräte nicht.

Der Pilot freilich, der sich nach Bahnhofsschildern orientiert, und der Kapitän, der sein Ziel mit einem Bootskompaß und einem alten Sextanten ansteuert, sind nur noch eine nostalgische Erinnerung.

Navigation ist heute weder durch bloße Überlieferung noch durch Erfahrung allein erlernbar. Ihre Beherrschung erfordert ein sorgfältiges Studium, unterstützt durch Modelle, durch praktische Unterweisung an den Geräten, durch Training an Anlagen, mit denen sich jede nur erdenkliche Situation wirklichkeitsnah simulieren läßt. Der Seemann bekommt heute in vielen Ländern nach abgeschlossener Ausbildung zum Schiffsoffizier ein Hochschuldiplom ausgehändigt – bei uns das der Ingenieurhochschule für Seefahrt in Warnemünde/Wustrow, die auf eine mehr als 130jährige Tradition zurückblicken kann.

## Klassische Verfahren im neuen Gewand

*Mit dem letzten Ton des Zeitzeichens ist es genau ...* Wie wichtig genaue Zeitangaben im täglichen Leben sind, beweist schon unser fast unwillkürlicher Blick zur Uhr, wenn im Radio die Zeit angesagt wird. Erst elektrische und vor allem drahtlose Nachrichtentechnik haben es ermöglicht, alle Uhren eines Landes gleichzeitig die richtige Zeit zeigen zu lassen (noch vor 150 Jahren war dies für die Turmuhren einer Stadt ein nur schwer lösbares Problem ...).

Von einer zentralen Stelle aus, deren »Zeit« durch astronomische Beobachtungen, durch Quarzuhren oder neuerdings auch durch sogenannte Atomuhren mit größter Präzision kontrolliert wird, werden alle »Kunden« mit Zeitsignalen (z. B. in Form elektrischer Impulse) »beliefert«. Die Signale dienen der Korrektur der Uhren oder steuern sie unmittelbar.

Wie nützlich Zeitsignale für Schiffe sind, bedarf keiner weiteren Erläuterung. Zwar hatte die Fertigung von Präzisionsuhren im 19. Jahrhundert einen hohen Stand erreicht, und jedes Schiff führte mehrere Chronometer mit, deren Angaben, um Abweichungen erkennen zu können, miteinander verglichen wurden; stets aber blieb ein Rest von Unsicherheit.

Bereits die ersten Küstenfunkstationen (ab 1900) sendeten daher Zeitzeichen für die noch wenigen mit »funkentelegraphischen Stationen« ausgerüsteten Schiffe. 1906 tauchte sogar der Vorschlag eines weltweiten Zeit-

signals auf. Ein Sender auf Tenerife sollte es über eine 14 km (!) lange Antenne (vom Pico de Teyde abgespannt) ausstrahlen. Das Vorhaben war jedoch technisch noch nicht realisierbar, und wenig später wurden Zeitzeichen von zahlreichen anderen Stationen verbreitet.

Gegenwärtig sind auf der Welt über 200 spezielle *Zeitzeichensender* in Betrieb (in der DDR z. B. ein auf der Frequenz 4 525 kHz arbeitender Kurzwellensender). Sie strahlen mit Ausnahme kurzer Wartungspausen ununterbrochen Zeitsignale aus. Es gibt keinen Ort auf der Welt, an dem nicht mindestens ein Zeitzeichensender zu empfangen ist. Kein Wasser- oder Luftfahrzeug, kein wissenschaftliches Institut, kein Uhrmacher muß auf exakte Zeitangaben verzichten.

Funktechnik und Elektronik haben auch unmittelbar und entscheidend in die Konstruktion der Chronometer eingegriffen.

In den zwanziger Jahren standen die Funktechniker vor der Aufgabe, Sender höchster Frequenzgenauigkeit und -stabilität zu konstruieren. Sie lösten das Problem durch »Quarzstabilisierung«. Speziell hergerichtete Quarzplättchen oder -stäbe, als frequenzbestimmende Steuerelemente in die Schaltung eines Senders eingebaut, verleihen diesem eine Frequenzkonstanz, wie sie mit keiner anderen Methode zu erreichen ist. Konstante Frequenz heißt aber: Die Schwingungen sind zeitlich stets genau gleich lang. Das legte den Gedanken nahe, einen Quarzkristall als »Unruh« einer *Quarzuhr* zu benutzen. Hier ihr Prinzip:

In einem Oszillator wird eine frequenzkonstante, quarzstabilisierte Hochfrequenzschwingung von z. B. 30 kHz gewonnen. Weil sie für eine unmittelbare Zeitanzeige zu hoch wäre, wird die Ausgangsfrequenz in aufeinanderfolgenden Frequenzteilerstufen ohne Stabilitätsverlust halbiert, geviertelt usw. — bis herab zur niedrigen Endfrequenz, die einen winzigen Motor für die Zeiger oder eine elektronische Anzeigevorrichtung steuert.

Um 1930 funktionierten erste Ausführungen. Es waren sehr teure, komplizierte Anlagen; ihre Tausende Bauelemente beanspruchten mehrere schrankgroße Montagegestelle. Zu den überzeugenden Leistungen der Mikroelektronik und ihrer integrierten Schaltkreise zählt, daß

Quarzuhren seitdem so verkleinert und verbilligt wurden, daß sie heute als Armbanduhren im Handel sind. Als Chronometer sind Quarzuhren inzwischen weit verbreitet. Sie sind nicht größer als ihre mechanischen Vorläufer, werden aus eingesetzten Rundzellen gespeist und weichen je Tag nicht einmal um 0,01 s ab.

Quarz-Chronometer enthalten nur wenige, bei elektronischer Anzeige keinerlei mechanisch bewegte Teile. Sie sind lage- und nahezu erschütterungsunempfindlich. Oft kann man ihnen elektrische Zeitimpulse entnehmen, mit diesen andere Uhren an Bord synchron steuern oder die Impulse anderen Meßeinrichtungen (dem Log, Kurschreibern usw.) zuführen.

*Sextant sieht durch die Wolken* Der beste Spiegelsextant ist nutzlos, wenn kein peilbares Objekt auszumachen ist. Eine Wolkenbank kann jedes Bemühen um astronomische Ortsbestimmung vereiteln; in den »Wetterküchen« der Welt war sie oft für Tage oder Wochen ausgeschlossen.

Lichtwellen stellen jedoch nur einen Teil des elektromagnetischen Spektrums dar, zu dem beispielsweise auch die ultrarote und die ultraviolette Strahlung sowie Radiowellen gehören.

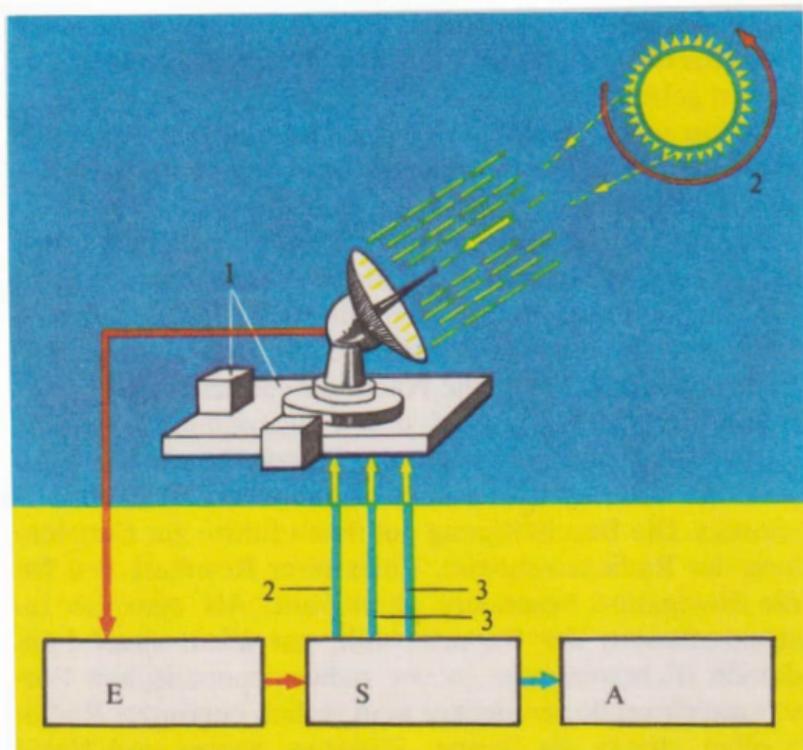
Schon in der Anfangszeit der Funktechnik vermutete man, daß von der Sonne und von Sternen auch Radiowellen zur Erde gelangen. Vereinzelt wurde damals sogar versucht, sie nachzuweisen, allerdings ohne Erfolg, denn genügend empfindliche Empfänger fehlten noch. Außerdem richtete sich das wissenschaftliche und technische Interesse vor allem auf Entwicklung und Ausbau von Funkverbindungen für die Nachrichtenübertragung.

Um 1930 kam man auf den Fragenkomplex zurück. Bestimmte Rauschstörungen des Kurzwellenverkehrs auf höheren Frequenzen waren offenbar kosmischen Ursprungs. Die Beschäftigung mit ihnen führte zur Entwicklung der Radioastronomie. Eines ihrer Resultate war für die Navigation besonders interessant: Als man das Instrumentarium der Radartechnik, vor allem straff bündelnde Richtantennen, in der radioastronomischen Forschung einsetzte, entdeckte man örtlich begrenzte Radioquellen, denen die Sonne, Planeten, Sterne und Nebel

zugeordnet werden konnten. Besonders die Sonne ließ sich mit relativ einfachen Hilfsmitteln anpeilen – zwar nicht mit der Genauigkeit eines Spiegelsextanten, dafür aber auch bei bedecktem Himmel.

Im *Radiosextanten* wird dies ausgenutzt. Seine Hauptbestandteile sind ein hochempfindlicher Millimeterwellenempfänger und eine für diese Wellenlängen ausgelegte schwenkbare Richtantenne. Sie ist so konstruiert, daß sie möglichst hohe Bündelungsschärfe aufweist, d. h., Radiostrahlung nur aus einem möglichst kleinen und von der Antennenstellung abhängigen Raumbereich aufnimmt. Wird die Antenne auf das Zentrum der Sonne gerichtet, treten am Empfängereingang die intensivsten Signale auf. Man kann daher die Sonnenhöhe bestimmen, indem man

*Zur Arbeitsweise des Radiosextanten. 1 – kreiselstabilisierte Plattform; 2 – Abtastung des Sonnenrandes; 3 – Nachsteuermotoren für die Antenne: Einstellung der Höhe und des Seitenwinkels. E – Empfänger; S – Gewinnung der Steuersignale; A – Anzeige: Höhe und Seitenwinkel*



die Sonne mit der Antenne anvisiert und daraufhin die Antennenstellung bis zum Signalmaximum korrigiert. Die Antennenstellung ergibt den Höhenwinkel.

In der technischen Ausführung wird dem Navigator das Korrigieren abgenommen. Er richtet die Antenne grob zur Sonne, die Feineinstellung erledigt eine Steuerelektronik selbsttätig. Sie wurde dem sogenannten Zielverfolgungsverfahren zur Radarbegleitung von Flugkörpern entlehnt. Die Antenne ist nicht auf die schwer exakt bestimmbare Sonnenmitte gerichtet, sondern tastet »leicht schielend« und elektronisch gesteuert ständig den Sonnenrand ab. Folgt sie ihm genau, ändert sich das Empfängerausgangssignal nicht. »Rutscht« sie von der Randlinie ab, schwankt die Ausgangsspannung periodisch. Aus Größe und Zeitpunkt der Spannungsänderungen werden elektrische Nachsteuerspannungen gewonnen, die über Servomotoren die Antennenstellung korrigieren.

Die Nachführeinrichtung folgt zugleich der Sonnenbewegung. Läßt man den Radiosextanten eingeschaltet, kann der Höhenwinkel der Sonne fortlaufend angezeigt werden.

Radiosextanten sind gegenwärtig hauptsächlich auf großen Schiffen und in Langstreckenflugzeugen zu finden. Den für die Höhenwinkelbestimmung nötigen Horizont, wie er mit dem Spiegelsextanten anvisiert wird, kann der Radiosextant nicht unmittelbar feststellen. Deshalb wird er auf einer auch bei Fahrzeugschwankungen stets waagerechten kreiselstabilisierten Plattform montiert. Wir werden sie an anderer Stelle näher kennenlernen (s. S. 100).

*20 000 Umdrehungen in der Minute* Die Tatsache, daß ein Kompaß nicht genau nach Norden zeigt, sondern zu »seitwärts« liegenden magnetischen Polen, war schon vor 2 000 Jahren bekannt. Diese von Ort zu Ort und überdies mit der Zeit wechselnde Mißweisung (*Deklination*) ist in Tabellen und Karten festgehalten und muß bei der Navigation berücksichtigt werden.

Schwieriger zu erfassen und zu berücksichtigen waren und sind sporadische Änderungen des Erdmagnetfeldes, hervorgerufen vor allem durch Vorgänge auf der Sonne.

Vor allem auch die Entwicklung des Schiffbaus selbst

war Ursache weiterer Fehlerquellen. Jede größere Stahlmasse, vom Schiffsrumpf bis zum schwenkbaren Ladebaum, jede stromführende Leitung in unmittelbarer Kompaßnähe beeinflusst die Magnetnadel.

Außer durch geschickte Wahl des Aufstellungspunktes kompensiert man den größten Teil dieser *Deviation* durch Hilfsmagnete am Kompaß. Der verbleibende Rest wird in Tabellen erfaßt.

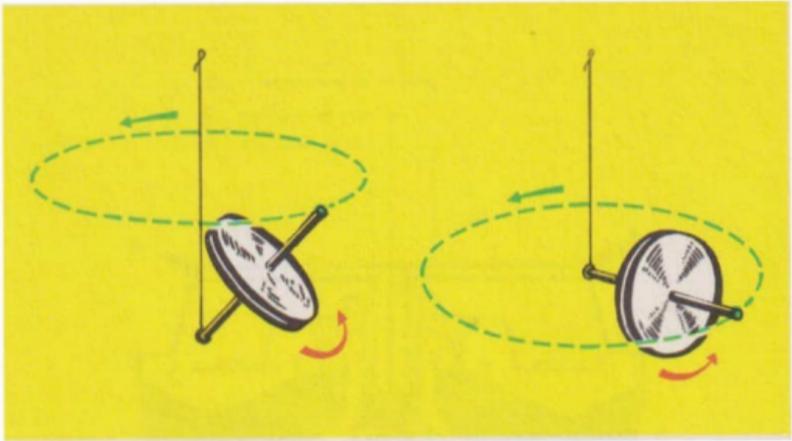
Die Kräfte, denen der Kompaß seine Funktion verdankt, und diejenigen, die sie beeinträchtigen, sind von gleicher Art. Völlig ausschalten lassen sich letztere daher nicht. Trotz dieser Mängel zählt der Magnetkompaß auch heute zu den verbreitetsten Navigationshilfsmitteln.

Unabhängigkeit von magnetischen Einflüssen und Störungen hat erst der auf den Gesetzen der Drehbewegung beruhende *Kreiselkompaß* gebracht.

Kreisel sind uns aus dem Physikunterricht oder als Spielzeug bekannt, Kreiselwirkungen von kleinauf so vertraut, daß wir sie – etwa beim Radfahren – unbewußt ausnutzen. Ein rotationssymmetrischer, oft diskusförmiger Körper zeigt, wenn er in Drehung um seine Symmetrieachse versetzt und diese an einem Ende (oder an beiden) unterstützt wird, ein auf den ersten Blick merkwürdiges Verhalten. Hängen wir ihn schräg auf, kippt er nicht, sondern verharrt in schräger Stellung, wobei seine Laufachse einen Kegelmantel beschreibt. Selbst bei waagerechter und nur an einem Ende unterstützter Laufachse fällt er nicht. Versuchen wir, die Drehachse eines laufenden Kreisels zu schwenken, erweist er sich als störrisch und setzt unserem Vorhaben fühlbaren Widerstand entgegen. Selbstverständlich ist dieses schwerkraftwidrige Benehmen physikalisch wohlbegründet. Allerdings können wir darauf hier nicht näher eingehen.

Zwei Kreiseleigenschaften sind für die Navigation besonders wichtig:

- Ein keinen äußeren Kräften unterliegender, im Schwerpunkt unterstützter Kreisel ist bestrebt, seine Achsenrichtung im Raum beizubehalten. Jeder Versuch, die Kreiselachse zu kippen, hat ein Ausweichen des Kreisels senkrecht zur einwirkenden Kraft und zur Drehachse zur Folge.

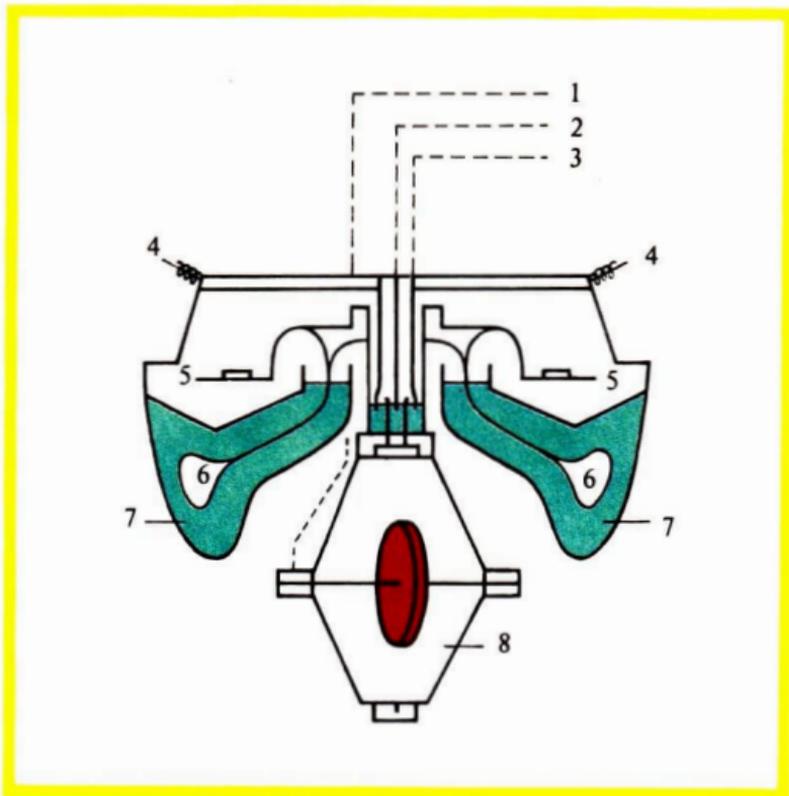


*Zum Verhalten des an einem Achsenende aufgehängten Kreisels*

- Ein Kreisel, dessen Achse nur in einer waagerechten Ebene geschwenkt werden kann, stellt sich durch die ihn auf der rotierenden Erde beeinflussenden Kräfte so ein, daß seine Drehachse in Meridianrichtung, also in Nord-Süd-Richtung, weist.

Den Gedanken, diese Erscheinung für die Konstruktion eines Kompasses zu nutzen, äußerte schon der französische Physiker Léon Foucault (1819–1868). Trotzdem ließ der Kreiselkompaß noch länger als ein halbes Jahrhundert auf sich warten. Solange hölzerne und nicht »elektrifizierte« Schiffe die Meere beherrschten, genügten Magnetkompassse den meisten Ansprüchen. Außerdem wußte man zwar, welche technisch-physikalischen Bedingungen ein Kreiselkompaß erfüllen müßte, nicht aber, wie sie sich würden erfüllen lassen; galt es doch, während der ganzen Reisedauer einen Kreisel erheblicher Masse (mindestens einige Kilogramm) in sehr schneller und gleichförmiger Umdrehung (mindestens mehrere 1 000 U/min) zu halten.

Nach 1905 gingen Muster des Kreiselkompasses, an dessen technischer Gestaltung vor allem Hermann Anschütz-Kämpfe (1872–1931) Anteil hatte, auf Fahrterprobung. Sie wurden anfänglich als Einkreiselkompaß ausgeführt. Der Kreiselkörper ist zugleich Läufer eines Drehstrommotors, was den großen Vorteil mit sich bringt, daß eine reibungsvergrößernde und störanfällige Strom-

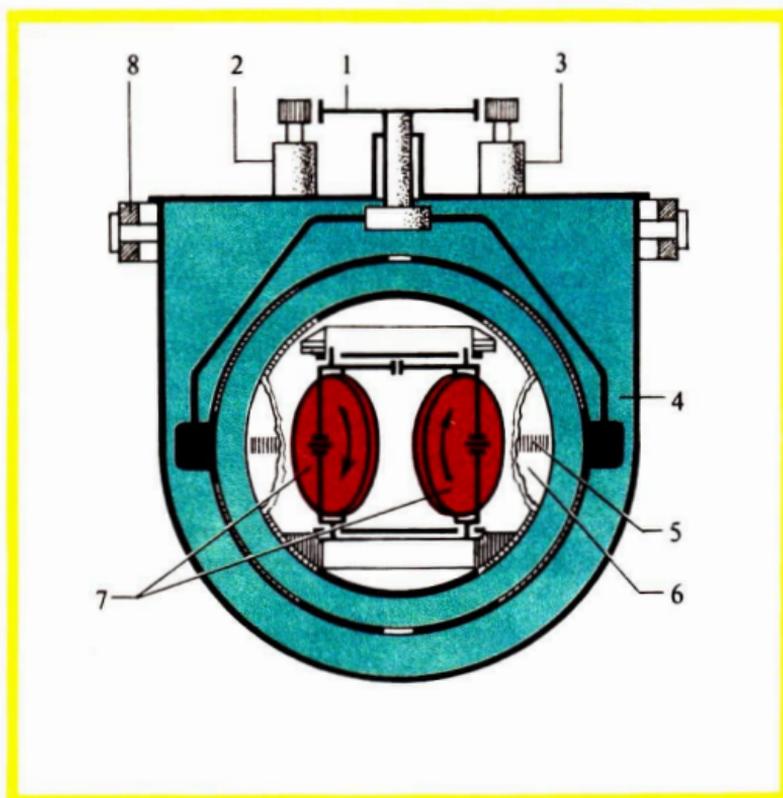


*Der erste Kreiselkompaß. 1, 2, 3 – Stromversorgung; 4 – federnde Aufhängung; 5 – Kompaßrose; 6 – Schwimmkörper; 7 – Kessel mit Quecksilberfüllung; 8 – Kreisel im Gehäuse*

zuführung zum Kreiselkörper entfällt. Sein Durchmesser liegt zwischen einem und mehreren Dezimetern, die Drehzahl im allgemeinen bei 20 000 U/min und darüber.

Das hermetisch geschlossene Kreiselgehäuse hängt an einem drehbaren Schwimmkörper, der mit der Kompaßrose verbunden ist und in dem mit einer tragenden Flüssigkeit gefüllten Kompaßkessel schwimmt. Der Kompaß schwingt, ein sich über viele Minuten erstreckender Vorgang, von selbst in die Nord-Süd-Richtung ein und behält sie dann bei.

Zwar stören beim Kreiselkompaß keine magnetischen Einflüsse; dafür treten andere Fehler auf. Sie entstehen teilweise im Kompaß selbst – durch »Spiel« der Drehachsen, nicht vollkommenes Auswuchten des Rotations-



Mehrkreiselpaß. 1 – Zahnrad; 2 – Winkelgeber; 3 – Nachstellmotor; 4 – Tragflüssigkeit; 5 – 360°-Skale; 6 – Kreiselkugel; 7 – Kreisel; 8 – Kardanring

körpers, ungleichmäßige Reibung u. a. Sie lassen sich durch sorgfältige Konstruktion, aber auch durch Erhöhen der Kreiselmasse und -drehzahl verringern.

Auch die Fahrzeugbewegung verursacht Abweichungen. So wird der Kreiselkompaß durch Schlingerbewegungen sowie durch Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen beeinflusst. Hinzu kommt der *Fahrtfehler*, eine durch Kurs, Geschwindigkeit und geographische Breite bedingte Abweichung.

Der *Schlingerfehler* wurde durch den Übergang vom Ein- zum Mehrkreiselpaß beseitigt. Bei den gegenwärtig häufig anzutreffenden Zweikreiselpässen enthält die in einer Trägerflüssigkeit schwebende Kreiselkugel zwei Kreisel, deren Achsen einen bestimmten Winkel bilden und

mechanisch so verbunden sind, daß der Schlingerfehler kompensiert wird. Auch Abweichungen durch Geschwindigkeits- und Kursänderungen lassen sich durch einen Kunstgriff ausschalten.

Zur Korrektur des Fahrtfehlers gibt es Korrekturtabellen, doch wird die Berichtigung heute häufig von einem Rechengerät übernommen, dessen Eingang elektrische Signale von Kreiselkompaß und Log zugeführt werden, während die Breitenwerte von Hand einzugeben sind.

Die im Vergleich zum Magnetkompaß größere Richtkraft des Kreiselkompasses ermöglicht es, mit Hilfe von Drehmeldern (Bauelemente, die Winkelstellungen in elektrische Signale umwandeln) richtungsproportionale Signale zu gewinnen. Sie können über größere Entfernungen übertragen, in elektronischen Geräten umgeformt und verstärkt werden und dienen an Bord unterschiedlichen Zwecken.

Der die Signale liefernde *Mutterkompaß* kann seine Werte an *Tochterkompass* («Kreiselstöchter») weitergeben. Sie werden an Bord aufgestellt, wo immer sie benötigt werden oder die Navigation erleichtern (z. B. im Kartenhaus oder beim Notruder). Der Standort des Mutterkompasses wird wählbar, man kann z. B. einen »schlingerarmen« Aufstellungspunkt aussuchen.

Die Signale vom Mutterkompaß können Schreiber steuern, die den Schiffskurs, zugleich mit Zeitmarken, fortlaufend festhalten, für die Orientierung des Radarschirms sorgen (s. S. 83) oder der Selbststeueranlage als Basisdaten dienen.

*Auch Log und Lot veränderten sich* Obwohl das Propellerlog (s. S. 17) schon recht modern anmutet, ist seine Bedeutung erheblich zurückgegangen. Sowohl für sehr niedrige wie auch die heute üblichen hohen – oft über 20 Knoten liegenden – Geschwindigkeiten zeigte es sich als wenig geeignet.

Die Stelle des Propellerlogs hat daher bei den meisten größeren und großen Schiffen das *hydrodynamische Log*, das *Staudrucklog*, eingenommen.

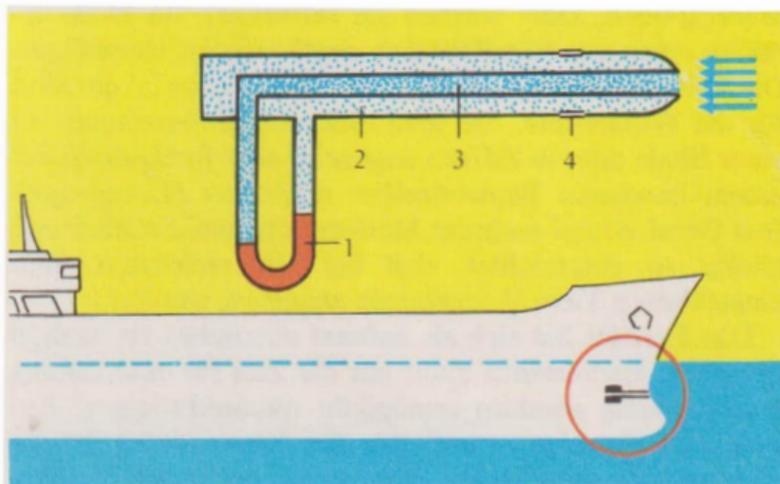
Halten wir die Hand in eine strömende Flüssigkeit oder bewegen wir sie durch eine ruhende Flüssigkeit, verspüren

wir einen Druck. Er wächst mit der Relativgeschwindigkeit Flüssigkeit–Hand, er kann gemessen und, sofern die Flüssigkeitsdichte bekannt ist, in Geschwindigkeitswerte umgerechnet werden. Das ist der Grundgedanke des Staudrucklogs.

Ursache der Kraftwirkung ist vor allem der durch das plötzliche Abbremsen der Strömung am Hindernis auftretende Staudruck. Seine Größe nimmt mit dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit zu, vervierfacht sich also bei doppelter Strömungsgeschwindigkeit usf. Allerdings überlagert sich ihm der sogenannte statische Druck. Er ist auch vorhanden, wenn das Hindernis gegenüber der Flüssigkeit ruht und wird durch das Gewicht der Flüssigkeit und der auf dieser lastenden Atmosphäre verursacht; infolgedessen nimmt er mit wachsender Tiefe zu (alle »Druckprobleme« beim Tauchen gehen letztlich auf diesen Druck zurück).

Damit der statische Druck bei Geschwindigkeitsmessungen nicht in Erscheinung tritt, benutzt man das Staurohr. An der Stirnseite des doppelwandigen Zylinders tritt die Summe aus Staudruck und statischem Druck auf, an seitlichen Schlitzfenstern, parallel zur Strömungsrichtung, nur der statische Druck. Im Druckmesser (im Bild als einfaches Flüssigkeitsmanometer dargestellt) sind beide Größen

*Das Staurohr, Grundlage des Staudrucklogs. 1 – Manometer; 2 – äußeres Rohr; 3 – inneres Rohr; 4 – Schlitzfenster*



»gegeneinandergeschaltet«; durch die Differenzbildung hebt sich der statische Druck auf.

Bei Schiffen wird das Staurohr aus dem Schiffsboden gefahren (*Bodenlog*), oder es ist als *Stevenlog* in den Vordersteven eingelassen. Der mit einem Meßwandler festgestellte Staudruck wird in Form elektrischer Signale zum Anzeigegerät übertragen. Auch in der Luftfahrt wird der Staudruckmesser häufig verwendet.

Neben dem Staudrucklog verwendet man das mit hoher Genauigkeit arbeitende *elektrodynamische Log*. Das Magnetfeld einer am Schiffskörper angebrachten Sonde bewegt sich durch das elektrisch leitende Seewasser. Dabei entsteht zwischen zwei mit durch das Wasser bewegten leitenden Elektroden eine geschwindigkeitsabhängige elektrische Spannung, die gemessen wird.

Staudruck- und elektrodynamisches Log messen nur Relativgeschwindigkeiten zwischen Schiff und Wasser. Strömungen gehen in die Messung ein und können, sofern sie nicht nach Größe und Richtung bekannt sind, das Resultat verfälschen. Soll die Geschwindigkeit über Grund gemessen werden, muß man sich etwas aufwendigerer Verfahren bedienen (vgl. S. 98).

Die Wassertiefe wird heute mit dem *Echolot* bestimmt. Es funktioniert ähnlich wie ein Radargerät, verwendet allerdings Ultraschall- statt Funkwellen.

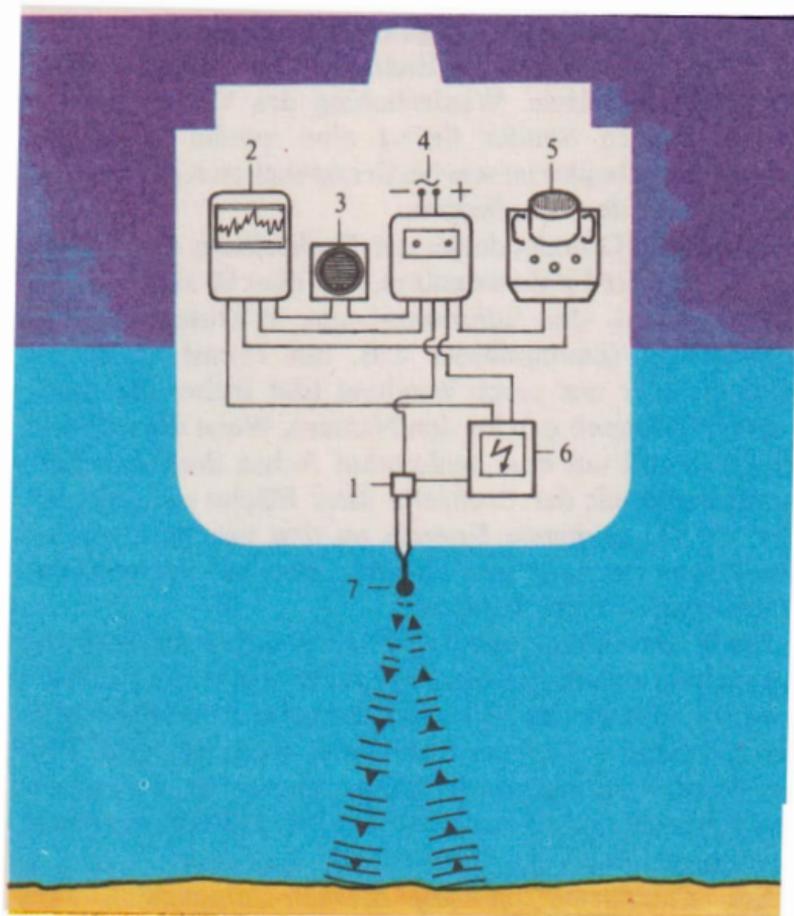
Ein Ultraschallsender am Schiffsboden schickt periodisch (z. B. 30mal je Minute) Ultraschallimpulse zum Meeresboden. Dort werden sie reflektiert, ihr Echo erreicht einen am Schiffsboden angebrachten Empfänger. Die Zeitspanne bis zum Eintreffen des Echos ist ein Maß für die Wassertiefe. Sie wird elektronisch bestimmt, auf einer Skale oder in Ziffern angezeigt oder fortlaufend auf einem bewegten Papierstreifen registriert (*Echograph*). Das Gerät ist auf mehrere Meßbereiche umschaltbar und häufig so eingerichtet, daß bei Unterschreiten einer einstellbaren Tiefe Warnsignale ausgelöst werden.

Das Echolot hat sich als äußerst nützliches Hilfsmittel erwiesen. Es verkürzt nicht nur die Zeit für eine Lotung entscheidend, sondern ermöglicht ununterbrochene Lotung und Anzeige – und das für Meerestiefen bis zu mehreren tausend Metern, die vorher nur durch Stunden

während Lotungen zugänglich waren. Wochenlange Vermessungsarbeiten können dadurch ersetzt werden, daß das Schiff einen vorgegebenen Kurs steuert und der Echograph fortlaufend und selbsttätig das Profil des Meeresbodens unter dem fahrenden Schiff aufzeichnet. Ohne Echolot wäre die moderne Meeresforschung nahezu unvorstellbar.

Ultraschallimpulse werden auch von Unterwasserhindernissen, Eisbergen, Wracks, Fischschwärmen, großen Einzelfischen und Planktonansammlungen reflektiert. Damit eröffnen sich dem Echolot Einsatzmöglichkeiten,

*Echolot/Echograph. 1 – Ausfahr-, Kipp- und Schwenkgerät; 2 – Echograph; 3 – Abhörgerät; 4 – Bedien- (u. Kontroll-)gerät; 5 – Sichtgerät; 6 – Impuls-generator; 7 – Schwinger*



die weit über die Tiefenmessung hinausreichen, zumal wenn man das Lot so einrichtet, daß es auch den Wasserraum vor dem Schiff oder seitlich davon »absucht«. Für die Hochseefischerei entwickelte spezielle Echolotanlagen tragen z. B. wesentlich dazu bei, Fischschwärme zu orten und die Fangergebnisse zu steigern.

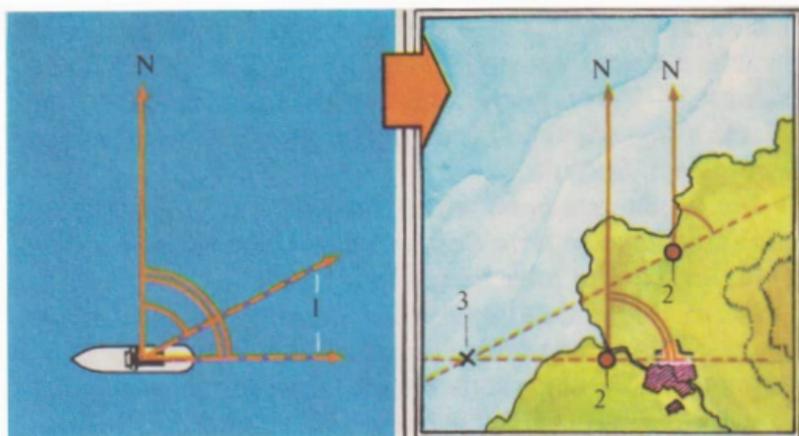
## Funkwellen und Navigation

*Im Schnittpunkt der Standlinien* Die Funkwellen eines Senders breiten sich, eine geeignete Antenne vorausgesetzt, radial nach allen Seiten aus. Mit einem Empfänger, dessen Antenne Funkwellen nur aus *einer* Richtung aufnimmt und so eingerichtet ist, daß der Raum ringsum abgesucht werden kann, läßt sich die Richtung zum Sender feststellen. Kennt der Navigator den Senderstandort und überträgt er die ermittelte Richtung in eine Karte, ergibt sich eine Standlinie. Wiederholung des Verfahrens mit einem zweiten Sender liefert eine zweite Standlinie. Schnittpunkt beider ist wie bei der optischen Kreuzpeilung der Standort des Empfängers.

Das ist der Grundgedanke der *Funkpeilung*, des ältesten Verfahrens der Funknavigation. Seit über 60 Jahren ist ihr Grundelement, die *Rahmenantenne*, in Gebrauch: eine großflächige (Durchmesser z. B. um 75 cm) Spule aus wenigen oder nur einer Windung (der früher die Spule tragende Rahmen gab ihr den Namen). Weist die aufrecht stehende und um eine senkrechte Achse drehbare Rahmenantenne mit der Breitseite ihrer Fläche zum Sender, gibt sie die geringste Energie an den nachgeschalteten Empfänger ab; zeigt ihre »Kante« zum Sender, wird das Empfangsmaximum erreicht.

Zur Richtungsbestimmung braucht daher die Antenne nur gedreht zu werden, bis der gepeilte Sender am lautesten oder am leisesten zu hören ist oder seine Empfangsstärke entsprechend von einem Instrument angezeigt wird. Weil das Empfangsminimum deutlicher ausgeprägt und »schärfer« einstellbar ist als das Maximum, wird Minimumpeilung bevorzugt.

Zur Standortbestimmung müssen mindestens zwei



Standortbestimmung durch Funkpeilung-Eigenpeilung. 1 – Richtungen zu zwei Funkfeuern (die Auswertung erfolgt in einer Karte); 2 – die beiden Funkfeuer; 3 – Standort des Schiffes

Sender gepeilt werden. Erfolgen alle Arbeitsschritte an Bord, haben wir es mit *Eigenpeilung* zu tun. Um sie durchzuführen, sind Peilantenne, Empfänger, Seekarten und ein Verzeichnis der in Frage kommenden Sender mit Frequenzangaben und geographischen Koordinaten nötig.

Umkehrung der Eigenpeilung ist die *Fremdpeilung*. Der unbekannte Standort eines Senders läßt sich durch Anpeilen von zwei örtlich getrennten Peilanlagen aus bestimmen, vorausgesetzt, daß sich beide über ihre Meßwerte verständigen können. Schiffe ohne funktionsfähige Peilanlage können auf diese Weise ihren Standort feststellen lassen. Sie rufen eine der an zahlreichen Küsten stationierten Funkpeilstellen, erbitten eine Fremdpeilung und senden anschließend Peilzeichen. Der Standort wird von der angerufenen Peilfunkstelle in Zusammenarbeit mit einer anderen festgestellt und dem Schiff drahtlos mitgeteilt.

Besonders wichtig ist, daß die Funkpeilung Zielfahrten zu einem Sender ermöglicht. Man steuert einen mit der Richtung des Empfangsminimums übereinstimmenden Kurs, bis der Senderstandort erreicht ist. Zielfahrt ist – und nicht zuletzt deshalb müssen nach internationalen Vereinbarungen alle größeren Seeschiffe Funkpeiler mit sich führen – die einfachste und sicherste Methode, ein in Seenot geratenes Schiff, ein Rettungsboot oder -floß ohne

Kenntnis seines Standortes zu finden. Solange Schiffbrüchige einen Notsender betreiben können, sind sie ansteuerbar. Aber auch zum Auffinden von Meß- und Markierungsbojen (z. B. in der Hochseefischerei) bewährt sich diese Methode.

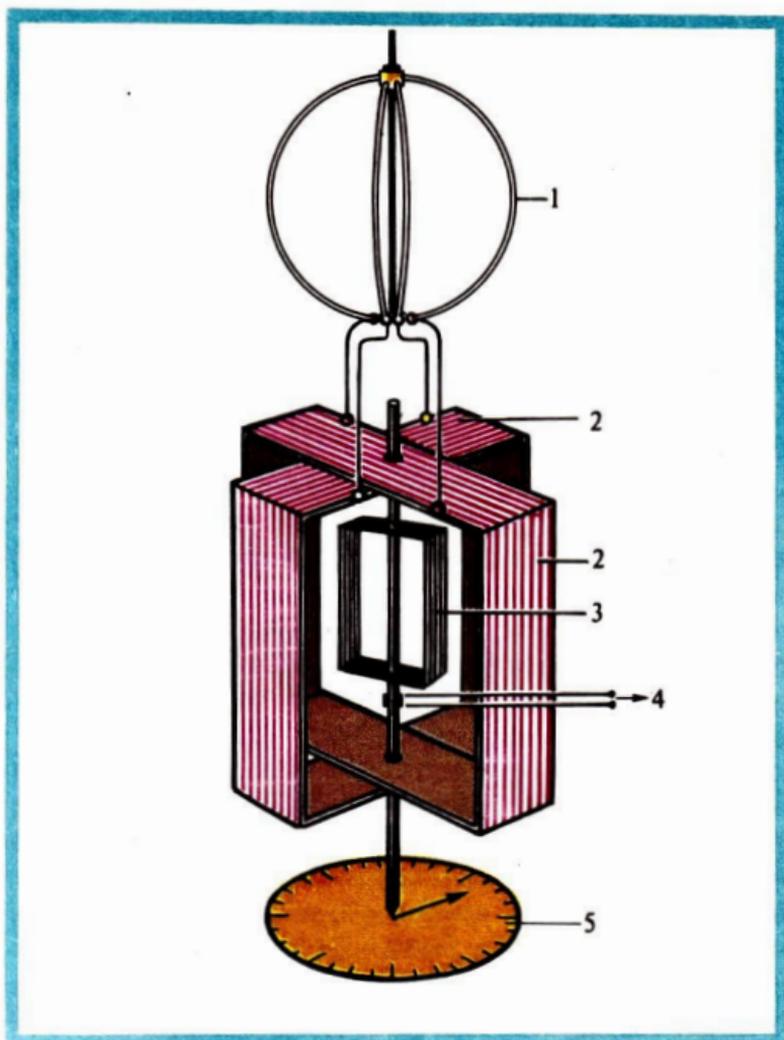
Die Rahmenantenne wirkt zunächst zweiseitig. Der bei Zielfahrt angesteuerte Sender könnte im Osten oder Westen, im Norden oder Süden liegen usf.

Diese Doppeldeutigkeit kann beseitigt werden, indem man dem Empfänger eine ungerichtet empfangende Hilfsantenne, z. B. eine Stabantenne, zuschaltet. Sie ist oft konstruktiv mit der Rahmenantenne vereint und bei allen Funkpeilern vorhanden.

Gerade weil die Funkpeilung sich als so nützlich erwies, wurde viel getan, um ihre Anwendung zu vereinfachen, die Bedienung der Geräte zu erleichtern und ihre Genauigkeit zu erhöhen. So begnügt man sich nicht damit, Sender zu peilen, die – wie Rundfunkstationen – eigentlich anderen Zwecken dienen. An wichtigen Küstenpunkten und auf Feuerschiffen sind, Leuchttürmen vergleichbar, nach allen Richtungen strahlende *Funkfeuer* installiert. Sie senden auf Wellenlängen um 1000 m im Wechsel Dauertöne als Peilzeichen und eine Morsekennung (z. B. »FE« für das Feuerschiff Fehmarnbelt). Ihre Reichweite kann mehrere Hunderte Seemeilen betragen (noch weit im Binnenland sind im Langwellenbereich eines Rundfunkempfängers Funkfeuer zu hören).

Oft sind mehrere Funkfeuer eines Seegebietes zu einer Gruppe zusammengefaßt (in der westlichen Ostsee z. B. die Funkfeuer Stubbenkammer – Trelleborg – Falsterborev/Feuerschiff). Die Sender der Gruppe strahlen auf gleicher Frequenz, senden aber nicht gleichzeitig, sondern in zyklischer Folge. So werden Frequenzkanäle gespart; die Tätigkeit des Navigators vereinfacht sich. Er muß den Empfänger nur einmal, und zwar auf die Gruppenfrequenz, abstimmen und dann nacheinander die Peilwinkel der Sender der Gruppe feststellen.

Das Drehen der Peilantenne mittels eines Handrades brachte häufig Komplikationen mit sich. Antenne und Empfänger mußten dicht beieinander stehen; ein für *beide* günstiger Aufstellungsort ließ sich jedoch nicht immer



Zur Arbeitsweise des Goniometerpeilers. 1 – Kreuzrahmen; 2 – feste Spulen; 3 – drehbare Suchspule; 4 – Empfänger; 5 – Peilskala

finden. Mechanische Winkelübertragungen, etwa durch Seilzüge, für größere Distanz zwischen Peilantenne und Empfänger erwiesen sich als wenig zuverlässig und nicht genau genug.

Der drehbare Peilrahmen wurde daher vom Kreuzrahmen abgelöst, einer Kombination aus zwei um  $90^\circ$  verdrehten, fest stehenden Rahmenantennen. Ihre Anschlüsse führen zum Goniometer. Dies ist eine Anordnung

aus mehreren Spulen, deren eine, die Suchspule, drehbar und mit einer Winkelskala verbunden ist. Zwischen den Goniometerspulen bildet sich ein verkleinertes Modell des elektromagnetischen Senderfeldes am Kreuzrahmen aus. Es wird mit der Suchspule abgetastet, die Maxima und Minima ebenso festzustellen erlaubt wie mechanisches Drehen einer Rahmenantenne.

Kreuzrahmen und Goniometer sind lediglich durch elektrische Leitungen miteinander verbunden. Sie können bis zu mehreren zehn Metern lang sein. Bei der Aufstellung von Kreuzrahmen und Empfänger kann freizügig verfahren werden, mechanische Fehlerquellen entfallen. Goniometer und Empfänger bilden eine geschlossene Geräteeinheit. Sie trägt neben anderen Bedienelementen an der Frontplatte zwei große Skalen: die Abstimmskale zum Einstellen des zu peilenden Senders (bzw. der Gruppe) und die Peilskale zum Aufsuchen und Ablesen des Peilminimums. Für kleine Schiffe stehen Peilvorsätze zur Verfügung. Sie enthalten im wesentlichen ein Goniometer, werden mit dem vorhandenen Funkempfänger verbunden und machen einen speziellen Peilempfänger unnötig.

Der Peilwinkel wird nach Gehör ermittelt und dann erst optisch abgelesen. Diesen Umweg vermeidet der *Sichtfunkpeiler*. Die vom Kreuzrahmen abgegebenen Hochfrequenzspannungen laufen über zwei völlig gleiche Empfangsteile. Ihre Ausgangssignale, deren Verhältnis von der Richtung zum Sender abhängt, steuern das Ablenssystem einer Elektronenstrahlröhre so, daß auf ihrem Schirm ein zeigerähnlicher, auf eine Skale am Schirrand weisender Leuchtstrich geschrieben wird. So werden nicht nur subjektive Fehler vermieden. Der Sichtfunkpeiler arbeitet auch empfindlicher und genauer als der einfache Goniometerpeiler.

Eine weitere Entwicklung ist der *automatische Funkpeiler*. Er wird lediglich auf das zu peilende Funkfeuer abgestimmt und dann auf Automatik geschaltet. Daraufhin sucht eine elektronische Steuereinrichtung selbsttätig das Peilminimum und veranlaßt zugleich einen Servomotor, die Peilskale mitzudrehen. Nach etwa 2 s kann der Peilwinkel abgelesen werden. Bei Peilungen von Gruppenfunkfeuern werden die Werte nacheinander angezeigt.

Bei den ersten abenteuerlichen Ozeanflügen navigierten die Piloten nach Kompaß, Sonne und Gestirnen. Daß dies nicht genügte, zeigten zahlreiche mit »Landungen im Bach« endende Unternehmen. Im Luftverkehr mußte man solche Risiken nach Möglichkeit vermeiden, und so wurden ähnliche Peilanlagen eingeführt wie auf See. Ein Netz von Boden-Funkpeilstellen zur Fremdpeilung und Bordanlagen zur Eigenpeilung waren damals Grundpfeiler der Flugsicherung. Für heutige Fluggeschwindigkeiten scheidet dieses Peilverfahren aus. Als *Radiokompaß* dagegen ist eine Peileinrichtung an Bord nahezu aller Flugzeuge vertreten.

Der Radiokompaß ist kein Kompaß im eigentlichen Sinne, sondern ein automatischer Funkpeiler, der fortlaufend und selbsttätig den Winkel zwischen der Flugzeuglängsachse und der Richtung zu einem Sender anzeigt. Er eignet sich daher besonders für Zielflüge, etwa zum Ansteuern eines Flugplatzes. Diese Anwendungsmöglichkeit wird durch Funkfeuer unterstützt. Sie stehen an Flughäfen und anderen wichtigen Punkten und unterscheiden sich in ihrer technischen Ausführung kaum von den Funkfeuern der Seefahrt.

*Der analytischen Geometrie abgesehen* Standlinien der Funkpeilung sind Großkreise, Kreise auf der Erdoberfläche, deren Mittelpunkt mit dem Erdmittelpunkt zusammenfällt. Bei geringen Entfernungen (bis etwa 30 Seemeilen) kann man sie als Gerade mit dem Lineal in die Mercatorkarte einzeichnen. Bei größerem Abstand Sender-Empfänger muß der Unterschied zwischen Loxodrome und Großkreis berücksichtigt werden (dieser schneidet Meridiane unter verschiedenen, jene unter gleichen Winkeln). Das erfordert Rechen- und Tabellenarbeit.

Standlinien der Hyperbelverfahren, denen wir uns jetzt zuwenden, sind Hyperbeln. Sie sind als Netz verschiedenfarbig bereits in Karten eingedruckt. Der Navigator braucht lediglich festzustellen, auf oder zwischen welchen Hyperbeln er sich befindet.

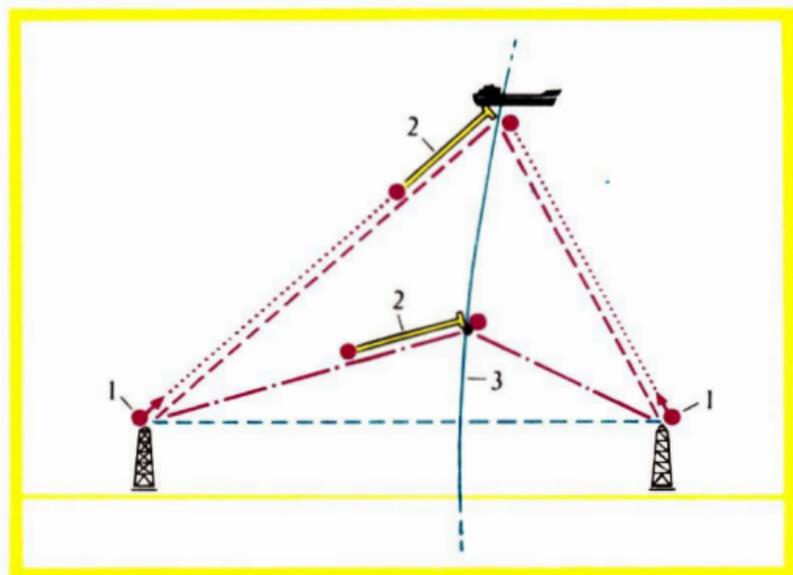
Die *Hyperbelnavigation*, deren zwei wichtigste Varianten wir im folgenden näher kennenlernen wollen, erfüllt vor allem zwei von See- und Luftfahrt immer wieder erhobene

Forderungen: Dem Navigator müssen Hilfsmittel an die Hand gegeben werden, die bei rascher und einfacher Auswertbarkeit auch über große Entfernungen (1 000 km und darüber) hinreichend genaues Navigieren ermöglichen, daneben solche, die die höheren Genauigkeitsanforderungen für Fahrten in Küsten- und Hafennähe oder für Flüge über dem Festland erfüllen.

Warum aber Hyperbeln als Standlinien? Die Erklärung folgt aus dem allen Hyperbelverfahren gemeinsamen Grundprinzip:

Denken wir uns einen Empfänger, der von zwei Sendern gleiche, gleichzeitig ausgestrahlte Funksignale aufnimmt. Die Signale erreichen (bis auf den Sonderfall gleicher Entfernung zwischen Empfänger und beiden Sendern) den Empfänger zeitlich nacheinander. Die Zeitdifferenz ist den Entfernungsunterschieden der Strecken vom Empfänger zu den Sendern proportional. Alle Punkte (Standorte)

*Grundgedanke der Hyperbelnavigation: Die von zwei Sendern gleichzeitig ausgehenden Signale erreichen einen Empfänger normalerweise nicht gleichzeitig. Punkte gleicher Signalverzögerung liegen auf einer Hyperbel, die eine Standlinie darstellt. 1 – Signal; 2 – Signalverzögerung; 3 – Standlinie (Hyperbel)*



gleicher Zeitdifferenz liegen auf einer Hyperbel, deren Brennpunkte die beiden Sender sind. Warum das so ist, erfahren wir aus der analytischen Geometrie. Nach ihr ist die Hyperbel »geometrischer Ort aller Punkte, deren Entfernungsdifferenz von zwei gegebenen Punkten, den Brennpunkten der Hyperbel, konstant ist«.

Mißt man umgekehrt am Empfangsort die für die Signale zweier Sender auftretende Zeitdifferenz, läßt sich die zugehörige Hyperbel als Standlinie ermitteln. Dazu sind in Seekarten *Hyperbelscharen* eingedruckt. Jede einzelne Hyperbel ist einer bestimmten Zeit- und damit Entfernungsdifferenz zugeordnet; in den gemeinsamen Brennpunkten aller Hyperbeln einer Schar stehen die Sender. Mit einem zweiten Senderpaar ist eine weitere Hyperbelschar zu gewinnen. Am Schnittpunkt der den gemessenen Zeitdifferenzen entsprechenden Hyperbeln befindet sich das navigierende Objekt. Standorte zwischen eingedruckten Hyperbeln werden interpoliert, d. h. an einem Speziallineal abgelesen.

Die Verfahren der Hyperbelnavigation unterscheiden sich, abgesehen von benutzten Frequenzen, Sendeleistungen usw., vor allem in den ausgestrahlten Signalen. Man kann Impulse senden und die Zeitdifferenz ihres Eintreffens beim Empfänger messen oder stetig ausgestrahlte Wellen anwenden, deren Phasenunterschiede (vgl. Bild auf S. 69) Ortungswerte liefern. Jede dieser Möglichkeiten ist Grundlage eines weltweit verbreiteten Verfahrens der Hyperbelnavigation.

*Loran-Navigation mit Impulsen* Bereits der Name, Abkürzung für »*Long Range Navigation*«, charakterisiert die Zielsetzung. Wir haben es mit einem »Navigation(sverfahren) großer Reichweite« zu tun. Technische Grundlagen des Loran-Systems waren in den dreißiger Jahren unter maßgeblicher Beteiligung sowjetischer Wissenschaftler ausgearbeitet worden. Die Realisierung wurde im zweiten Weltkrieg vor allem von den USA für den Seekrieg im Pazifik und Atlantik und für Bombenangriffe über große Distanzen vorangetrieben. Die US-Rüstungsindustrie konnte bis Kriegsende auf ihren Konten den Ertrag für 75 000 Loranempfänger und für mehrere Millionen Spe-

zialkarten verbuchen. Erst nach 1946, als diese Einnahmequelle spärlicher floß, wurde Loran für die Handelschiffahrt und den zivilen Luftverkehr freigegeben.

Als erste der beiden heute verbreiteten Varianten wurde das *Standardloran*, Loran A, eingeführt. Es benutzt vier international festgelegte Frequenzen (1750, 1850, 1900 und 1950 kHz) im Grenzwellenbereich zwischen den Mittelwellen der Rundfunkstationen und den Kurzwellen.

Für eine Hyperbelschar sind zwei Sender nötig. Beide arbeiten auf gleicher Frequenz und liegen zwischen 300 km und 800 km voneinander entfernt; die Sendeleistungen erreichen 1 MW.

Der Hauptsender strahlt kurze Impulse konstanter Folgefrequenz, d. h. mit gleichbleibendem Abstand zwischen den Impulsen, aus. Sie bilden für die Empfänger eine der zur Hyperbelentstehung nötigen Impulsfolgen. Zum anderen steuern sie den Nebensender, dessen Impulse mit exakt gleicher Impulsfolgefrequenz gesendet werden müssen. Jeder Hauptsenderimpuls löst einen Nebensenderimpuls aus.

Abweichend von unserer vereinfachenden Beschreibung auf S. 62 werden beide Impulse nicht gleichzeitig, sondern mit festem Zeitunterschied ausgestrahlt. Das ändert nichts am Arbeitsprinzip, bringt aber wichtige Vorteile mit sich, vor allem den der Eindeutigkeit der Standlinienbestimmung. Weil nur *Zeitdifferenzen* festgestellt werden, nicht aber, von welchem Sender das zuerst eintreffende Signal stammt, tritt zunächst jede Differenz zweimal auf: auf der Standlinie des Beobachters und auf einem spiegelbildlich zu dieser liegenden Hyperbelast. Durch entsprechend gewählte Verzögerung jedoch läßt sich erreichen, daß jeder gemessenen Zeitdifferenz nur *eine* Standlinie zugeordnet ist. Auch die eigentliche Auswertung durch den Navigator wird durch die Verzögerung erleichtert (s. u.).

Loranketten unterscheiden sich außer durch die Sendekanäle durch die Impulsfolgefrequenzen. Vierundzwanzig verschiedene Impulsfolgefrequenzen stehen zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der vier Sendefrequenzen sind 96 unterscheidbare Betriebskanäle möglich.

Ein Kunstgriff verbilligt Ausbau und Betrieb der Anlagen. Zur Ortung sind zwei Hyperbelscharen nötig. Man verzichtet jedoch auf zwei getrennte Senderpaare und begnügt sich statt dessen mit *einem* Hauptsender, der zwei (oder auch mehr) Nebensender steuert. Damit die Paare bei der Ortung unterschieden werden können, wird der Hauptsender gleichzeitig mit zwei Impulsreihen unterschiedlicher Folgefrequenz getastet. Jeweils eine steuert einen der beiden Nebensender und wird von diesem wieder ausgestrahlt.

Im Loranempfänger wird durch Tastendruck lediglich das durch Zahlen und Buchstaben gekennzeichnete Senderpaar eingestellt. Beide sind Karten und Tabellen zu entnehmen.

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe des Bildschirms einer Elektronenstrahlröhre. Auf ihm werden untereinander zwei waagerechte Leuchtlinien geschrieben. Sie zeigen empfangene Impulse als strichförmige senkrechte Auslenkungen. Auf der oberen Linie wird stets der Hauptsenderimpuls registriert, auf der unteren der des zugehörigen Nebensenders. Diese Zuordnung ist die Folge einer entsprechend gewählten Ablenkfrequenz (»Schreibgeschwindigkeit«) für den Elektronenstrahl und der Zeitverschiebung zwischen Haupt- und Nebensenderimpulsen. Stimmt die Impulsfolgefrequenz der Sender mit der am Empfänger eingestellten überein, erscheinen die Auslenkungen immer wieder an den gleichen Stellen der Leuchtlinien, werden immer wieder »überschrieben« und können leicht beobachtet werden.

Die seitliche Versetzung der unteren gegenüber der oberen Auslenkung ist ein Maß für den Laufzeitunterschied zwischen Sendern und Empfänger. Man könnte ihn durch aufgelegte Skalen oder durch Einblenden von Zeitmarken feststellen, wählt jedoch einen genaueren und subjektiven Fehlern weniger unterworfenen Weg.

Durch Betätigen von Funktionstasten und Einstellknöpfen werden in nacheinander ablaufenden Arbeitsschritten Haupt- und Nebensenderimpulse untereinander gebracht, vergrößert (d. h. glockenförmig auseinandergezogen) dargestellt und dann in *einer* Zeile möglichst genau zur Deckung gebracht. An beim Einstellen mit-

laufenden Zahlenscheiben oder -trommeln ist die Zeitdifferenz ablesbar. Mit diesem Resultat kann die Standlinie in der Karte oder an Hand eines Tafelwerkes aufgesucht werden. Wiederholung mit der Impulsfolgefrequenz des zweiten Nebensenders liefert eine zweite Standlinie.

Reichweite und Genauigkeit hängen außer von den technischen Geräteparametern und vom örtlichen Störungshintergrund weitgehend vom Ausbreitungsverhalten der Funkwellen ab.

Tagsüber wird mit der Bodenwelle gemessen, mit jenem Teil der Senderstrahlung, der sich längs der Erdoberfläche fortpflanzt. Reichweiten bis nahe 1800 km bei einem Meßfehler von 3 km bis 5 km sind möglich.

Nachts ist vor allem die Raumwelle zu empfangen, jener Teil der Senderstrahlung, der die Erdoberfläche verläßt und nach Reflexion in der Ionosphäre zur Erde zurückkehrt. Mit der Raumwelle sind noch in über 2500 km von den Sendern Ortungen zu erhalten, allerdings verdoppelt bis verdreifacht sich dabei der Meßfehler, so daß nach Möglichkeit auch in der Nacht die Bodenwelle genutzt wird.

Das Identifizieren der Impulse bereitet nicht selten Schwierigkeiten. Der Loranempfänger muß aus hier nicht zu erörternden Gründen einen verhältnismäßig breiten Frequenzkanal aufnehmen. Fremdsignale und atmosphärische Störungen lenken den Elektronenstrahl ebenfalls vertikal aus; die Leuchtlinien ähneln, besonders an den Reichweitengrenzen, mit ihren zahlreichen kleineren und größeren Auslenkungen fast einem quer durchgeschnittenen Rasenstück. Nur kräftig einfallende Loranimpulse sind gegenüber Störungen eindeutig zu erkennen (man kann dann auch die Empfindlichkeit des Empfängers drosseln, bis der Störungshintergrund verschwindet).

Gelangt der gleiche Impuls als Bodenwelle und außerdem über die Ionosphäre zum Empfänger, trifft er wegen des Wegunterschieds kurz nacheinander zweimal ein. Das kann zu Fehlinterpretationen und damit zu Standortfehlern führen. Besonders während der Dämmerung tritt diese Fehlerquelle in Erscheinung.

Das seit einigen Jahren eingeführte System *Loran C* (Loran B diente ausschließlich militärischen Zwecken)

reduziert die Mängel des Standard-Loran und macht die Empfänger automatisierbar.

Im Gegensatz zu Loran A ist Loran C im Langwellenbereich angesiedelt. Das hat zwei wichtige Vorteile:

- Das Ausbreitungsverhalten von Boden- und Raumwelle ist in diesem Frequenzbereich stabiler als in anderen.
- Die für eine Ortung nutzbaren Reichweiten nehmen zu, mit der Bodenwelle über See auf etwa 2 200 km, über Land auf 1 800 km. Mit Raumwellen können nachts Entfernungen bis zu 4 500 km überbrückt werden.

Zu einer Loran-C-Kette gehören der Hauptsender und zwei bis vier Nebensender. Ihr Abstand ist größer als bei Loran A (1 000 km bis 1 800 km). Sämtliche Loran-C-Sender benutzen die gleiche Trägerfrequenz von 100 kHz. Um die Ketten unterscheiden zu können, benutzt jede Kette eine andere Impulsfolgefrequenz. Die Nebensender-Signale sind gegenüber denen des Hauptsenders wiederum um bestimmte Beträge verzögert.

Die Empfänger sind bei Handbedienung, wie sie vor allem noch in der Seefahrt verbreitet ist, meistens für Empfang und Auswertung von Loran-A- und Loran-C-Ketten eingerichtet.

Für Zwecke der Luftfahrt, wo für eine lange, auch nur Minuten währende Auswertung keine Zeit bleibt, zunehmend aber auch für Wasserfahrzeuge, werden automatische Empfänger eingesetzt. In ihnen finden Ergebnisse der Impulstechnik, der Mikroelektronik und der elektronischen Datenverarbeitung eine glückliche Synthese.

Bildschirm und von Hand erfolgende »Impulsverschiebung« erübrigen sich. Zwei Standlinien werden bestimmt und gleichzeitig angezeigt. Der Navigator hat lediglich eine Loran-C-Kette zu wählen, in deren Bereich er sich befindet. Schon nach einigen Sekunden zeigen Signallämpchen an, daß Hauptsender und zwei Nebensender empfangen werden und die ersten Meßergebnisse abgelesen werden können. Sie erscheinen zweizeilig als leuchtende Ziffern.

Mehrmals in der Sekunde wird die Messung wiederholt und korrigiert, so daß jederzeit die augenblicklichen Loran-Koordinaten verfügbar sind. Durch Knopfdruck kann der angezeigte Wert, z. B. bis zur Auswertung in der

Karte, festgehalten werden. Der Meßvorgang wird dadurch nicht unterbrochen. Löscht man den gespeicherten Wert, erscheinen sofort wieder die neuesten Loran-Koordinaten.

Hilfsschaltungen erleichtern die Bedienung der Geräte. So sind Filter zum Ausschleifen störender Signale vorgesehen, Störungen in einer Loran-C-Kette oder unsicherer Empfang an der Reichweitengrenze werden durch flackernde Lämpchen angezeigt. Der Navigator kann von automatischem auf Handbetrieb umschalten, eine eingebaute Testschaltung ermöglicht jederzeit und ohne äußere Hilfsmittel eine Funktionsprüfung des Empfängers, der aus einsteckbaren und daher leicht auswechselbaren Bausteinen besteht.

Loran-C- und Loran-A-Ketten arbeiten im Nordatlantik, im Pazifik, in Südostasien, im Mittelmeerraum und an der nordamerikanischen Ost- und Westküste. Weitere Anlagen, insbesondere Loran-C-Ketten, sind geplant, könnten aber durch andere Entwicklungen überflüssig werden. Loran C hat sich bewährt. Die Entwicklung wurde unter hohen Kosten vor allem von US-Firmen vorangetrieben.

Das muß bedenklich stimmen, um so mehr, wenn man auf dem Globus die zuerst bedeckten Loran-C-Bereiche umfährt. Sie liegen nämlich in den für die »westliche Welt« strategisch besonders »interessanten« Gebieten. Weiß man ferner, daß Langwellen – wie die bei Loran C benutzten – bis zu einer gewissen Tiefe von Unterwasserfahrzeugen empfangen werden können, erfuhr man von den in vielen Staaten (z. B. Norwegen) heiß diskutierten amerikanischen Erpressungsversuchen, den Loran-C-Stationen das »System Pilgrim« zur Leitung von Unterwasser-Raketenträgern zuzuschalten, ist die ursprüngliche Motivation der raschen Entwicklung verständlich – ebenso aber die Enttäuschung des Pentagon darüber, daß in den meisten Ländern Loran-C-Stationen nur unter staatlicher Kontrolle und ohne das Pilgrim-System eingerichtet und betrieben werden dürfen.

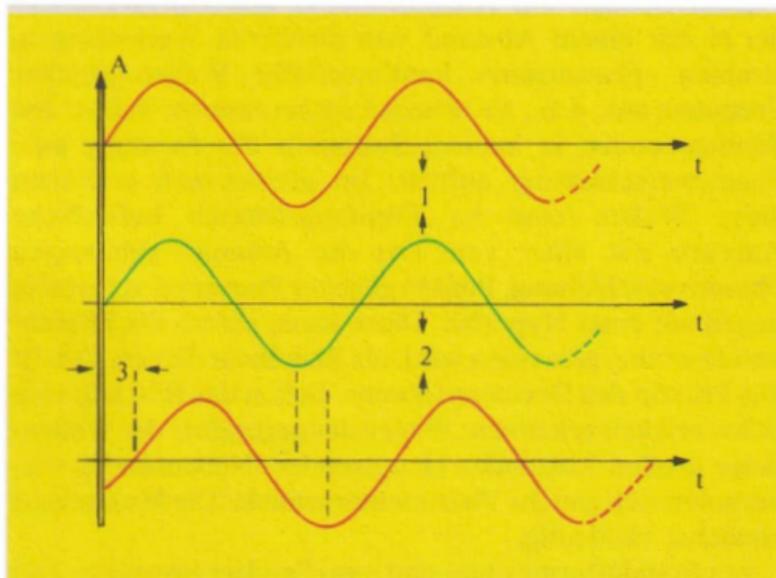
*Decca-Navigation mit Wellenzügen* Über 20 000 Seeschiffe und Tausende Flugzeuge navigieren heute nach dem *Deccaverfahren*. Mitarbeiter der britischen »The

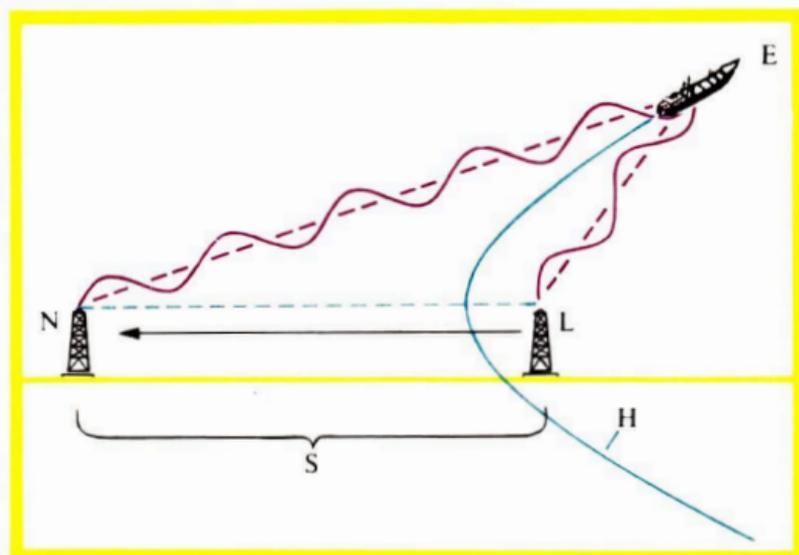
Decca Navigator Company Ltd.« haben zu seiner Entwicklung besonders beigetragen. Die Firma produziert, installiert, wartet und vermietet die Land- und Bordausrüstungen, was ihren Aktionären nicht schlecht zu Buche schlägt.

Patente auf Grundlagen dieses Funknavigationssystems wurden schon um 1930 beantragt. Aufgenommen und vorangetrieben wurde seine technische Entwicklung erst während des zweiten Weltkrieges. Bei der Landung der westlichen Alliierten in Nordfrankreich wurde es erstmals in großem Umfange eingesetzt. Seit 1946 trägt es dazu bei, den Verkehr für friedliche Zwecke zur See und in der Luft sicherer zu gestalten.

Das Deccaverfahren ist gleichfalls ein Hyperbelnavigationssystem. Im Gegensatz zu Loran wurde es speziell für Ortungen hoher Genauigkeit über kurze und mittlere Entfernungen (einige Hunderte Kilometer) ausgelegt. Es arbeitet im Langwellenbereich; Grundlage für das Entstehen von Standlinien-Hyperbeln sind nicht Impulse, sondern kontinuierlich ausgestrahlte Wellen.

*Phasenverschiebung zweier Wellenzüge, Grundlage des Deccaverfahrens. A – Amplitude; t – Zeit; 1 – gleichphasig; 2 – verschiedenphasig; 3 – Phasenverschiebung*





Punkte gleicher Phasenverschiebung liegen auf einer Hyperbel. L – Leitsender, steuert Nebensender; N – Nebensender; S – gleichphasige Sendung; H – Standlinie (Hyperbel gleichen Phasenunterschieds); E – ungleichphasiger Empfang

Ausgangsbasis der Messung beim Deccaverfahren ist die Phasenverschiebung zweier Wellenzüge. Was es damit auf sich hat, zeigt die Skizze besser als viele Worte.

Zwei Sender, ein Hauptsender H und ein Nebensender N mit einem Abstand von mehreren Wellenlängen, strahlen »phasenstarr« kontinuierliche Wellen gleicher Frequenz aus, d. h., sie arbeiten so zusammen, daß an den Sendeantennen in keinem Zeitpunkt der Sendung eine Phasenverschiebung auftritt. Im allgemeinen erreichen diese Wellen eine im Empfangsbereich befindliche Antenne mit einer vom Ort der Antenne abhängigen Phasenverschiebung. Punkte gleicher Phasenverschiebung liegen auf einer Hyperbel. Diese kann, sofern die Phasenverschiebung gemessen wird, als Standlinie dienen. Das ist das Prinzip des Deccaverfahrens. Schon das Bild läßt eine Schwierigkeit erkennen: Wegen des gegenüber der Wellenlänge großen Abstandes Hauptsender–Nebensender wiederholen sich gleiche Phasenunterschiede. Die Messung ist zunächst vieldeutig.

Zur Standortermittlung sind zwei Senderpaare nötig. Um

in jedem Fall günstige Schnittwinkel für die Hyperbeln zu erhalten, arbeitet man beim Deccaverfahren meistens mit drei Senderpaaren und geht wie bei Loran vor: Ein Leitsender steuert drei Nebensender. Sie sind in Abständen von 100 km bis 200 km um den Leitsender angeordnet. An die für den Eindruck der Hyperbelscharen in Seekarten benutzten Farben anknüpfend, spricht man von den Nebensendern Grün, Rot und Violett (oder Purpur).

Die technische Realisierung des Deccaverfahrens wird entscheidend durch einen Umstand beeinflusst, der bei der Impulstastung des Loran-Systems nicht auftritt: Kein Funkempfänger kann ohne weiteres Wellen unterscheiden, die seine Antenne mit gleicher Frequenz, aber unterschiedlicher Phase erreichen. Arbeiteten die Sender einer *Deccakette*, wie wir zur Erklärung des Vorganges annehmen, tatsächlich auf gleicher Frequenz, wären Phasenvergleich und damit Standlinienmessung unmöglich.

Jeder Sender einer Deccakette muß deshalb eine andere Frequenz benutzen, jeder Empfänger in der Lage sein, vier Frequenzen gleichzeitig und unabhängig voneinander aufzunehmen.

Damit ist jedoch erst ein Teil des Problems gelöst; denn Phasenunterschiede können naturgemäß nur an Wellen gleicher Frequenz gemessen werden. So bleibt nichts übrig, als die von den Eingangsteilen für Hauptsender und jeweils einen Nebensender abgegebenen hochfrequenten Wechselspannungen unterschiedlicher Frequenz in Spannungen gleicher Frequenz umzuwandeln und dann deren Phasenverschiebungen zu messen. Diese werden als Hyperbeln aufgesucht, die für die *gemeinsame* Frequenz berechnet und in die Karten eingedruckt wurden.

Frequenzumwandlungen kommen zwar in der Elektronik häufig vor, unter anderem in jedem Rundfunkempfänger; doch würde sich bei Decca-Empfängern, die zahlreiche Ketten mit jeweils vier Frequenzen empfangen sollen, ein ökonomisch nicht vertretbarer Aufwand ergeben. Decca als Systemlösung, die Sender- und Empfängerseite einbezieht und berücksichtigt, daß man – aus welchen Gründen immer – dem Anwender, dem Kunden, preiswerte Geräte anbieten muß, bedient sich einer für Wohl und Wehe des Systems geradezu entscheidenden,

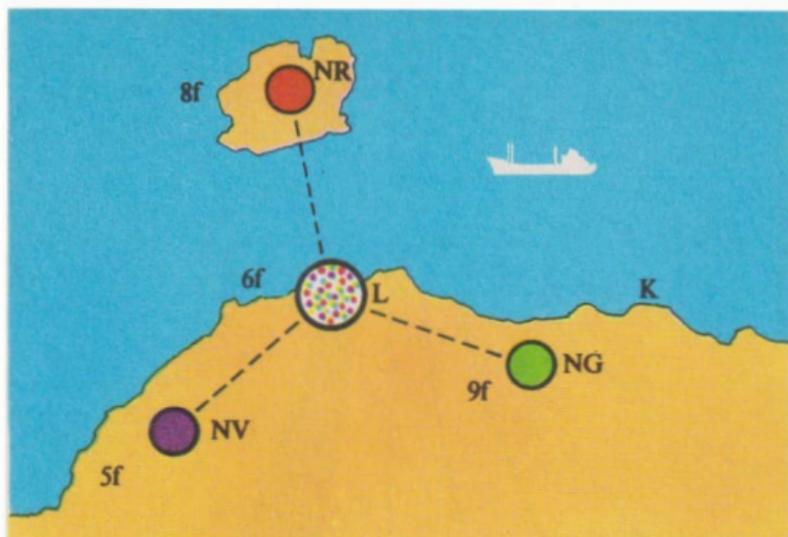
eleganten Lösung: Sämtliche von den Stationen einer Deccakette gesendeten Signale sind ganzzahlige Vielfache *einer* hochkonstanten Ausgangsfrequenz  $f$ . Sie liegt um 14 kHz, ist von Kette zu Kette jedoch verschieden, wird aber selbst nicht ausgestrahlt.

Ganzzahlige Frequenzvervielfachung ist verhältnismäßig einfach, die Stabilität der Ausgangsfrequenz bleibt beim Vervielfachen erhalten. Daher sind nur für die jeweilige 14-kHz-Grundfrequenz umfangreiche Stabilisierungsmaßnahmen notwendig. An allen anderen Stellen, vor allem auf der Empfängerseite, sinkt der Aufwand erheblich.

In den Empfängern genügen einfache Schaltungen, um jeweils zwei Sendefrequenzen auf *eine* Vergleichsfrequenz umzusetzen. Betrachten wir beispielsweise den Hauptsender und den Nebensender Grün mit den Frequenzen  $6f$  und  $9f$ . Beide werden von getrennten Eingangsstufen der Empfänger aufgenommen. Durch Vervielfacher werden diese Frequenzen verdreifacht bzw. verdoppelt, an den Vervielfacherausgängen können Vergleichsspannungen der Frequenz  $18f$  abgenommen werden. In Phasendiskriminatoren (diese Baustufe ist auch Bestandteil vieler UKW-Rundfunkempfänger) werden die Phasenverschiebungen gemessen und in eine Steuerspannung umgesetzt. Sie speist ein *Decometer*, ein Instrument, das Phasenverschiebungen als Zeigerstellung oder als Zahl in einem Fensterchen anzeigt. Für die anderen Haupt- und Nebensenderpaare verfährt man sinngemäß. Wir finden also drei Decometer, rot, grün und violett (purpur).

Die Phasenunterschiede wiederholen sich. So entstehen zahlreiche *Streifen*. Sie sind von Hyperbeln der Phasenunterschiede  $0^\circ$  bzw.  $360^\circ$  (sogenannte Nullhyperbeln) begrenzt; in jedem Streifen treten Phasenunterschiede von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  auf. Die Anzahl der Streifen hängt vom Abstand Haupt-/Nebensender ab und wächst mit der Frequenz. Auf der Verbindungslinie Haupt-/Nebensender sind sie eine halbe Wellenlänge breit, wobei die Wellenlänge der im Empfänger gewonnenen Vergleichsfrequenz zugrunde gelegt werden muß.

Durch die große Streifenzahl wird zwar hohe Meßgenauigkeit erreicht, doch ist eine Standlinie zunächst nur



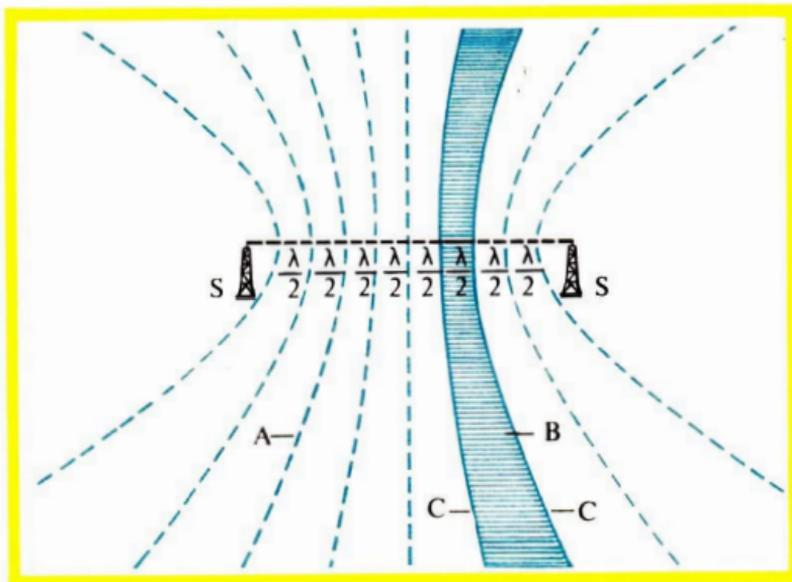
Frequenzplan von Leit- und Nebensendern beim Deccaverfahren.  
 L – Leitsender; NR – Nebensender Rot; NG – Nebensender Grün;  
 NV – Nebensender Violett; K – Küstenlinie

innerhalb eines Streifens feststellbar, nicht aber der Streifen, in dem sie liegt.

Die *Feinortung* innerhalb der Streifen muß durch eine *Grobortung* ergänzt werden, durch die der Navigator erfährt, in welchem Streifen er sich (mindestens bei Inbetriebnahme des Gerätes) befindet. Dazu überlagert man den Feinortungs-Hyperbeln ein Hyperbelnetz größerer Streifenbreite. Die Abstände zwischen seinen Hyperbeln, den *Zonen*, verbreitern sich im Verhältnis der jeweils im Empfänger benutzten Vergleichsfrequenz zur Grundfrequenz  $f$ . Weil die Vergleichsfrequenzen  $18f$  bzw.  $24f$  bzw.  $30f$  betragen, umfaßt jede Zone 18 bzw. 24 bzw. 30 Streifen; und jeder ist am zugehörigen Decometer bis auf 1% oder 2% der Streifenbreite ablesbar.

Die Zonen sind durch Buchstaben, die Streifen innerhalb jeder Zone durch Zahlen gekennzeichnet. Um Verwechslungen auszuschließen, sind die Streifen je nach Nebensender unterschiedlich beziffert: im roten Hyperbelfeld von 0 bis 23, von 30 bis 47 im grünen und schließlich im violetten von 50 bis 79.

Zur Grobortung werden die Nebensender in jeder Minute dreimal für 0,5 s umgesteuert. Während dieser Zeit-



*Innerhalb eines Streifens treten Phasenunterschiede zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  auf (Feinortung). Die Bestimmung des jeweiligen Streifens ist Aufgabe der Grobortung. S – Sender; A – Grobortung; B – Feinortung; C – Nullhyperbel*

spanne setzt die Feinortung aus, der Hauptsender arbeitet jeweils nur mit einem Nebensender zusammen, wobei zusätzliche Grobortungsfrequenzen ausgestrahlt werden. Beim nächsten Grobortungsintervall arbeitet ein anderer Nebensender mit dem Hauptsender zusammen, die übrigen Nebensender pausieren.

Auf der Frontplatte des Decca-Empfängers geben drei Zeiger die Feinortungswerte an. Bewegt sich das Fahrzeug von einer Nullhyperbel bis zur nächsten, vollführt der zugehörige Zeiger eine volle Umdrehung. In Fensterchen über den Kreisskalen erscheinen Zonenbuchstabe und Streifennummer. Diese wird außerdem im Rhythmus der Grobortungssignale für die einzelnen Senderpaare mit weithin lesbaren Ziffern in einem weiteren Fenster angezeigt.

Am Empfänger können sämtliche für Deccaketten vorgesehenen Kanäle (insgesamt 63) gewählt werden; komplizierte Einstelloperationen entfallen.

Zusatzgeräte erhöhen den Bedienkomfort. Es gibt Tochteranzeigergeräte für die Decometerwerte; sie können, vom

Empfänger abgesetzt, z. B. beim Notruder aufgestellt werden. Nützlich ist ein an den Decca-Empfänger angeschlossener *Wegschreiber*. Er setzt die Steuersignale für die Decometer in Bewegungen eines Schreibstifts und den Vorschub von Registrierpapier um und zeichnet so den Weg des Fahrzeugs auf.

In der Luftfahrt hat ein entsprechendes Gerät als *Flugwegschreiber* Verbreitung gefunden. Der Grund liegt auf der Hand: Die Auswertung von drei sich rasch ändernden

*Auf der Brücke...*



Decometeranzeigen (Geschwindigkeit!) wäre nicht einfach, müßte außerdem bei vorgegebenem Flugweg häufig wiederholt werden. Diese Arbeit nimmt der Flugweschreiber der Cockpitbesatzung ab. Er überträgt den Weg auf Spezialkarten, die aus einem Speicher abgerufen werden können, und ermöglicht es der Besatzung, jederzeit Standort und Entfernung zum Start- und Zielort abzulesen.

In der Schifffahrt sind Wegschreiber vor allem eine Hilfe, wenn ein vorbestimmter Kurs genau einzuhalten ist (z. B. im Fährbetrieb) oder wenn gefahrene Wege nachträglich analysiert werden sollen. Das gilt für Forschungs- und Vermessungsarbeiten, für Bohrungen im Meeresboden, für Kabelleger, für die Tätigkeit von Baggern und nicht zuletzt für die Fischerei, die auf diese Weise »ertragreiche« Kurse nochmals durchlaufen kann.

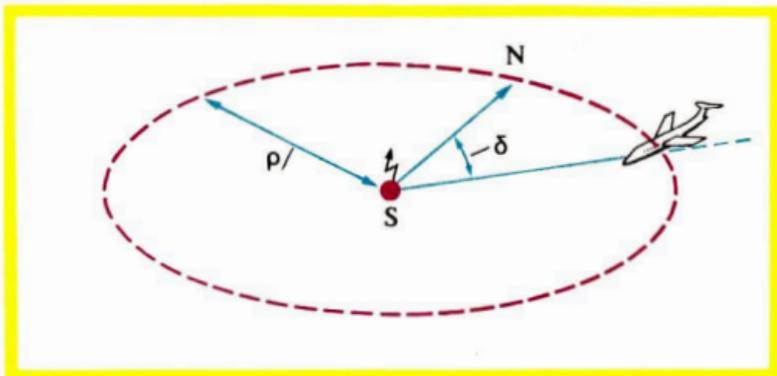
Deccaketten arbeiten heute in den meisten verkehrsdichten Gebieten der Welt. Die Decca Navigator Co. Ltd. nennt 1976 folgende Zahlen für Deccaketten:

22 in Europa	2 in Japan
2 im Persischen Golf	4 in Nordamerika
2 in Indien	5 in Südafrika
2 in Australien	1 in Bangladesh

Wie genau mit dem Deccaverfahren navigiert werden kann, hängt von der Entfernung zwischen den Sendern und dem Empfänger und von den Ausbreitungsbedingungen ab. Nahe der Verbindungslinie Hauptsender–Nebensender, wo die Hyperbeln sehr dicht zusammenrücken, erreicht sie einige Meter. An den Reichweitengrenzen sinkt sie bei Tage auf Werte um 1,5 km, bei Nacht auf Werte bis 7,5 km.

*Standlinien: Gerade und Kreis* Bisher erhielten wir Standorte aus Standlinien gleicher Art, aus Geraden bei der Funkpeilung, aus Hyperbeln beim Loran- und Deccaverfahren. Es gibt weitere Möglichkeiten:

Mißt ein Navigator den Winkel  $\vartheta$  (Theta) zwischen Nord und der Richtung zu einem Sender, außerdem den Abstand  $\rho$  (Rho) vom Sender, erhält er gleichfalls den Standort, und zwar diesmal als Schnittpunkt einer Geraden



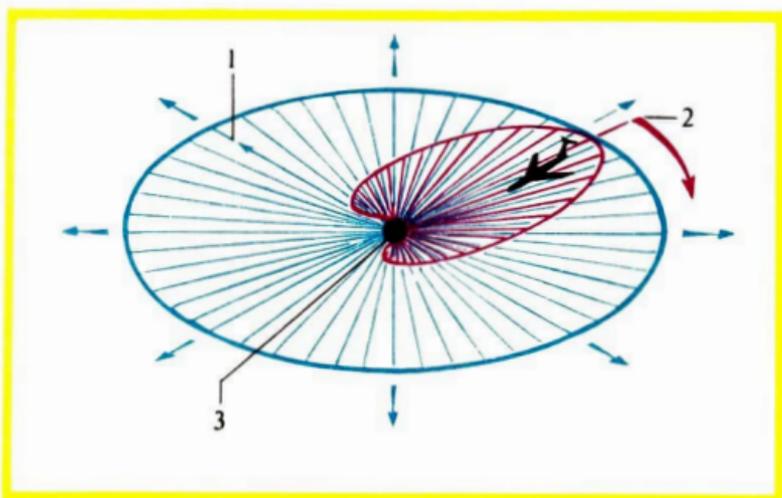
Standortbestimmung durch Winkel-Entfernungsmessung, Grundlage des Rho-Theta-Verfahrens. S – Sender; N – Norden

(Schenkel des gemessenen Winkels) und eines Kreises (geometrischer Ort aller Punkte gleicher Distanz vom Sender).

Navigationsverfahren dieser Art nennt man *Rho-Theta-Navigation*. Sie wurden vor allem für die Luftfahrt auf kurzen und mittleren Strecken wichtig.

Bereits die Azimutbestimmung (Winkel  $\vartheta$ ) ist eine wertvolle Hilfe. Sie wird mit dem *UKW-Drehfunkfeuer* (abgekürzt *VOR*, von englisch Very High Frequency Om-

Prinzip des *VOR*-Drehfunkfeuers. 1 – Bezugssignal; 2 – Strahlung der rotierenden Antenne; 3 – Sender



nidirectional Range, etwa »UKW-Ortung aus allen Richtungen«) verwirklicht.

Der Grundgedanke des UKW-Drehfunkfeuers – es arbeitet im Frequenzbereich um 100 MHz – ist: Die Phasenlagen eines richtungsabhängigen und eines richtungsunabhängigen Signals gleicher Frequenz werden verglichen und gemessen.

Der Sender speist zwei Antennen. Die eine strahlt gleichmäßig nach allen Richtungen und liefert das mit einer Frequenz von 30 Hz modulierte Bezugssignal. Es tritt an allen Empfängern, die sich in gleicher Entfernung vom Sender befinden, mit gleicher Phase auf.

Die zweite Antenne, z. B. ein (jedem UKW-Rundfunkhörer bekannter) Faltdipol mit ausgeprägter zweiseitiger Richtwirkung, rotiert mit 30 U/s um eine vertikale Achse. Die umlaufende Antenne ruft im Zusammenwirken mit der ungerichtet strahlenden in jedem Empfänger eine in ihrer Intensität schwankende, also mit der Frequenz von 30 Hz amplitudenmodulierte Spannung hervor.

Wann ihre Maxima, Minima usw. an der Empfangsantenne auftreten, hängt von der Richtung zum Sender ab: Antennenrotation im Uhrzeigersinn angenommen, registriert ein Empfänger ostwärts vom Sender das Spannungsmaximum eine kurze Zeitspanne vor einem Empfänger im Süden, dieser wiederum eher als ein Empfänger im Westen usw. Aus der Phasenverschiebung zwischen richtungsabhängigem Signal (Azimutsignal) und Bezugssignal kann das Azimut bestimmt werden.

Dabei taucht eine ähnliche Schwierigkeit auf wie beim Deccaverfahren: Der Empfänger könnte beide Signale nicht ohne weiteres unterscheiden. Deshalb wird der ungerichteten Strahlung das Bezugssignal nicht unmittelbar, sondern »versteckt« aufgeprägt: Der ungerichtete Strahlungsanteil wird zunächst mit der sehr viel höheren Frequenz von etwa 10 kHz moduliert. Diese wiederum wird im 30-Hz-Rhythmus geringfügig verändert, frequenzmoduliert.

Das vom Sender ungerichtet ausgestrahlte Frequenzspektrum weist nach den Gesetzen der Modulation rechts und links der Trägerfrequenz zwei Lücken auf. Man nutzt sie für die Morsekennung des Drehfunkfeuers und den

Kanal für die Sprechfunkverbindung Boden–Bord im Bereich des Funkfeuers.

Im Empfänger wird die Frequenz des Drehfunkfeuers durch einen Kanalwähler eingestellt. Das empfangene Signalgemisch wird aufgeteilt. Kennung und Sprechfunk werden wie in jedem Funkempfänger verarbeitet. Durch Filter trennt man die 30-Hz-Frequenz des Azimutsignals und die 10-kHz-Frequenz des Bezugssignals ab. Ist nun aus dem Bezugssignal noch die 30-Hz-Modulation zurückgewonnen, können Bezugs- und Azimutsignal Phasendiskriminatoren (vgl. S. 72) zur Gewinnung der Steuerspannung für die Azimutanzeige zugeführt werden.

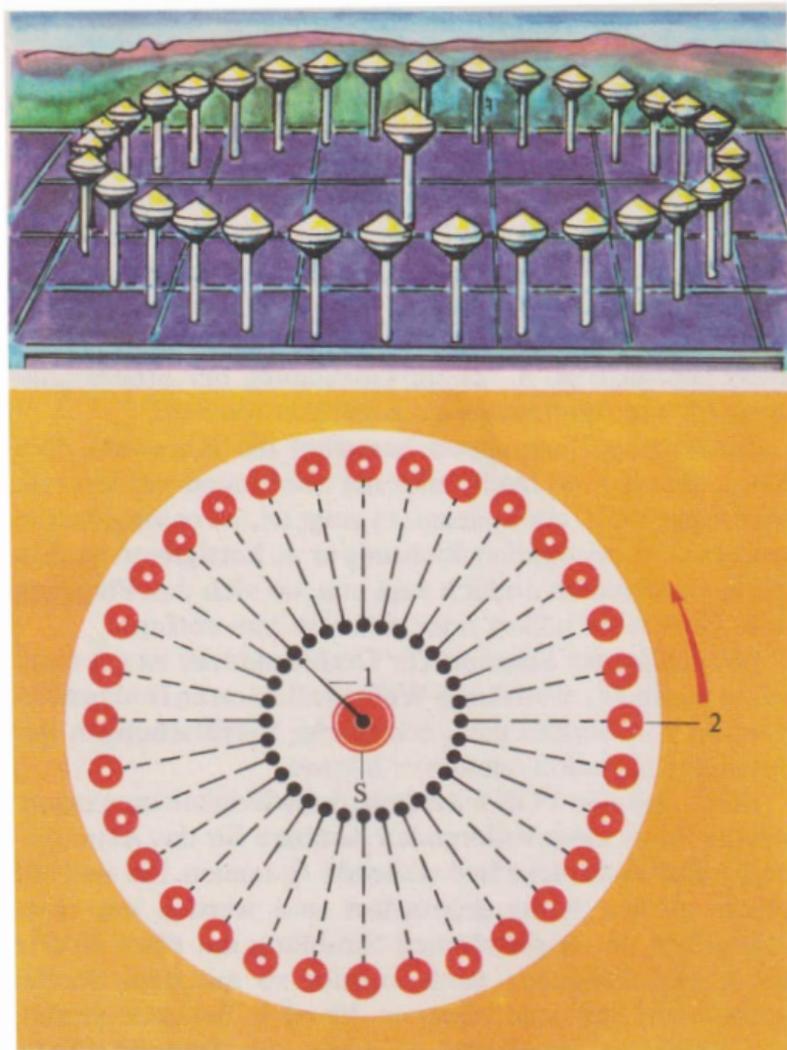
Zusätzliche Baugruppen gestatten die Kurswahl. Der Kurs, mit dem ein Drehfunkfeuer überflogen werden soll, wird eingestellt, ein Instrument zeigt an, ob er eingehalten wird bzw. nach welcher Richtung er zu korrigieren ist. Ein drittes Instrument endlich sagt aus, ob sich das Flugzeug dem Funkfeuer nähert oder sich von ihm entfernt.

Ein geeigneter Standort für Drehfunkfeuer ist oft nicht leicht zu finden, weil durch Wellenreflexion an Bodenerhebungen, Bauwerken usw. erhebliche Verfälschungen der Azimutinformatiön entstehen können.

Beim *Doppler-VOR* wird diese Schwierigkeit umgangen. An die Stelle einer rotierenden Antenne für das Azimutsignal treten zahlreiche fest stehende Antennen. Sie sind auf einem großen Kreis angeordnet und werden mit einer gegenüber der ungerichteten Strahlung um etwa 10 kHz versetzten Frequenz nacheinander so mit dem Sender verbunden, daß jede Antenne 30mal je Sekunde strahlt. Der Effekt ist der gleiche, als wenn *eine* Antenne ständig auf einer Kreisbahn umliefe bzw. um eine vertikale Achse rotierte.

Weil die scheinbar umlaufende Antenne sich dem Empfänger fortwährend nähert bzw. sich von ihm entfernt, tritt infolge des sogenannten *Dopplereffekts* (auf S. 93 lernen wir ihn näher kennen) eine mit 30 Hz frequenzmodulierte, in der Phase richtungsabhängige Spannung am Empfänger auf. Sie bleibt von Reflexen durch örtliche Hindernisse unbeeinflußt.

Mit Flugzeug-Bordempfängern (weit mehr als 100 000 sind gegenwärtig in Betrieb) lassen sich sowohl »normale«



Antennenanordnung beim Doppler-VOR. S – Sender; 1 – elektronischer Umschalter; 2 – kreisförmig angeordnete Einzelantennen

wie auch Doppler-Drehfunkfeuer aufnehmen und nutzen.

Erwähnt sei, daß mit zwei Drehfunkfeuern, in deren Bereich sich ein Flugzeug bewegt, Kreuzpeilungen ausgeführt werden können.

Zur Gewinnung der zweiten, kreisförmigen Standlinie werden wieder Impulslaufzeiten gemessen. Alle Entfernungsmesseinrichtungen (DME genannt von englisch Di-

stance Measuring Equipment) ähneln dem *Sekundärradar* (aktives Radar): Ein Sender strahlt periodisch Impulse aus. Sie werden von einem »Ziel« nicht nur, wie beim *Primärradar* (passives Radar) reflektiert und als Echo empfangen, sondern von einem Sender am Ziel mit Antwortimpulsen erwidert. Aus der Laufzeit Abfrageimpuls–Antwortimpuls ergibt sich die Entfernung.

Dieses im Grunde einfache Prinzip muß den Bedingungen und Forderungen des Luftverkehrs entsprechend präzisiert und ausgebaut werden. So ist z. B. sicherzustellen, daß nur das gewünschte Ziel – und nur dieses allein – antwortet, daß Störimpulse keine Werte vortäuschen können, daß durch gleichzeitige Fragen mehrerer Flugzeuge an *eine* Bodenanlage keine Fehlinterpretationen hervorgerufen werden usf.

Der Abfragesender an Bord, *Interrogator* genannt, sendet jeweils auf einer im Dezimeterwellenbereich liegenden Frequenz, die von Bodenstation (*Transponder*) zu Bodenstation wechselt. Insgesamt stehen dafür 100 Sendekanäle zur Verfügung. Der Transponder antwortet auf einer Frequenz, deren Abstand zur Abfragefrequenz stets gleichbleibt. Damit sind Verwechslungen der Bodenstationen nahezu ausgeschlossen; außerdem vereinfachen sich die Geräte.

Um die Gefahr der Beeinflussung durch Fremdimpulse geringzuhalten, arbeiten Bord- und Bodenstationen mit Doppelimpulsen festen Abstands. Nur auf solche Impulspaare sprechen die Gerätestufen zur Auswertung an. Durch einen weiteren technischen Kunstgriff schließlich wird erreicht, daß eine Bodenstation gleichzeitig von mehreren Flugzeugen abgefragt werden kann.

VOR- und DME-Stationen stehen beisammen. Die Reichweite des Funkfeuers hängt wegen der lichtähnlichen Ausbreitung von Ultrakurz- und Dezimeterwellen weitgehend von der Flughöhe ab. Bei den gegenwärtig üblichen Flughöhen sind Standortbestimmungen bis zu Distanzen von über 300 km durchführbar.

In der Seefahrt wird das VOR-DME-System nicht angewandt. Hauptgrund dafür ist die im wesentlichen auf Horizontabstand begrenzte Reichweite von Meter- und Dezimeterwellen.



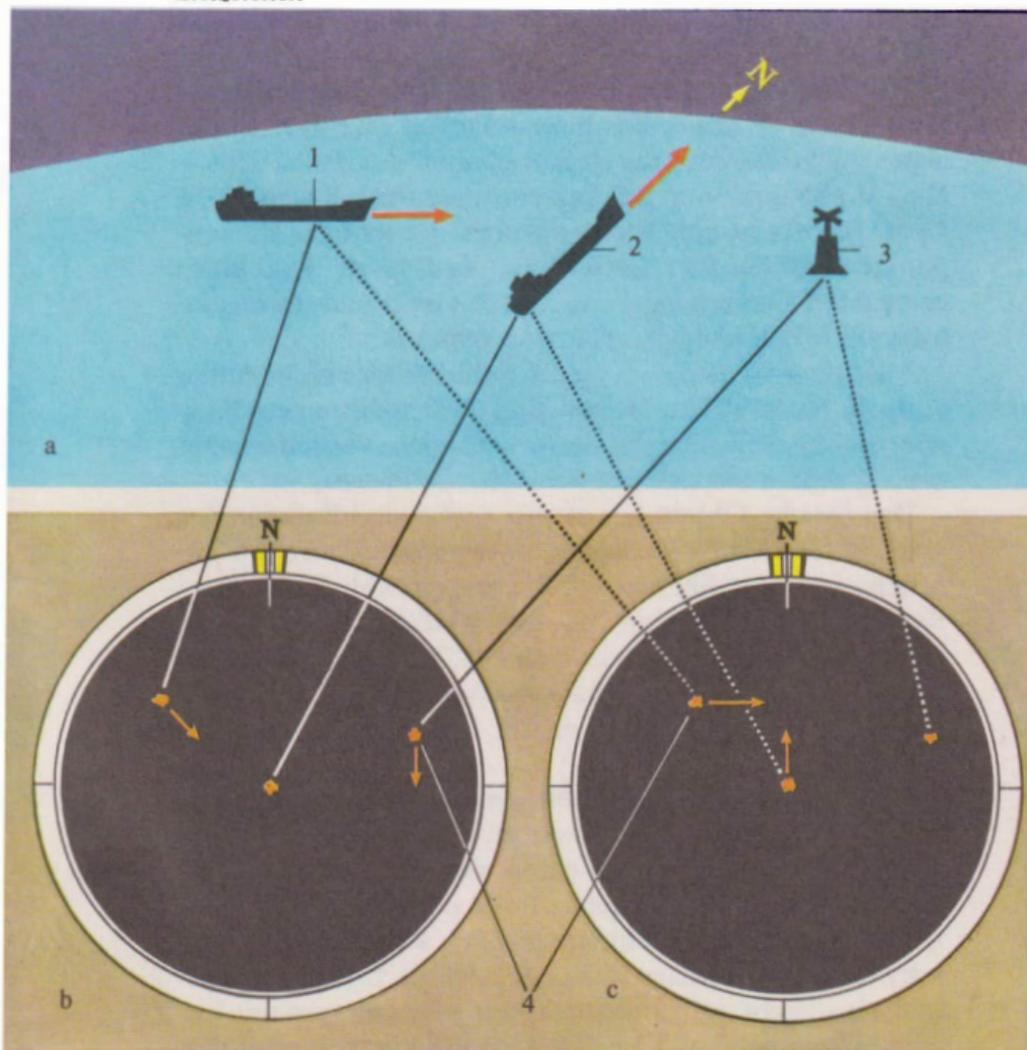
*Ufer- und Binnenlandkonturen auf dem Radarschirm (hier eines speziell für kleine Fahrzeuge entwickelten Gerätes)*

**Radars: Kollisionsschutz und Navigationshilfe** Ziel der Radartechnik für friedliche Zwecke war und ist vor allem der Kollisionsschutz. Die Schiffsführung soll unabhängig von Sichtbedingungen Begegner so frühzeitig erkennen, daß sie ihnen ausweichen kann, der Pilot soll außer anderen Maschinen Gewitterfronten, Sturmwirbel oder Bergketten rechtzeitig ausmachen können. Schon auf den Schirmen der ersten Rundblick-Radargeräte jedoch erschienen nicht nur typische Radarziele wie Schiffe oder Flugzeuge. Auch Uferkonturen, Wasserläufe, Brücken, Gebäudekomplexe zeichneten sich durch ihre Echos ab.

Im zweiten Weltkrieg »nutzte« man diese Entdeckung dazu, Küsten und Uferbefestigungen zu beschießen oder durch die Wolkendecke Wohnviertel und Industrieanlagen zu zerbomben. Erst danach konnte sich die Radartechnik für friedliche Zwecke bewähren. Vor allem in der Seefahrt ist Radar heute nicht mehr nur Kollisionsschutz, sondern wertvolle Navigationshilfe in Küstennähe, engem Fahrwasser oder bei Ansteuerung eines Hafens.

Man greift dabei auf die für den Kollisionsschutz vorgesehenen technischen Hilfsmittel und Bedienungs-erleichterungen zurück. Dazu zählen die wahlweise Orientierung des Bildes nach Vorausrichtung (d. h. augenblicklicher Fahrtrichtung) oder nach Nord (erleichterte Auswertung an Hand der Karte). Dazu gehört auch die

*Die gleiche Situation, dargestellt in Relativ- und Absolutanzeige. a – tatsächlicher Vorgang; b – Bildschirm bei Relativanzeige; c – Bildschirm bei Absolutanzeige; 1 – Schiff auf Ostkurs; 2 – Schiff auf Nordkurs; 3 – Festziel ( Seezeichen); 4 – Bewegung der Zielzeichen*



wahlweise Einschaltung von Relativanzeige oder Absolutanzeige. Bei jener steht, wie bei optischer Orientierung, der Beobachter stets im »ruhenden« Bildmittelpunkt. Alle – auch feste – Ziele bewegen sich auf dem Bildschirm gegenüber dem Beobachter, was die Auswertung oft erschwert (lediglich Ziele mit gleicher Geschwindigkeit auf Parallelkurs »ruhen«). Diese zeigt das Beobachtungsgebiet sozusagen aus der Vogelschau. Auch das Zeichen des eigenen Schiffs bewegt sich über den Bildschirm (hierzu werden entsprechende Steuersignale von Kreiselkompaß, Log usw., auch von Hand) eingegeben, feste Ziele ruhen; die Auswertung mit Hilfe der Karte wird auf diese Weise erleichtert.

Die Richtung und Entfernung einer sich abzeichnenden Küste kann nicht nur aus ihrer Lage auf dem Bildschirm abgeschätzt werden, durch Einschalten des Peilstrichs – einer drehbaren, vom Schirmzentrum zum Ziel weisenden Leuchtlinie – ist eine Richtungspeilung wichtiger Küstenpunkte möglich. Ihre Entfernung wird durch Wahl eines geeigneten Entfernungsbereichs am Gerät und durch einblendbare Entfernungsmeßkreise ermittelt.

Allerdings ist die Deutung des Schirmbildes nicht immer einfach. Radarwellen breiten sich zwar nahezu geradlinig wie Lichtwellen aus; in ihrem sonstigen Verhalten aber unterscheiden sie sich beträchtlich von diesen.

Das gleiche Objekt hat oft für Licht- und Radarwellen ganz unterschiedliche Reflexionseigenschaften. Ein unscheinbarer Metallbehälter z. B. kann ein weit deutlicheres Radarecho hervorrufen als der weithin sichtbare, gemauerte Fabrikschornstein in der Nähe. Ein Steilhang im Binnenland kann eine Küste vortäuschen, während der flache Strand davor erst später auf dem Radarschirm auftaucht.

Der Reflexionswinkel spielt ebenfalls eine Rolle. Werden die Suchimpulse des Radargerätes genau in ihre Herkunftsrichtung reflektiert, rufen sie sehr deutliche Zielzeichen hervor; bei anderen Reflexionswinkeln erscheinen sie bedeutend schwächer oder können sogar verschwinden. So erklärt sich z. B., daß es trotz sorgsamer Radarbeobachtung zu gefährlichen Begegnungen mit Eisbergen kommen kann, daß Objekte nur kurzzeitig auf dem

Radarschirm erscheinen, daß das Bild eines Küstenverlaufs sich beim Vorbeifahren erheblich verändert usf.

Um diese Schwierigkeiten zu vermindern, werden verschiedene Hilfsmaßnahmen ergriffen.

So gibt es Karten, in denen zusätzlich zu den topographischen auch Radarkonturen eingezeichnet sind, wie sie aus einer bestimmten Richtung erscheinen (wir erkennen daran einen Nachteil dieser Methode). Andere Karten vermerken nur besonders auffällige Radarziele wie Stahlkonstruktionen, Öltanks usw.

Verbreitet sind *Radarreflektoren*, künstliche Radarziele, so konstruiert, daß sie nach allen Richtungen deutliche Echos zurückwerfen. Bei ihrem Aufbau griff man auf Erfahrungen aus der Optik zurück: Für Radarreflektoren benutzt man das Prinzip des Winkelspiegels, eine Anordnung aus aufeinanderstehenden reflektierenden Flächen, die jeden Strahl – unabhängig von seiner Einfallrichtung – zum Ursprungsort reflektiert (im Straßenverkehr wird das Prinzip bei den reflektierenden »Katzenaugen« angewandt).

Die Reflektoren werden an wichtigen Küstenpunkten, an Molenköpfen, Kanaleinfahrten usw. aufgestellt, gehören aber auch zur Ausrüstung von Fahrwassertonnen, Bojen, Rettungsbooten und -flößen.

Zu den aktiven Hilfsmitteln der Radarnavigation zählt die Radarbake *Ramark* (von englisch *Radar Marker*, etwa Radarsignalgeber). Sie strahlt ununterbrochen im Frequenzbereich der Schiffsradargeräte. Im Augenblick, da die kreisende Schiffsradarantenne genau zur Bake weist, wird auf dem Bildschirm ein Strich zwischen Schirmzentrum und Standort der Bake geschrieben. Dieser Strich ist eine Standlinie. Arbeitet eine zweite Bake im Bereich des Radargerätes, ist eine Standortbestimmung möglich.

Auf vielbefahrenen Revieren ist wegen zahlreicher Radarziele und unerwünschter reflektierender Objekte der Einsatz des Schiffsradargerätes mitunter eher verwirrend als helfend. In diesen Fällen hat sich eine Radarberatung von Land aus als zweckmäßiger erwiesen.

Eine oder mehrere leistungsfähige Radarstationen werden an besonders günstigen Stellen errichtet, ihre Schirmbilder in einer Zentrale zusammengefaßt und aus-

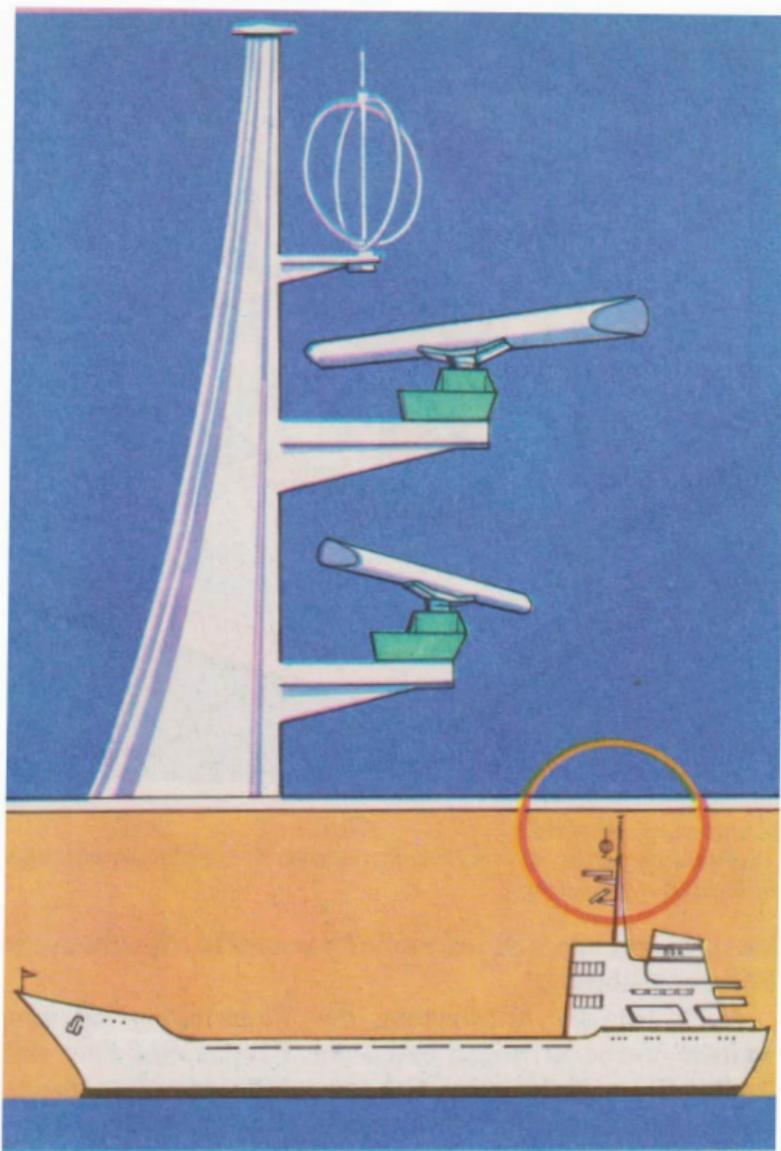
gewertet. Auf diese Weise ist eine bessere Übersicht der Verkehrssituation möglich, als sie das Bordgerät geben könnte. Über Sprechfunk erhält die Schiffsführung Informationen und Hinweise. Vor Häfen mit langer Revierfahrt (z. B. Hamburg, Rotterdam, London) bilden kooperierende Stationen einen geschlossenen *Radarleitweg*.

## Vom Zusammenspiel der Geräte

Zum Navigieren müssen stets mehrere Größen ausgewertet werden. So sind zur astronomischen Standortbestimmung Winkel- und Zeitangaben nötig, bei der Koppelnavigation müssen Kurse, Zeiten und Geschwindigkeiten verarbeitet werden, bei der Orientierung mit Hilfe des Radarschirmbildes muß in vielen Fällen der Kompaß zu Rate gezogen werden, bei der Funknavigation sind Korrekturwerte einzubeziehen, die Eigenarten der Wellenausbreitung berücksichtigen usw.

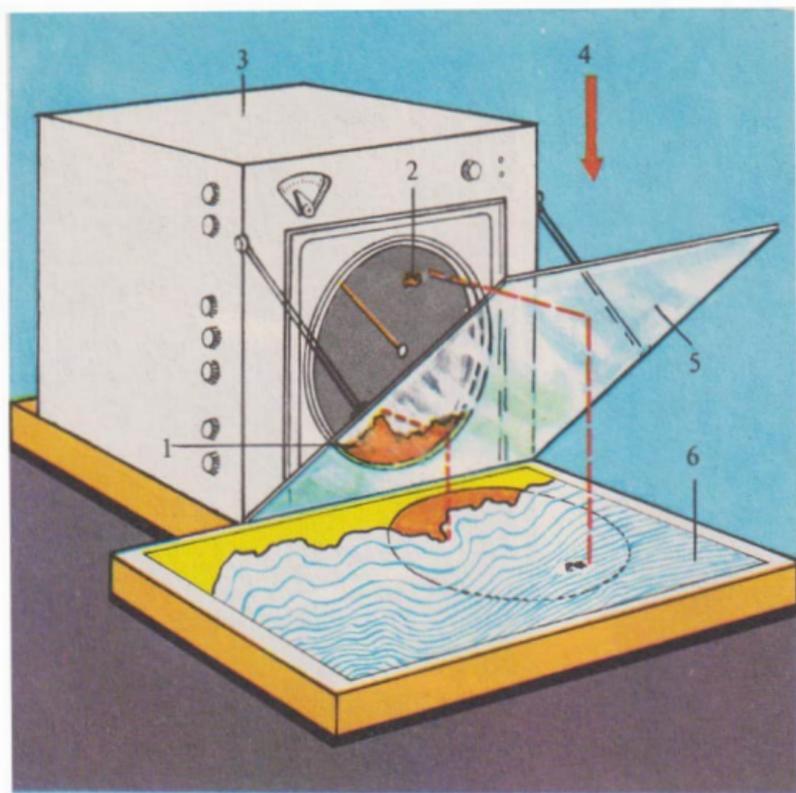
Das Koordinieren der Meßwerte erfordert Rechen- oder Zeichenarbeit und schließt Fehlermöglichkeiten ein. Deshalb lag es nahe, diese Aufgabe gleichfalls Geräten zu übertragen. Dazu müssen sämtliche anfallenden Meßwerte und eventuelle Korrekturdaten in Signale umgewandelt werden, die leicht miteinander verknüpfbar sind, sich auf größere Entfernung übertragen lassen und wieder in andere Größen – z. B. in die Bewegung eines Schreibstiftes – zurückgewandelt werden können. Diese Bedingungen sind nur mit elektrischen Signalen und ihrer elektronischen Verarbeitung zu erfüllen. Daher sind viele Ergebnisse der BMSR-Technik und vor allem der Datenverarbeitung in die Hilfsmittel zur Navigation eingegangen.

Das Log ermittelt Geschwindigkeiten. Multipliziert man sie mit den Zeiten, während der sie gefahren wurden, addiert man daraufhin die Resultate, ergibt sich die zurückgelegte Wegstrecke, und zwar wegen der wechselnden Geschwindigkeit um so genauer, je kleinere Zeitabschnitte gewählt werden. Dieses Summieren über zahlreiche kleine Zeitabschnitte – mathematisch handelt es sich um eine Integration – ist auf relativ einfache Weise elektronisch ausführbar.



Schiffsradarantennen (darüber befinden sich die Kreuzrahmen für Funkpeiler)

Das Log wird damit zur *Fahrtmeßanlage*, die die zurückgelegte Wegstrecke anzeigt oder registriert und – zusätzlich mit einem *Fahrtschreiber* ausgerüstet – auch festhält, wie lange welche Geschwindigkeiten eingehalten wurden. Zusammen mit Kraftstoffverbrauch, Maschinendrehzah-



*Kartenvergleichsgerät. 1 – Küste; 2 – Schiff; 3 – Tochttersichtgerät; 4 – Einblickrichtung; 5 – halbdurchlässiger Spiegel; 6 – Seekarte*

len usw. ergeben sich wertvolle Hinweise für ökonomische Fahrzeugführung.

Auch für die Auswertung des Radarbildes hat man weitere Verbesserungen erdonnen. Bereits eine über den Radarschirm geklappte Scheibe, auf der das durchscheinende Schirmbild zeichnerisch ausgewertet werden kann, ist wertvoll. In *Kartenvergleichsgeräten* wird das Schirmbild so auf die Karte projiziert, daß eine gemeinsame Betrachtung möglich ist. Um einen gleichen Karten- und Schirmbildmaßstab zu erlangen, kann man den Abbildungsmaßstab des Schirmbildes stetig verändern.

Weitere Möglichkeiten bahnen sich vor allem durch die Verbindung von Radar- und elektronischer Rechentechnik an. Schon gibt es »kluge« Radargeräte, die auf Tastendruck die Koordinaten ausgewählter Ziele als Zahlen ausgeben.

Andere wieder »denken in die Zukunft«: Ein in sie integrierter Rechner bestimmt Kurs und Geschwindigkeiten aller aufgefaßten Ziele, signalisiert auf Kollisionskurs befindliche und entwirft aus den gemessenen und gespeicherten Werten nach Bedarf ein Schirmbild, wie es sich in 5, 10, 30 usw. Minuten darstellen würde oder wie es sich nach einer dem Gerät mitgeteilten eigenen Fahrtänderung ergäbe. Es hebt des weiteren (z. B. durch Blinken der Zielzeichen) Objekte heraus, die auf kritischen Abstand nahe gekommen sind.

Wegschreiber erwähnten wir bereits. Sie liefern ein grafisches Protokoll des zurückgelegten Weges oder eines wichtigen Reiseabschnitts und können häufig nicht nur mit verschiedenen Navigationseinrichtungen zusammenwirken, sondern auch andere wichtige Daten festhalten. Auch der *Flugschreiber* ist ein spezialisierter Wegschreiber.

Zur Koppelnavigation werden heute ebenfalls häufig Rechner herangezogen. Ihre Eingabedaten sind die von den verschiedenen Navigationsgeräten gemessenen Werte. Weitere Daten, wie z. B. Sollkurs, Abdrift, Strömungswerte, werden von Hand eingegeben. Der Rechner ermittelt daraus gefahrenen Weg, Standort und notwendige Kurskorrekturen. Außerdem steuert er einen Schreibkopf, der in eine Seekarte auf dem *Koppeltisch* selbsttätig den zurückgelegten Weg einträgt.

Eine Selbstverständlichkeit? Leider nicht immer: Ein Tanker, unter einer der berüchtigten »billigen« Flaggen fahrend, kam 30 Seemeilen vom Kurs ab, lief an der amerikanischen Ostküste auf Grund und verseuchte Hunderte Quadratkilometer durch auslaufendes Öl. Weder Kreisel- noch Magnetkompaß waren in technisch einwandfreiem Zustand, Lorankarten fehlten ... Chartermaschinen westlicher Reiseunternehmen flogen ihre Passagiere aus dem Urlaub in den Tod. Die übermüdete Besatzung hatte Navigationsdaten falsch interpretiert ... Die Aufzählung ließe sich fortführen. Die Verantwortung tragen nicht allein die Kapitäne und Piloten, sondern vor allem jene, die sie um des Profits willen mit mangelhafter Ausrüstung, ungenügenden Kenntnissen und unter Mißachtung menschlicher Leistungsgrenzen auf die Reise schicken.



---

# Navigation für morgen

---

---

## Vielseitiger, selbständiger, weitreichender

Seeschiffe und Flugzeuge auf interkontinentalen Routen sind für die Navigation nach mehreren Verfahren ausgerüstet. Das hat in erster Linie technische Ursachen: Nicht jedes Navigationsverfahren ist für jeden Zweck geeignet. Andere Gründe kommen hinzu: Einige der verbreitetsten Navigationssysteme (z. B. Decca und Loran) wurden vor allem von gegeneinander konkurrierenden Firmen vorangetrieben. Wünsche und Vorschläge der Benutzer, sich statt weiterer Spezialisierung einzelner Verfahren vordringlich der Entwicklung weniger, doch umfassend einsetzbarer und miteinander kompatibler Navigationssysteme zuzuwenden, stießen bei den Produzenten auf wenig Gegenliebe. So wurden auch sozialistische Staaten zu Eigenentwicklungen gezwungen, wenn sie nicht in erpresserische und gefährliche Abhängigkeit geraten wollten.

Gewiß haben sämtliche eingeführten Navigationssysteme einen hohen technischen Stand erreicht. Aber sie müssen ständig verbessert werden, um mit dem zunehmenden Verkehr zu Wasser und in der Luft, der *alle* Weltgegenden erfaßt, in bezug auf Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Einsatzbreite Schritt halten zu können.

Die Welt ist – ein oft strapazierter Ausdruck – kleiner geworden, Luft- und Seeraum werden von Jahr zu Jahr enger, zu eng auch für eine übergroße Zahl nebeneinander arbeitender und einander überschneidender Navigations-

systeme, die zu aufwendigen, umfangreichen Land- und Bordausrüstungen zwingen. Die Tätigkeit des Navigators wird dadurch nicht erleichtert, denn er muß immer wieder von einem System auf ein anderes übergehen, Geräte und Auswertemethoden wechseln und unter Stapeln verschiedenster Spezialkarten wählen.

Vor allem aber werden Bestrebungen, die Navigationsgeräte nicht nur Informationen liefern zu lassen, sondern ihnen die Aufgabe des Steuermanns im weitesten Sinne selbst zu übertragen, durch das Nebeneinander von Systemen unterschiedlicher Prinzipien und Signalformen erheblich behindert.

Gebraucht werden wenige Navigationssysteme, die

- den Erdball lückenlos umspannen,
- mindestens so genau sind wie die derzeit eingeführten Systeme,
- flexibel und zukunftssicher sind,
- für eine Kopplung mit automatischen Steuereinrichtungen erweiterungsfähig sind,
- in großen Serien preisgünstig produziert werden können.

Solche Systeme sind möglich. Ihre Entwicklung und Einführung ist weniger ein technisches Problem, setzt jedoch weitreichende internationale Absprachen und Zusammenarbeit gleichberechtigter Partner voraus. Dem stehen noch die Interessen vor allem von US-Monopolen entgegen.

Daneben gewinnen Methoden der *autonomen Navigation* an Bedeutung. Hierzu ist eine Erklärung nötig: Bis in unser Jahrhundert wurden Standort und Kurs auf hoher See ausschließlich durch bordeigene Mittel, ohne Mitwirkung technischer Anlagen an Land, bestimmt. Ebenso war es in der Luftfahrt, wenn Bodensicht und Landmarken fehlten; die Navigation geschah »autonom«.

Funkwellen vor allem ermöglichten *kooperative Navigationsverfahren*, beruhend auf dem Zusammenspiel von technischen Bord- und Landeinrichtungen. Sie erhöhten Genauigkeit und Sicherheit beim Navigieren entscheidend.

Überflüssig wurde autonome Navigation trotzdem nicht. Die klassischen Methoden werden nach wie vor angewandt, neue autonome Verfahren wurden und werden

entwickelt. Das ist wohlbegründet: Über dem ewigen Eis der Arktis und Antarktis fehlt das unsichtbare Netz der Loran- und Deccahyperbeln – nicht nur, weil Errichtung und Wartung der Stationen sehr schwierig wären, sondern auch deshalb, weil sich in höchsten Breiten nicht nur Magnet- und Kreiselkompaß, sondern auch Funkwellen in ihrer Ausbreitung recht kapriziös und oft nicht verlässlich genug verhalten.

Im südlichen Pazifik bleiben, ebenso wie im Südatlantik, Loran- und Deccameteranzeigen in Ruhestellung, weil es keine festen Standorte für ihre Bodenstationen gäbe.

Andererseits aber liegen diese Gebiete verkehrsmäßig nicht mehr am Rande der Welt. Vor allem kürzeste Flugverbindungen zwischen Weltzentren berühren sie.

Überall dort ist der Navigator auf sich gestellt. Ihm zu helfen, sein Schiff oder Flugzeug sicher und pünktlich ans Ziel zu bringen, ist – solange es kein weltweites und allen Ansprüchen genügendes kooperatives Navigationssystem gibt – Aufgabe der autonomen Navigation.

## Der Dopplernavigator ist autonom

Schon in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde von dem österreichischen Physiker Christian Doppler (1803 bis 1853) eine Erscheinung entdeckt und untersucht, die – als Spezialfall – jeder kennt: Das Geräusch eines schnell an uns vorbeifahrenden Fahrzeugs ändert seine Tonhöhe von höheren zu tieferen Frequenzen.

Der Dopplereffekt besagt, allgemein gefaßt: Ändert sich der Abstand zwischen einer Wellenquelle, gleich, ob Schall-, Licht- oder Funksender, und einem Beobachter, stellt dieser eine Frequenzänderung der empfangenen Wellen fest. Bei Abstandsverringering erhöht sich ihre Frequenz, bei Abstandsvergrößerung sinkt sie.

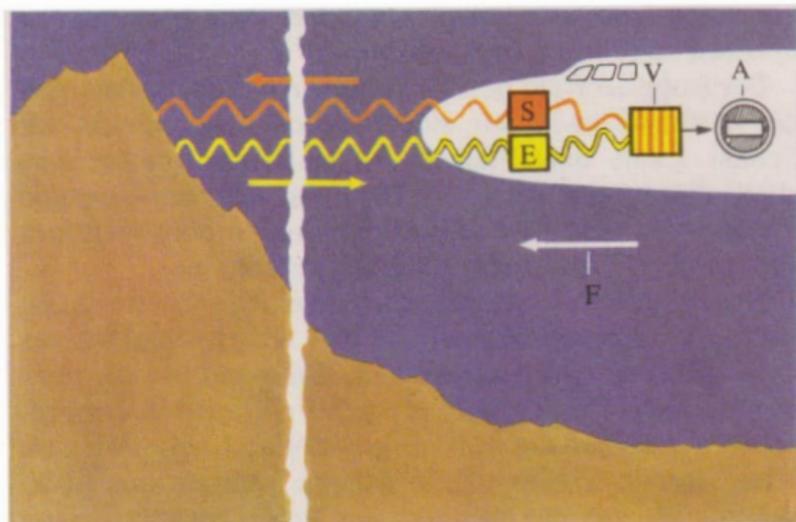
Wie die Frequenzänderungen zustande kommen, ist leicht zu veranschaulichen: Laufen wir gleichmäßig ans Ufer spülenden Wellen entgegen, zählen wir in z. B. einer Minute mehr Wellenzüge, als wenn wir stehen; die Frequenz der Wellen hat sich für uns erhöht. Laufen wir zum Ufer zurück, zählen wir je Minute weniger uns überholende Wellen; die Frequenz hat sich verringert.

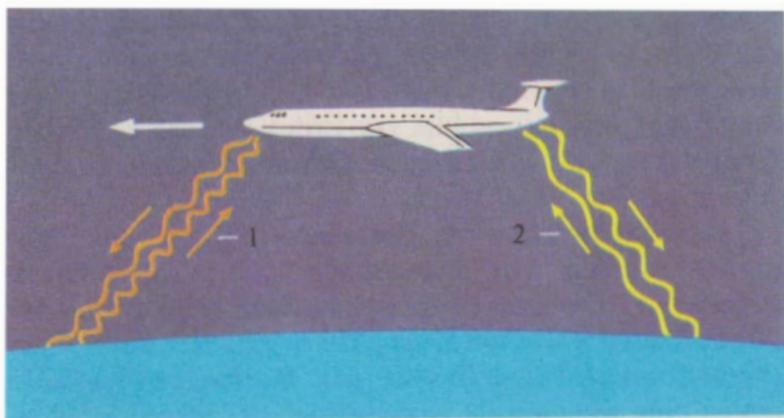
Der Betrag der Frequenzänderung hängt außer von der Sendefrequenz (im weitesten Sinne verstanden) vom Verhältnis der Relativgeschwindigkeit Sender–Empfänger zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen ab und läßt sich durch eine einfache mathematische Formel ausdrücken. Sind Frequenz und Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt, kann daher ein Beobachter seine Relativgeschwindigkeit gegenüber der Wellenquelle aus der gemessenen Frequenzänderung bestimmen. Darauf beruht die Dopplernavigation.

Den Grundvorgang der Doppler-Geschwindigkeitsmessung veranschaulicht das Bild. Ein Bordsender schickt einen Wellenstrahl in Flugrichtung. Er trifft ein Hindernis, wird teilweise reflektiert und von einem Bordempfänger aufgenommen, und zwar mit einer gegenüber der Sendefrequenz veränderten Frequenz. Aus der Differenz zwischen Sende- und Empfangsfrequenz ist die Fluggeschwindigkeit in bezug auf das Hindernis bestimmbar (die umgekehrte Methode – ruhender Sender, bewegtes Ziel – wird z. B. beim Verkehrsradar angewandt).

Der Dopplereffekt tritt dabei zweimal in Erscheinung: Am Hindernis kommen die Wellen des Bordsenders mit

*Doppler-Geschwindigkeitsmessung. S – Bordsender; E – Bordempfänger; V – Vergleich: Sendefrequenz/Empfangsfrequenz; A – Geschwindigkeitsanzeige; F – Flugrichtung*





*Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund nach dem Dopplerverfahren. 1 – erhöhte Frequenz; 2 – erniedrigte Frequenz*

erhöhter Frequenz (Annäherung!) an, und mit dieser erhöhten Frequenz werden sie reflektiert. Der Empfänger (ebenfalls Annäherung!) stellt erneut eine Frequenzänderung fest. An Bord werden Sende- und Empfangsfrequenz elektronisch gemischt; am Ausgang der Mischstufe erscheint die Differenzfrequenz.

Die zweimalige Frequenzerhöhung ist sehr erwünscht. Wegen des großen Unterschiedes zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Funkwellen und Fluggeschwindigkeiten sind die Frequenzänderungen nur relativ gering und wären daher nur schwer genügend genau zu messen (dies gilt noch mehr für die weit geringeren Schiffsgeschwindigkeiten; deshalb hat gegenwärtig die hier dargestellte Art der Dopplernavigation für die Seefahrt keine Bedeutung). Um die Frequenzänderungen noch leichter meßbar zu machen, wendet man die Methode gleichzeitig entgegengesetzt zur Flugrichtung an. Das Ergebnis ist diesmal zweimalige Frequenzerniedrigung. Aus der Verknüpfung beider Frequenzänderungen wird die Relativgeschwindigkeit bestimmt. Aus ihr ergibt sich, wie bei Fahrtmeßanlagen, durch elektronische Integration die zurückgelegte Wegstrecke.

Voraus-Hindernisse sind – zum Glück – selten. Daher werden die Strahlen des Zentimeterwellen-Bordsenders schräg zum Boden vor und hinter dem Luftfahrzeug ge-

richtet. Am Prinzip der Geschwindigkeitsmessung ändert sich dadurch nichts. Allerdings muß der Abstrahlwinkel berücksichtigt werden; denn als Geschwindigkeit über Grund darf nur die parallel zur Erdoberfläche gerichtete Komponente der gemessenen Geschwindigkeit berücksichtigt werden.

Geschwindigkeitswerte, gesteuerter Kurs und Zeitmarken werden zur Darstellung der zurückgelegten Strecke mit Hilfe eines Flugweschreibers ausgewertet. Im Grunde haben wir es mit Koppelnavigation zu tun. Deshalb summieren sich Fehler mit der Zeit. Bei langen Flugstrecken ist eine wiederholte Überprüfung der vom Doppelnavigator ausgegebenen Daten nötig. Sie kann z. B. durch astronomische Methoden erfolgen.

Diesem Mangel der Koppelnavigation setzt der Doppelnavigator einen wichtigen Vorzug gegenüber: Mit seiner Hilfe läßt sich der Abdriftfehler bestimmen und durch Kurskorrekturen kompensieren.

Der vom Piloten gesteuerte und der tatsächlich über Grund geflogene Kurs stimmen nur bei Windstille bzw. bei Rücken- oder Gegenwind überein. Bei allen anderen Windrichtungen wird das Luftfahrzeug seitlich versetzt. Steuerkurs und Kurs über Grund bilden den *Abdriftwinkel*. Er errechnet sich aus Fluggeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, bezogen auf den Steuerkurs.

Windgeschwindigkeit und -richtung werden im allgemeinen meteorologischen Voraussagen entnommen. Daraus ergibt sich bei fehlenden Landmarken oder beim Flug über den Wolken eine Unsicherheit in der Berücksichtigung der Abdrift. Vor allem bei Langstreckenflügen, in deren Verlauf Windrichtung und -geschwindigkeit wechseln, können sich erhebliche Fehler einschleichen.

Der Messung des Abdriftwinkels mit dem Dopplernavigator liegt folgende Überlegung zugrunde: Strahlt man zwei Wellenbündel quer zur Flugzeuglängsachse schräg zum Boden, ändert sich durch den Dopplereffekt die Frequenz der vom Boden reflektierten Wellen auch bei seitlicher Versetzung des Flugzeugs; bei Abdrift nach Steuerbord ist bei der steuerbords reflektierten Welle eine Frequenzzunahme, bei der backbords reflektierten eine Frequenzerniedrigung festzustellen und umgekehrt.

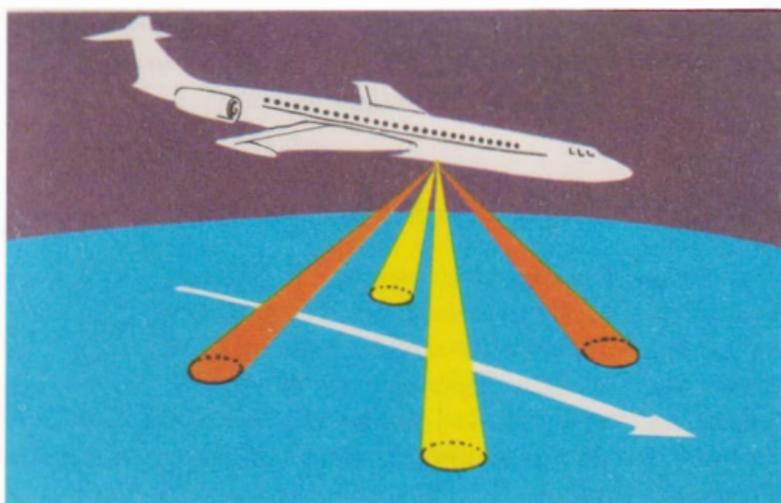
Damit ist das Problem prinzipiell gelöst: Mißt man mit Hilfe des Dopplereffekts einmal die Geschwindigkeit über Grund, zum anderen die Geschwindigkeit der seitlichen Versetzung, kann ein Bordrechner den Abdriftwinkel feststellen.

In der technischen Ausführung speist ein Bordsender vier Richtantennen. Sie sind so angeordnet und werden periodisch so umgeschaltet, daß sie im Wechsel nach Steuerbord vorn und Backbord hinten bzw. Backbord vorn und Steuerbord hinten strahlen. Nur bei fehlender Abdrift sind die empfangenen Frequenzen an den beiden vorderen und an den beiden hinteren Antennen jeweils gleich, sonst treten Frequenzänderungen auf.

Sender, Empfänger und Antennenanlage sind nur ein Teil der Bordeinrichtungen. Ihre Aufgabe ist es lediglich, aus den Frequenzänderungen Signale als Eingangsdaten für den nachgeschalteten Computer zu bilden. Dieser erhält außerdem Kursinformationen vom Kompaß, während ihm von Hand Sollkurs und Entfernung Start-Ziel bzw. die Länge eines mit vorgegebenem Kurs zu fliegenden Streckenabschnitts eingegeben werden.

Der Computer arbeitet nun ein kompliziertes Programm ab: Zunächst ermittelt er die Fluggeschwindigkeit über Grund und den Abdriftwinkel. Beide werden von *einem*

*Antennenstrahlung beim Dopplernavigators*



Instrument, dem *Dopplerindikator*, angezeigt, und zwar dieser analog, jene digital.

Der als *Flugwegrechner* bezeichnete Teil des Computers verknüpft Geschwindigkeits- und Abdriftwerte mit der Zeit und errechnet den Flugweg. Das Resultat sind zwei weitere für die Navigation erwünschte Angaben: Digital werden die noch zurückzulegende Strecke bis zum eingegebenen Ziel sowie bei Abdrift Seite und Entfernung des Abweichens vom Sollkurs angezeigt.

Zur weiteren Vereinfachung der Navigation kann vom Computer auch fortlaufend der Standort nach Länge und Breite ermittelt, angezeigt oder von einem Flugwegschreiber festgehalten werden.

Die manuell einzugebenden Daten für mehrere Streckenabschnitte können sämtlich vor Flugbeginn gespeichert werden. Der Computer schaltet selbsttätig am Ende eines Streckenabschnitts auf die Eingabedaten für den folgenden um.

Für Schiffe ist, wie erwähnt es bereits, diese Art der Dopplernavigation nicht anwendbar. Trotzdem greift auch die Seefahrt auf den Dopplereffekt zurück, wobei allerdings die viel langsameren Schall- bzw. Ultraschallwellen den Ausgang bilden. Das *Dopplerlog*, gewissermaßen eine Kombination aus Echolot und Dopplernavigator, bestimmt mit hoher Genauigkeit Geschwindigkeit und Abdrift eines Wasserfahrzeugs über Grund. Wie es funktioniert, braucht nach den vorausgegangenen Abschnitten nicht mehr erklärt zu werden: Schräg zum Meeresgrund gerichtete Ultraschallstrahlen liefern Signale zur Berechnung der an Bord angezeigten Geschwindigkeitswerte.

## Trägheitskräfte statt Funkwellen

Die Trägheitsnavigation, eine auch im Hinblick auf die Raumfahrt wichtige autonome Navigationsmethode, benötigt keine Funkwellen und ist daher sehr störsicher. Sie greift auf Gesetzmäßigkeiten der Mechanik zurück, die schon vor Jahrhunderten untersucht und formuliert wurden und mit so berühmten Namen wie Galilei und Newton verknüpft sind:

- Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn einwirkt.
- Die Beschleunigung  $a$ , die ein Körper der Masse  $m$  durch eine Kraft  $F$  erfährt, ist dieser proportional, seiner Masse  $m$  umgekehrt proportional.

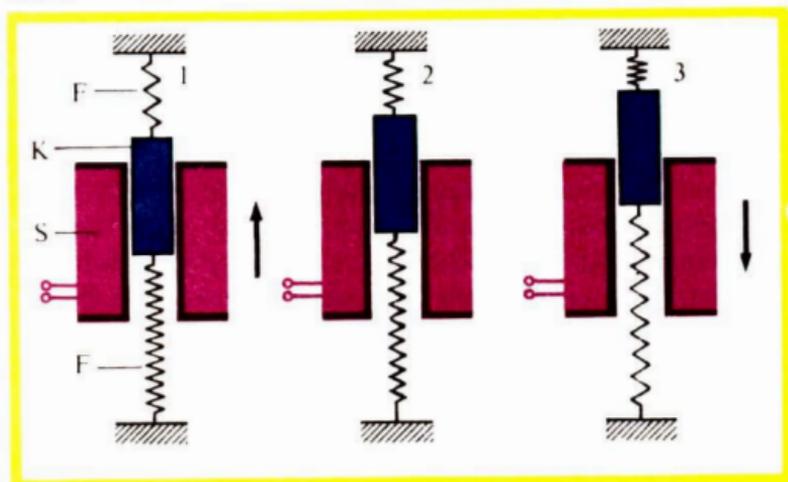
Je nachdem, in welcher Richtung die Kraft wirkt, wird der Körper beschleunigt, gebremst (negative Beschleunigung) oder aus seiner Bahn gelenkt. Die Beschleunigung, die ein Körper bekannter Masse erfährt, läßt sich durch Messen der auf ihn einwirkenden Kräfte bestimmen.

Sind die Beschleunigungen des Körpers während einer Zeitspanne bekannt, ergeben sich durch Integration die Geschwindigkeiten. Wird nochmals über die Zeit integriert, erhält man die im betrachteten Zeitraum zurückgelegte Wegstrecke.

Damit kennen wir den Grundgedanken der Trägheitsnavigation: Der vom Zeitpunkt 0 (Start) nach einer Zeitspanne  $t$  zurückgelegte Weg wird durch fortgesetzte Beschleunigungsmessungen und zweimalige Integrationen nach Entfernung und Richtung ermittelt.

Zur Datengewinnung werden die bei Beschleunigungen auftretenden Trägheitskräfte in elektrische Signale um-

*Beschleunigungsmessung durch beweglichen, ferromagnetischen Spulenkern. F – Feder; K – Kern; S – Spule; 1 – Beschleunigung nach oben; 2 – keine Beschleunigung; 3 – Beschleunigung nach unten*



gewandelt. Das kann auf unterschiedliche Weise geschehen, z. B. so:

Ein leichtbeweglicher ferromagnetischer Kern wird durch Federn in einer Ruhelage gehalten und taucht in eine von Wechselstrom durchflossene Spule. Bei Beschleunigungen in Pfeilrichtung wird die Feder zusammengedrückt oder gedehnt. Entsprechend ändert sich der Wechselstromwiderstand der Spule. Diese Änderungen sind meß- und in Beschleunigungsangaben umsetzbar.

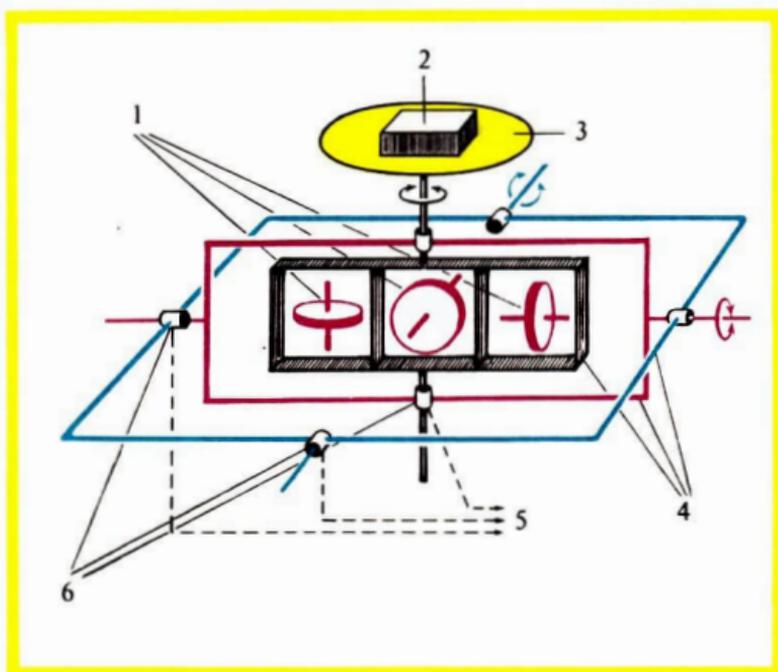
Kein Wasser-, Luft- oder Raumfahrzeug bewegt sich ständig geradeaus. Es treten Beschleunigungen in unterschiedlichsten Richtungen auf. Um sie zu erfassen, werden die Beschleunigungskomponenten parallel zu den Achsen eines beim Start festgelegten und für die gesamte Reise gültigen Koordinatensystems gemessen und zur resultierenden Beschleunigung zusammengesetzt.

Bei Raumfahrzeugen, die sich weit von der Erdoberfläche entfernen, sind drei Koordinatenachsen nötig, bei Bewegungen auf oder nahe der Erdoberfläche genügen zunächst zwei, die Komponente in Nord-Süd- und die Komponente in Ost-West-Richtung, eine jedoch nur scheinbare Vereinfachung.

Das Koordinatensystem darf seine Lage im Raum nicht ändern. Der Beschleunigungsmesser für die Nord-Süd-Komponente muß unabhängig von der jeweiligen Fahrzeugbewegung in Nord-Süd-Richtung bleiben. Entsprechendes gilt für den Beschleunigungsmesser der Ost-West-Komponente.

Diese Richtungskonstanz wird mit einem auch in anderen Bereichen der Technik (z. B. auf Forschungsschiffen, bei Radiosextanten, für Geschützrichtstationen der Seestreitkräfte usw.) zur Lagestabilisierung verwendeten Hilfsmittel erreicht: einer *kreiselstabilisierten Plattform*. Ihre physikalische Grundlage kennen wir vom Kreiselkompaß: Ein Kreisel sucht seine Laufachse beizubehalten und setzt Versuchen, ihre Richtung zu verändern, Widerstand entgegen.

Bei der kreiselstabilisierten Plattform ist jeder Koordinatenachse ein schnellaufender, kardanisch aufgehängter Kreisel zugeordnet. Das so festgelegte Koordinatensystem behält seine Lage im Raum. Erfährt die



*Kreiselstabilisierte Plattform. 1 – Kreisel; 2 – Beschleunigungsmesser; 3 – Plattform; 4 – kardanische Aufhängung des Kreisels; 5 – Signale für Winkeländerungen; 6 – Winkelwertgeber*

mit der Plattform verbundene Kreiselaufhängung eine Richtungsänderung, erzeugen mit den Kreiseln verbundene Geber elektrische Signale. Sie werden zur Steuerung von Servomotoren aufbereitet, mit deren Hilfe die Plattform für die Beschleunigungsmesser sofort wieder in die ursprüngliche Lage nachgestellt wird oder auch andere Geräte gesteuert werden können.

Das Koordinatensystem für Reisen auf oder nahe der Erdoberfläche wird durch die Längen- und Breitengrade gebildet. Eine kreiselstabilisierte Plattform an dieses Koordinatensystem anzuschließen erfordert weitere technische Maßnahmen.

Der Anschluß setzt nämlich voraus, daß die Plattform stets parallel zur Erdoberfläche bleibt, daß, anders ausgedrückt, ihre Mittelsenkrechte stets zum Erdmittelpunkt weist. Die Lagestabilität der kreiselstabilisierten Plattform wirkt sich hier zunächst erschwerend aus: Die Erde ist –

angenähert – eine Kugel, und daher würde sich die raumstabile Plattform bei einer Fahrt gegenüber der Erdoberfläche allmählich neigen. Außerdem dreht sich die Erde, und auch das würde die Plattform kippen (dabei haben wir weitere Einflüsse nicht einmal berücksichtigt).

Man muß daher die Plattform zusätzlich »horizontieren«, d. h., den Servomotoren zusätzliche Steuersignale zur Neigungskorrektur zuführen. Die Korrektursignale werden von Rechenschaltungen bereitgestellt, denen zurückgelegte Strecke, geographische Breite und Flughöhe eingegeben werden. Dabei sind Wegstrecke und Breite aus den von den Beschleunigungsmessern ermittelten Werten abgeleitet. Eine zusätzliche gleichmäßige Drehung der Plattform schließlich gleicht die Erdrotation aus.

Die Werte der Beschleunigungsmesser sind Eingangsdaten des Bordcomputers. Er übernimmt alle weiteren Navigationsaufgaben.

Durch elektrische Integration der Beschleunigungen ergeben sich zunächst die Geschwindigkeitskomponenten der Fahrzeugbewegung. Der Rechner setzt sie beispielsweise zur Geschwindigkeit über Grund zusammen und zeigt diese an.

Nochmalige Integration der Geschwindigkeitswerte liefert die entsprechenden Wegkomponenten. Sie werden auf den Startpunkt oder einen Kontrollpunkt unterwegs bezogen und nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet. So wird z. B. fortlaufend die geographische Länge und Breite errechnet und angezeigt. Der Sollkurs wird mit dem tatsächlich geflogenen verglichen, Abweichungen können festgestellt werden. Abdrift und Entfernung zum Ziel oder vom Start werden angegeben; auch diesmal wieder kann ein Schreiber den zurückgelegten Weg aufzeichnen.

Wie beim Dopplernavigators summieren sich Fehler mit der Zeit. Bei weiten Strecken sind daher von Zeit zu Zeit Standortkontrollen mit Hilfe anderer Navigationsverfahren notwendig.

## OMEGA umspannt den Erdball

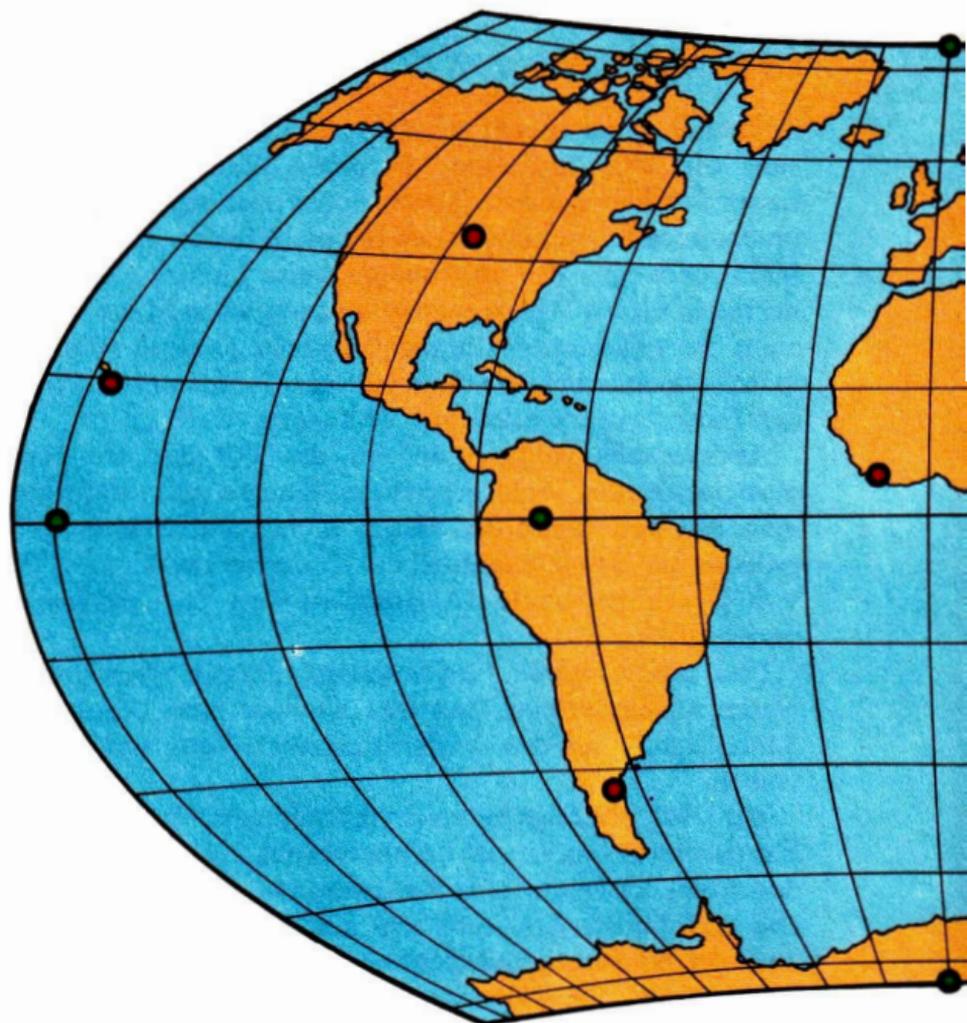
So technisch ausgereift auch Decca- und Loranverfahren sind, die Grundlage eines die ganze Welt lückenlos erfassenden Navigationssystems können sie schon von der unterschiedlichen Zielsetzung her nicht bilden. Außerdem fehlte es wegen des notwendigerweise dichten Stationsnetzes in vielen Weltgegenden an geeigneten Standorten; auch die zahlreichen nötigen Arbeitsfrequenzen stünden in den ohnehin mehr als dicht belegten Frequenzbereichen des Funkverkehrs kaum zur Verfügung.

Andererseits wollte man auf die Vorzüge der Hyperbelnavigation nicht verzichten. Konnte man, so fragte man, die Reichweite der Sender nicht entscheidend vergrößern und damit (eventuell mit Konzessionen an die z. B. von Decca gewohnte Genauigkeit) ihre Zahl drastisch verringern?

Das setzte stabile Empfangsbedingungen über große Entfernungen voraus und war weniger eine Frage der Sendeleistung als des Ausbreitungsverhaltens von Funkwellen.

Die für Nachrichtenfernverbindungen bevorzugten Kurzwellen schieden von vornherein aus. Ihre Ausbreitung durch ein- oder mehrfache Reflexion zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre unterliegt ständig Änderungen, die zwar im Nachrichtenverkehr teilweise kompensiert oder in Kauf genommen werden können, eine genaue Messung von Impulslaufzeiten oder Phasenunterschieden aber nahezu unmöglich machen. Eine Alternative bietet nur der Längstwellenbereich mit Wellenlängen über 10 000 m.

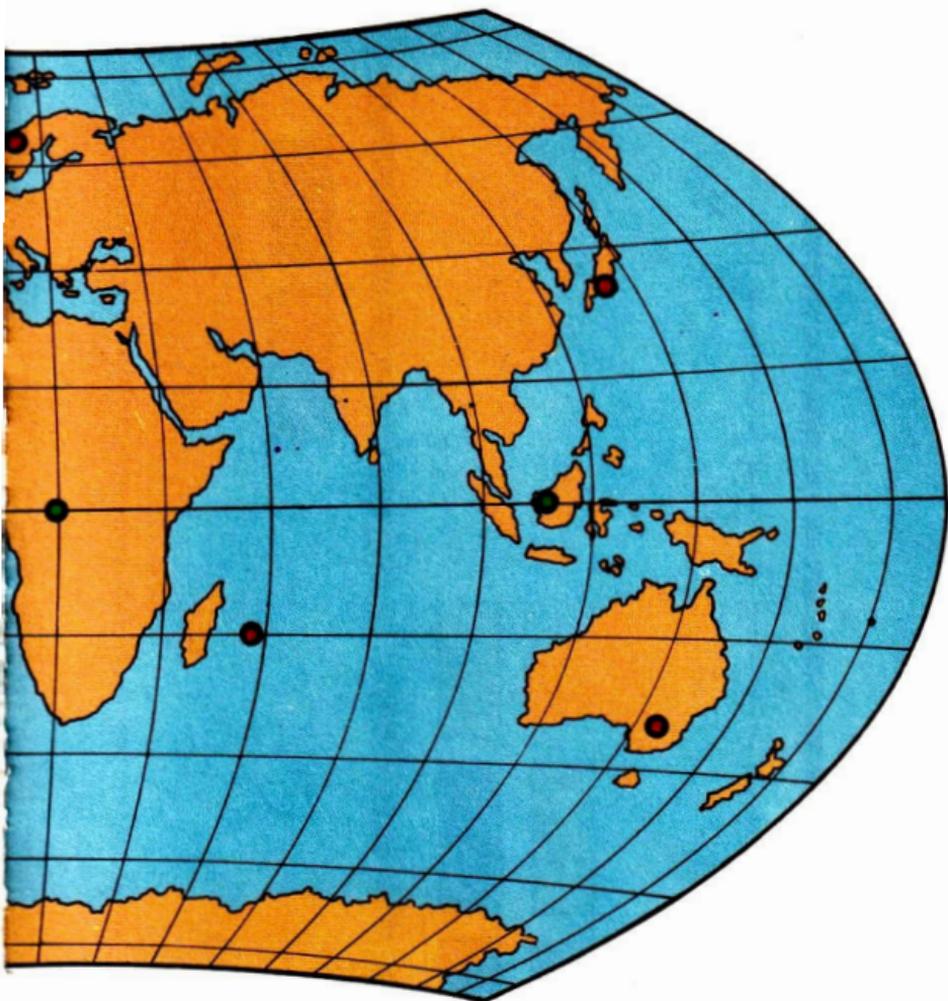
Längstwellen breiten sich zwischen der Erdoberfläche und den unteren Bereichen der Ionosphäre verhältnismäßig stabil aus und folgen der Erdkrümmung über größte Entfernungen (15 000 km und darüber). Da verbleibende Änderungen im Ausbreitungsverhalten im wesentlichen berücksichtigt werden können, sind Längstwellen für Laufzeit- und Phasenmessungen geeignet. Ein weiterer Vorteil – bislang hauptsächlich von militärischer Bedeutung – kommt hinzu: Sie dringen einige zehn Meter tief in Wasser ein und können daher auch von Unterwasserfahrzeugen empfangen werden.



*Ideale (grün) und tatsächliche (rot) Position der Sender beim Omegaverfahren*

Ein für den Längswellenbereich entwickeltes Hyperbelnavigationsverfahren ist das *Omegasystem*. Die Standortbestimmung geschieht wie beim Deccasystem: Durch Phasenmessungen wird der Schnittpunkt von Hyperbeln ermittelt, die verschiedenen Senderpaaren zugeordnet sind. Allerdings werden keine einzelnen Stationsketten benutzt, sondern ein die ganze Welt erfassendes Sendernetz, dessen Stationen gleichberechtigt sind und paarweise vom Navigator ausgewählt werden.

Eine ideale Senderverteilung ergäbe sich, wenn zwei



Stationen an Nord- und Südpol, vier weitere in gleichmäßigen Abständen am Äquator errichtet werden könnten. Da dies nicht möglich ist, entschied man sich für acht Sender. Sie sind mit den Buchstaben A bis H gekennzeichnet und stehen:

A in Norwegen

B in Liberia

C in Hawaii

D in den USA

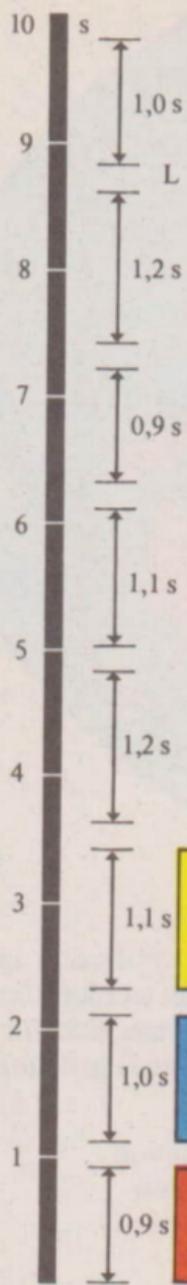
E auf La Réunion

F in Argentinien

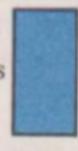
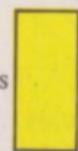
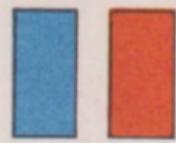
G in Australien

H in Japan

Mit diesen Sendern sind 28 Paarbildungen und damit 28 Hyperbelscharen möglich. Da an allen Punkten der Erdoberfläche mindestens vier Omegastationen zu emp-



A B C



G H

fangen sind, ist überall eine Standortbestimmung durchführbar.

Im Grunde müssen gleiche Aufgaben wie beim Deccaverfahren bewältigt werden: Durch Phasenmessungen sind Standlinien zu gewinnen, durch Grobortung Mehrdeutigkeiten zu beseitigen; schließlich sind die einzelnen Sender zu identifizieren.

In der technischen Realisierung weist das Omegasystem gegenüber dem Deccasystem wichtige Unterschiede auf.

Die Sender arbeiten nach dem dargestellten Schema in einem ständig wiederkehrenden 10-s-Zyklus und strahlen innerhalb jedes Zyklus nacheinander verschiedene Frequenzen aus.

Zur Phasenmessung ist die Grundfrequenz von 10,2 kHz vorgesehen. Aber sie wird – im Gegensatz zu Decca – von den Sendern *nacheinander* ausgestrahlt. Direkter Phasenvergleich ist nicht möglich. Ein Kunstgriff hilft über diese Schwierigkeit hinweg: Eine selbsttätige Meßschaltung setzt die aufgenommenen Signale zunächst nacheinander zu einer im Empfänger erzeugten Vergleichsfrequenz in Beziehung und errechnet daraus die Phasenunterschiede.

Voraussetzung ist auch diesmal, daß alle Sender exakt »phasenstarr« arbeiten – so, als wenn *ein* ständig tätiger Sender nacheinander an acht über die Welt verteilte Antennen angeschlossen würde. Anders ausgedrückt: Ein Beobachter im Mittelpunkt der kugelförmig gedachten Erde hätte den Eindruck, *einen* ständig strahlenden Sender aufzunehmen.

Zur Synchronisierung kann man nicht, wie bei anderen Hyperbelnavigationsverfahren, einen Sender als Hauptsender wählen und durch seine Wellen die Nebensender steuern. Bei den großen Entfernungen zwischen den Sendern würden die Kontrollsignale Laufzeit- und Phasenunterschiede erfahren, die Steuerung wäre nicht exakt genug.

Man muß den Grundsatz der Zwangssynchronisierung

*Ausschnitt aus dem Zeit- und Frequenzplan der Omegastationen A...H. Rot: jeweils 10,2 kHz; Blau: jeweils 13,6 kHz; Gelb: jeweils 11,3 kHz; L – Pausenlänge; s – Sekunden*

(wie bei Decca und Loran) aufgeben und die Sender zunächst voneinander unabhängig arbeiten lassen.

Die Konzeption des Omegasystems stand oder fiel damit, ob trotzdem »Pünktlichkeit« der Sender garantiert werden konnte. Was das bedeutet, ist leicht zu ermessen, wenn man bedenkt, daß ein Zeitfehler von  $1\ \mu\text{s}$  wegen der sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Funkwellen bereits einen Wegfehler von 300 m ergibt. Selbst quarzstabilisierte Oszillatoren und Quarzuhrgenauigkeiten wären hier nicht ausreichend.

„Frequenzbestimmendes »Herz«, von dem alle im Omegasender benötigten Frequenzen abgeleitet werden, ist ein Zäsiumstrahloszillator, wie er in Atomuhren verwendet wird. In vierfacher Ausführung ist er im Sender vertreten, nicht nur, damit man über genügende Reserven verfügt, sondern auch, um die erzeugten Frequenzen sich gegenseitig kontrollieren zu lassen.

Die täglichen Gangabweichungen der Zäsiumstrahloszillatoren liegen zwischen  $0,1\ \mu\text{s}$  und  $1\ \mu\text{s}$ . Das heißt: Erst nach Jahrtausenden ginge eine solche Uhr um 1 s vor oder nach! Außerdem findet mindestens einmal täglich ein Zeitvergleich zwischen den Stationen statt. Das geschieht mit komplizierten Meßverfahren und -programmen, die wir hier übergehen müssen.

Die Frequenzen 13,6 kHz und 11,33 kHz sind für die Grobortung vorgesehen. Sie werden im Empfänger mit der 10,2-kHz-Frequenz gemischt. Ergebnis sind zwei Differenzfrequenzen von 3,4 kHz bzw. 1,13 kHz. Sie erzeugen (vgl. S. 73) Hyperbelnetze größerer Streifenbreite zur Grobortung und sind Voraussetzung für das Einstellen der Omega-Empfänger in allen Fällen, in denen die Ausgangsposition mit Hilfe anderer Methoden nur ungefähr ermittelt wurde.

Die Frequenzen  $f_1$  bis  $f_8$ , deren jede einem Sender zugeteilt ist, dienen der Identifizierung der Omegastation und der gegenseitigen Zeitkontrolle.

Omegasender strahlen mit Leistungen um 10 kW. Sämtliche Senderstufen sind mehrfach vorhanden und springen bei Ausfällen selbsttätig unter gleichzeitiger Alarmzeichengabe sofort ein. Lediglich die bei Längstwellen notwendige umfangreiche Antennenanlage (Masten bis zu

mehreren hundert Metern Höhe!) ist nur einmal vorhanden.

Auch ein Antennen- oder Senderausfall oder das planmäßige Abschalten einer Station zu Wartungsarbeiten haben aber keine gefährlichen Folgen. Wegen der großen Reichweite der übrigen Stationen ist trotzdem stets eine Standortbestimmung möglich.

Wie bei anderen Hyperbelnavigationssystemen arbeitet der am Startpunkt eingestellte Omega-Empfänger während der ganzen Reise selbsttätig und ununterbrochen.

Für die Ergebnisanzeige haben sich verschiedene Methoden eingebürgert. Relativ einfach ist die Anzeige der Phasendifferenzen; jedoch setzt sie wegen der zahlreichen Senderpaare Mitführen und Auswahl umfangreichen Kartenmaterials voraus.

Man geht deshalb immer häufiger dazu über, den Omega-Empfänger mit einem Rechner zu koppeln. Er wandelt die Ausgangssignale des Empfängers sofort in Längen- und Breitenangaben um. Selbstverständlich ist auch wieder der Anschluß eines Kursschreibers vorgesehen. Schließlich kann der Omega-Empfänger Bestandteil eines gemeinsamen Bord-Navigations- und Informationssystems sein, das zugleich Angaben über Kurs und Kursabweichungen, Geschwindigkeit, eventuell Flughöhe und Treibstoffverbrauch sowie andere für Schiffs- oder Flugzeugführung wichtige Angaben verfügbar macht.

Unabhängig davon, ob die Standortermittlung von Hand oder automatisch erfolgt, sind noch Korrekturwerte anzubringen. Die an der Längstwellenausbreitung beteiligte Ionosphärenschicht ist, abhängig vom Sonnenstand, täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Dadurch, aber auch durch die Verteilung von Land-, Wasser- und Eismassen mit ihrer unterschiedlichen Leitfähigkeit, ergeben sich Ausbreitungsänderungen. Sie sind prinzipiell erfaßbar, vorausberechenbar und werden in periodisch erscheinenden Korrekturtabellen veröffentlicht. Bei automatischer Auswertung werden sie dem Rechner vorher eingegeben und sofort in die Standortberechnung einbezogen.

Mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  Seemeile bei Tage und  $\pm 2$  Seemeilen bei Nacht genügt das Omegaverfahren den

meisten Ansprüchen des Fernverkehrs. Fachleute nehmen an, daß es schon in naher Zukunft zumindest die Loran-ketten überflüssig machen wird.

## Satellitennavigation: Funkfeuer in der Umlaufbahn

Astronomische Navigation war und ist unentbehrlich und bleibt wichtiger Bestandteil der Grundausbildung jedes Navigators. Im Wechselspiel zwischen erhöhten Genauigkeitsanforderungen und wachsenden technischen Möglichkeiten wurde sie ständig verbessert.

An einer Tatsache können allerdings die besten optischen Instrumente und die vollständigsten astronomischen Tafeln nichts ändern: Astronomische Navigation setzt geeignete Sichtbedingungen voraus.

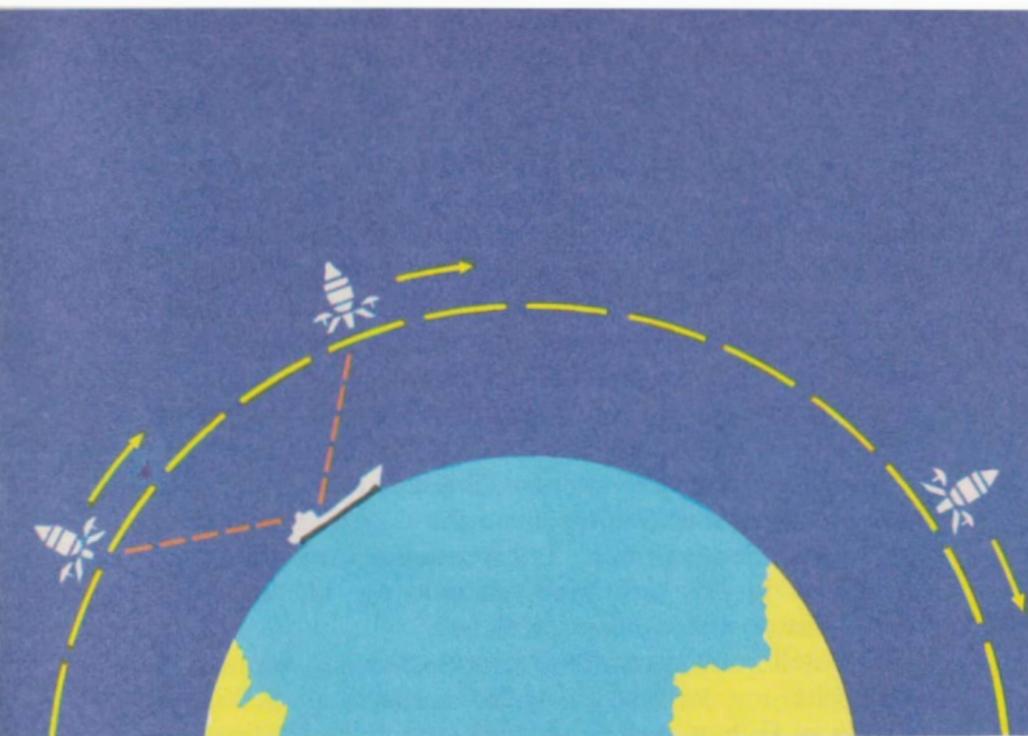
Eine erste Entschärfung dieser Bedingung verdanken wir Radioastronomie, Radar- und Mikrowellentechnik. Ein Radiosextant (vgl. S. 46) kann auch unsichtbare Objekte peilen, sofern sie Radiowellen aussenden. Aber es gibt nur wenige Himmelskörper – vor allem die Sonne –, die bei vertretbarem Aufwand an Bord für eine radioastronomische Peilung geeignet sind. Auch sie müssen selbstverständlich über dem Horizont stehen.

Daher ist verständlich, daß unmittelbar nach Start der ersten Satelliten Überlegungen angestellt wurden, ob und wie sich diese oder spezielle künstliche Himmelskörper zur Navigation nutzen lassen würden.

Schon Sputnik-1, im Oktober 1957 vom Territorium der Sowjetunion auf eine Umlaufbahn gebracht, sendete Ortungssignale, mit deren Hilfe seine Flugbahn vermessen wurde. Tausende Satelliten taten es ihm nach.

Die Umkehrung dieser Methode bildet die Grundlage der Satellitennavigation. Kennt ein Navigator den genauen zeitlich-örtlichen Verlauf der Bahn eines oder mehrerer mit Sendern ausgerüsteter Satelliten, kann er durch Winkel-, Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessungen am Satelliten seinen eigenen Standort feststellen.

Satelliten, die vorwiegend oder ausschließlich für diesen Zweck vorgesehen sind, heißen *Navigationssatelliten*. Ihre



*Kette von Navigationssatelliten*

Bahnen können über die Erdpole, über dem Äquator oder unter einem vorgegebenen Winkel zum Äquator verlaufen.

Zur weltweiten, möglichst ununterbrochenen Navigation sind stets mehrere Satelliten erforderlich. Sie müßten in erdnahen Bahnen z. B. wie Perlen einer Kette so verteilt sein, daß sich stets ein Satellit im Sichtbereich des Beobachters befindet, während ein anderer gerade auf- oder untergeht – ein Verfahren, das zahlreiche Satelliten erfordert. Bei größeren Flughöhen erweitert sich der Horizont des Satelliten, man kommt mit einer geringeren Zahl aus; dafür steigen wegen der Entfernungszunahme die Anforderungen an Empfänger und Sender. Die von der Satellitennavigation beanspruchten Frequenzkanäle liegen sämtlich im Höchsthfrequenzbereich.

Die bisher in Betrieb oder im Probetrieb befindlichen Systeme der Satellitennavigation wurden – vor allem von

den USA – meist für militärische Zwecke entwickelt und sind nur teilweise für die zivile See- und Luftfahrt freigegeben.

*Satellitenpeilung mit dem Radiosextanten* Die meisten Verfahren zur Satellitennavigation haben »irdische« Vorbilder. So liegt es nahe, einen Radiosextanten auf Satelliten zu richten und deren Höhenwinkel und Azimut zu bestimmen. Durch Anpeilen mehrerer Satelliten oder aus aufeinanderfolgenden Messungen an *einem* Satelliten ließe sich die Position des Empfängers ermitteln.

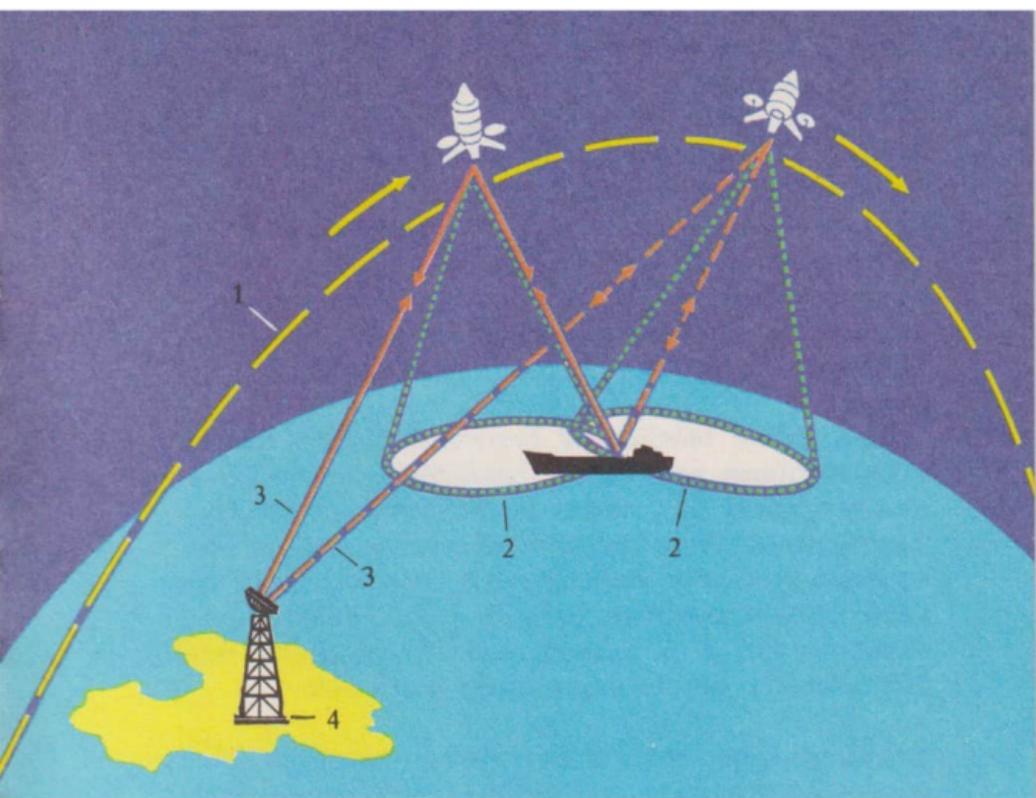
Voraussetzung genauer Winkelmessungen sind sehr straff bündelnde Antennen. Den für Radiosextanten gebräuchlichen Parabolantennen überlegen sind die der Radioastronomie entlehnten, aus zahlreichen Einzelantennen zusammengesetzten Interferometer-Anordnungen. Mit ihnen lassen sich Meßgenauigkeiten bis zu einer Winkelminute und weniger erreichen.

Ein Satellit und ein Meßvorgang reichen aus, wenn man in Erweiterung der Rho-Theta-Navigation (vgl. S. 76) zusätzlich zu Höhen- und Seitenwinkel auch die Entfernung zum Satelliten bestimmt.

Ein Interrogator in den Bordstationen der Schiffe und Flugzeuge sendet Abfrageimpulse, die im Satelliten von einem Transponder empfangen und sofort oder mit bekannter Verzögerung beantwortet werden. Die Entfernungsmessung wird so auf eine Laufzeitmessung Frage–Antwort zurückgeführt; Azimut und Höhenwinkel folgen aus der Antennenstellung. Ein Rechner, dem die genauen Satellitenparameter eingegeben wurden, verarbeitet die erhaltenen Werte zu Längen- und Breitenangaben.

Die *genauen* Satellitenparameter: Hier liegt ein wesentliches Problem der Satellitennavigation. Die Präzision aller ihrer Verfahren hängt davon ab, ob die Bahndaten genauestens bekannt sind bzw. ob die in Tabellen oder Rechnern gespeicherte Bahn auch wirklich eingehalten wird.

Das ist aber nicht der Fall. Stets sind die Satellitenbahnen Schwankungen – verursacht durch Erdabplattung, Unregelmäßigkeiten des Schwerfeldes, atmosphärischen Restwiderstand, Strahlungsdruck der Sonne, sogar Gezeiten usf. – unterworfen, die nicht genau für einen län-



*Satellitennavigation durch Messung von Impulslaufzeiten. 1 – Satellitenbahn; 2 – Standlinien; 3 – Abfrage- und Antwortimpulse; 4 – Bodenstation*

geren Zeitraum vorausberechenbar sind. Sie bleiben zwar geringfügig und können daher bei manchen Anwendungen – etwa bei Nachrichtensatelliten – zunächst über einen längeren Zeitraum unberücksichtigt bleiben, dem dann ein Korrekturmanöver folgt. Nicht so bei Navigationssatelliten. Bereits geringe Bahnfehler hätten, sofern sie unerkannt blieben, Ortungsfehler bei allen mit Hilfe des Satelliten navigierenden Objekten zur Folge.

Erst dann, wenn es einmal Funkfeuer geben wird – mit Höchsthfrequenzsendern ausgestattet und von Sonnen- oder Kernenergiebatterien gespeist –, die, vielleicht einige Tausende Kilometer über der Erdoberfläche, ihre Bahn bzw. Position bei Abweichungen selbsttätig korrigieren und damit stabil halten, wird die Bedeutung des Radio-

sextanten in der Satellitennavigation rasch zunehmen.

Auch alle übrigen Systeme zur Satellitennavigation sind bis dahin auf einen recht komplizierten Umweg angewiesen: Die Bahnparameter der Navigationssatelliten müssen immer wieder von Bodenstationen vermessen werden. Wie die Meßergebnisse verarbeitet werden, hängt vom System ab. Eine Möglichkeit ist, über eine Funkbrücke Bodenmeßstationen—Satellit—Navigator diesem den von den Bodenstationen mit Hilfe des Satelliten festgestellten Standort des Schiffes oder Flugzeugs mitzuteilen — das Verfahren ähnelt damit der auf S. 57 behandelten Fremdpeilung.

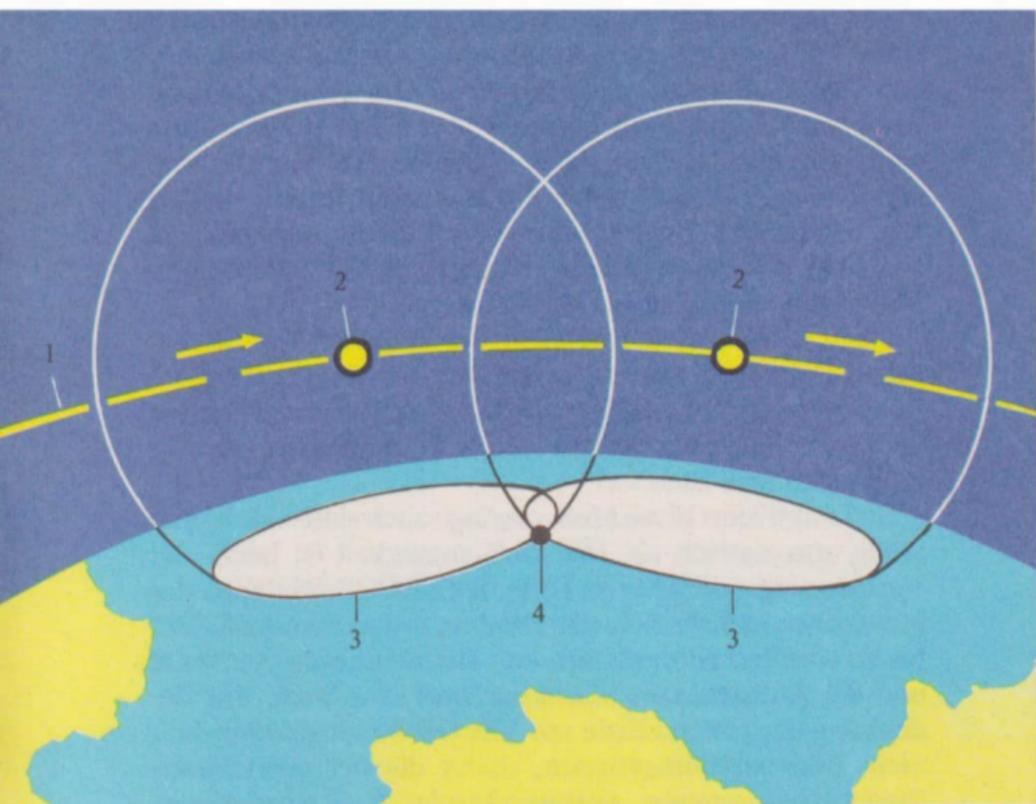
Eine andere Möglichkeit besteht darin, die von den Bodenstationen gemessenen Satellitenparameter diesem zu überspielen. Sie werden im Satelliten bis zur Übertragung der nächsten Meßwerte gespeichert und auf Abruf an einen Navigator weitergegeben. Die Standortbestimmung selbst erfolgt beim Navigator — das Verfahren ähnelt damit der auf S. 57 beschriebenen Eigenpeilung. Beide Möglichkeiten werden gegenwärtig angewandt.

*Satellitennavigation durch Entfernungsmessungen* Nicht nur der Schnittpunkt von Geraden, Hyperbeln oder Gerade und Kreis kann zur Standortbestimmung dienen. Es gibt eine weitere Kombination: zwei Kreise.

Mißt ein Navigator die Entfernung zu zwei Punkten bekannter Lage, erhält er den Standpunkt als einen der Schnittpunkte zweier Kreise, die mit den gemessenen Entfernungen als Radien um die bekannten Punkte geschlagen werden. Zusätzlich ist allerdings zu entscheiden, welcher der beiden Schnittpunkte der Standort ist — eine Feststellung, die aus dem bisherigen Kurs oder einem anderen Verfahren im allgemeinen leicht zu treffen ist.

Die Methode ist auf die Satellitennavigation übertragbar. Der Navigator, der nacheinander die Distanzen zu einem oder gleichzeitig zu mehreren Satelliten mißt, befindet sich auf Kugelflächen, die den Entfernungen entsprechen. Sie schneiden die Erdoberfläche in Kreisen, die wieder Standlinien darstellen.

Im SECOR-System (von *Sequential Collation of Range*, etwa »aufeinanderfolgender Entfernungsvergleich«) ist



*Standliniengewinnung durch Messen der Satellitenentfernung. 1 – Satellitenbahn; 2 – Satellitenposition zu verschiedenen Zeiten; 3 – Standlinien; 4 – navigierendes Objekt*

dieser Gedanke technisch verwirklicht. Es arbeitet ausschließlich mit der Messung von Impulslaufzeiten und Satelliten in Bahnhöhen zwischen 330 km und 3 600 km.

Zur Standortfeststellung gehören – außer den Bord-einrichtungen – jeweils ein Satellit und drei Bodenstationen, eine Leit- und zwei Nebenstationen.

Sobald ein Navigator durch ein Signal bei der Leitstation eine Standortbestimmung anfordert, senden diese und die von ihr gesteuerten Nebenstationen nacheinander Meßimpulse zum Satelliten. Sie werden von ihm erwidert und von den Bodenstationen empfangen. Aus den Impulslaufzeiten folgen drei Entfernungswerte und daraus nach entsprechender Computerauswertung der Satellitenstandort.

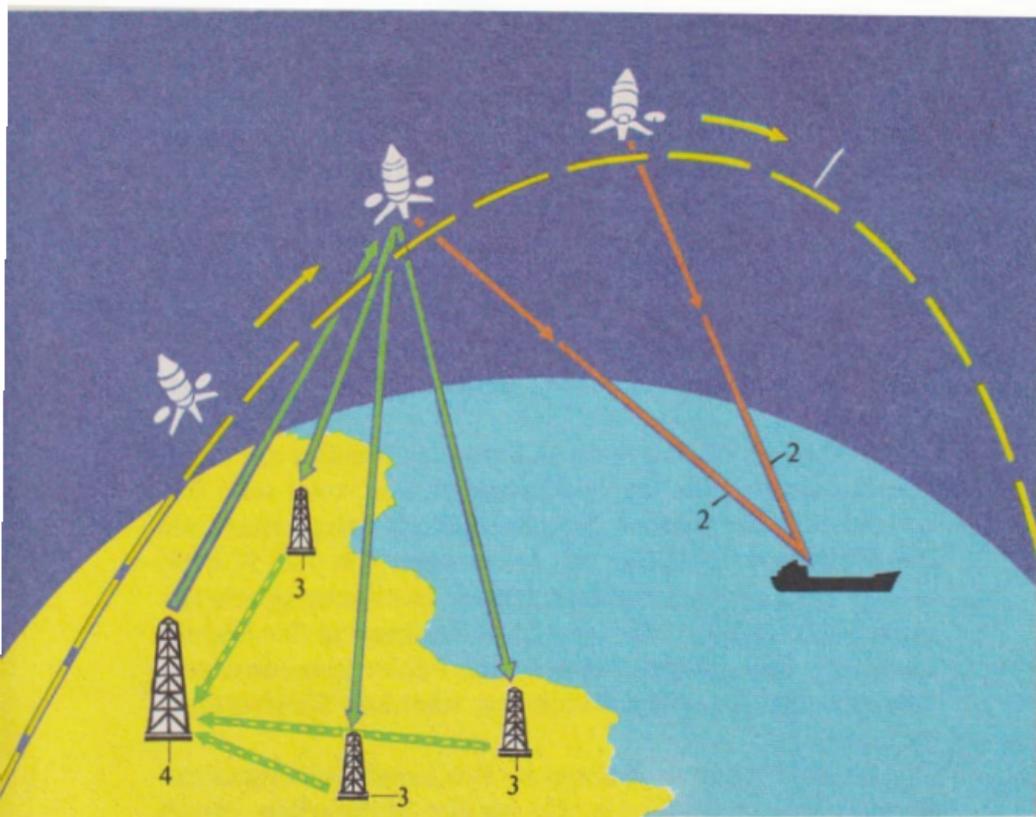
Nunmehr »befiehlt« die Leitstation dem Satelliten durch einen weiteren Impuls, ein Abfragesignal zum navigierenden Objekt zu senden. Es wird von einem Transponder an Bord beantwortet und vom Satelliten zur Bodenstation weitergegeben. Daraus folgt zunächst die Strecke: navigierendes Objekt—Satellit—Bodenstation, ferner, weil die Distanz Satellit—Bodenstation durch die vorangegangene Messung bekannt ist, die Entfernung Schiff—Satellit und somit eine kreisförmige Standlinie.

Nach einiger Zeit, während der sich der Satellit auf seiner Bahn weiterbewegte, wird die Messung wiederholt. Resultat ist die zweite Standlinie. Unter Berücksichtigung der vom Fahrzeug inzwischen zurückgelegten Strecke ergibt sich sein Standort.

So kompliziert diese Meßvorgänge auch sind — sie laufen völlig automatisch ab. Die Meßgenauigkeit ist hoch. Bei Vermessungsarbeiten mit Hilfe des SECOR-Systems, das inzwischen mehrfach variiert wurde, traten Standortfehler bis zu wenigen zehn Metern auf. Der technische Aufwand und die Anlagekosten allerdings sind sehr hoch. Zur Bedeckung der ganzen Erde mit SECOR benötigte man sehr viele Bodenstationsgruppen, damit die der eigentlichen Standortbestimmung vorausgehende Positionsmessung der Satelliten überall durchführbar wäre.

*Noch einmal: Dopplernavigation* Im April 1960 wurde vom Territorium der USA unter der Bezeichnung Transit-1B der erste einer Reihe von Satelliten auf eine Umlaufbahn gebracht, über deren Aufgabenstellung die Öffentlichkeit zunächst nur erfuhr, daß sie militärischen Zwecken diene. 1964 war dieses Satellitensystem einsatzbereit. Der Name, den es seither trägt, sagt etwas mehr über die Aufgabenstellung: *NNSS* — Navy Navigation Satellite System, System von Navigationssatelliten für Seestreitkräfte. Ursprünglich ausschließlich für die US-Marine entwickelt, wurde es 1967 z. T. (d. h. mit Ausnahme spezieller militärischer Anwendungsmöglichkeiten) für die Handelsschifffahrt freigegeben. Zur Zeit navigieren einige Hunderte Handelsschiffe auch nach *NNSS*.

*NNSS* greift die zweite der oben von uns charakterisierten Möglichkeiten auf: Mehrere Satelliten (meistens sind



*Satellitennavigation durch Nutzung des Dopplereffekts. 1 – Satellitenbahn; 2 – Übertragung der Satellitenparameter, Messung der Dopplerverschiebung an Bord; 3 – Stationen zur Vermessung der Satellitenbahn; 4 – Übertragung der Meßresultate zum Satelliten*

vier oder fünf unterwegs) umrunden die Erde, die sich unter ihnen hinwegdreht, auf Bahnen, die über Nord- und Südpol führen. Die Bahnparameter werden von Bodenstationen gemessen, den Satelliten übermittelt, dort gespeichert und periodisch mit dem eigentlichen für die Navigation bestimmten Signal ausgestrahlt.

Sowohl zur Feststellung der Bahnparameter des Satelliten wie auch zur Standortermittlung mit Hilfe des Satelliten werden durch den Dopplereffekt verursachte Frequenzänderungen ausgewertet, die auf Grund der Satellitenbewegung und der Erdrotation an von den Satelliten ausgestrahlten Meter- bzw. Dezimeterwellen feststellbar sind.

Zur Vermessung der Satellitenbahnen arbeiten mehrere Bodenstationen mit einem Computer zusammen. Ihm gehen die gemessenen Doppler-Frequenzänderungen über Datenfernübertragungskanäle zu. Er errechnet daraus die Satellitenpositionen in Abhängigkeit von der Zeit, die Satellitenfahrpläne sozusagen, für die nächsten 12 Stunden. Dem Satelliten wird sein Fahrplan von der Hauptstation des Beobachtungsnetzes in Tabellenform codiert übermittelt und an Bord magnetisch gespeichert. Nach 12 Stunden, bei Übermittlung der nächsten Tabelle, werden die vorausgegangenen gespeicherten Daten gelöscht.

An Bord jedes Satelliten befinden sich außer der Speichereinrichtung ein Zeitmarkengeber und zwei sehr frequenzkonstante Sender. Sie arbeiten auf Frequenzen von 400 MHz bzw. 150 MHz mit Leistungen von 1,25 W bzw. 0,75 W stets gleichzeitig. Durch diese zweifache synchrone Ausstrahlung kann man den beim Durchgang der Signale durch die Ionosphäre entstehenden Fehler kompensieren. Die gesamte Satelliteneinrichtung wird aus Sonnenbatterien gespeist.

Alle zwei Minuten strahlen die Bordsender ein Signal zur Standortbestimmung aus. Es ist aus Zeitmarken, einem Teil für die Messung der durch den Dopplereffekt bewirkten Frequenzänderung und acht Zeilen des Satellitenfahrplans (außer für den augenblicklichen 2-min-Intervall für 6...4...2 min davor und für 2...4...6...8 min danach) zusammengesetzt.

Der Bordempfänger nimmt jeweils beide Satellitensender auf. Die Empfangsfrequenzen werden mit Frequenzen verglichen, die von einem frequenzkonstanten Oszillator im Empfänger abgeleitet sind. Daraus ergeben sich die Frequenzänderungen. Bereits das Aufnehmen von drei aufeinanderfolgenden 2-min-Sendungen reicht als Grundlage für die Standortfeststellung.

Diese übernimmt ein an den Empfänger angeschlossener Digitalrechner. Ihm müssen allerdings außer den Werten vom Empfänger noch die genaue Geschwindigkeit und Fahrtrichtung über Grund und die ungefähre Position ( $\pm 3^\circ$  nach Länge und Breite) eingegeben werden. Nach wenigen Sekunden liegt das Ergebnis der Standortbestimmung vor.

Es erscheint bei den derzeit üblichen Empfängern auf einem Bildschirm oder als gedruckter Streifen.

Der Standort läßt sich mit Genauigkeiten bis um 200 m feststellen, allerdings nicht jederzeit. Bei vier oder fünf umlaufenden Satelliten muß der Navigator häufig warten, bis er sich im Sichtbereich eines Satelliten befindet. Im Mittel ist daher nur alle zwei Stunden eine Standortbestimmung möglich.

## Auf der Suche nach der optimalen Lösung

Sehr dichtes Stationsnetz für SECOR – Kurs- und Geschwindigkeitsermittlung nach anderen Verfahren und nicht ständige Möglichkeit der Standortfeststellung bei NNSS – keines der beiden Systeme erfüllt alle Wünsche des Navigators. Gleiches gilt für andere Verfahren der Satellitennavigation (wie wir erfuhren, auch für die Navigation mit Hilfe von Bodenstationen).

Daher ist man in vielen Staaten um die Ausarbeitung weiterer Systeme zur Satellitennavigation bemüht. Gegenwärtig existieren ungefähr dreißig Systemstudien und -vorschläge, zu denen vereinzelt bereits Vorversuche angestellt wurden und werden.

Für Nachrichtensatelliten haben sich Synchronsatelliten bewährt, Satelliten, deren Umlaufbahn in etwa 36 000 km Höhe über dem Äquator verläuft und die deshalb stets über dem (annähernd) gleichen Punkt der Erdoberfläche »stehen«. Sobald es gelingt, ihre Standortstabilität (s. o.) zu verbessern und zugleich die Sendeleistung so zu erhöhen, daß trotz der im Vergleich zu anderen Navigationssatelliten vervielfachten Entfernung der Anwender relativ einfache Empfänger einsetzen kann, würden sie für Navigationszwecke gut geeignete Basen darstellen.

Man hält diese Bedingungen für in naher Zukunft erfüllbar. Daher bilden Synchronsatelliten das Kernstück mehrerer diskutierter Projekte. Unter ihnen nehmen – gewissermaßen als kosmische Erweiterung bekannter Verfahren – solche den Vorrang ein, bei denen sich als Standlinien auf der Erdoberfläche oder auf Flächen gleicher Höhe darüber Hyperbeln ergeben.

Ein weltweites Hyperbelnetz – so ein Vorschlag – würde sich ergeben, wenn man das dem Decca- oder dem Omegaverfahren zugrunde liegende Prinzip auf zwölf in gleichen Abständen über dem Äquator verteilte Synchronsatelliten übertrüge. Ein anderer Vorschlag geht, Loran ähnelnd, von Impulsen aus, deren Laufzeiten zu messen wären.

Standlinien wären nicht nur zwischen Satellit und Erde, sondern auch darüber, im erdnahen Weltraum, zu gewinnen. Damit stünden Navigationssysteme zur Verfügung, die der Seefahrt, dem Luftverkehr und der Raumfahrt in gleicher Weise zugute kommen könnten.

Navigationssysteme sind nur *ein* Problem der gegenwärtigen See- und Luftfahrt. Zunehmend Sorge bereitet Fachleuten auch die Bereitstellung der an Zahl rasch zunehmenden Nachrichtenkanäle für Verbindungen Fahrzeug—»Fest«station, Fahrzeug—Fahrzeug. Ihnen spezielle Nachrichtensatelliten zuzuweisen wäre möglich, aber nicht sehr effektiv; außerdem ist die Zahl der ohne gegenseitige Störungen auf der Synchronbahn unterzubringenden Satelliten begrenzt.

Daher rücken immer stärker Projekte für Mehrzweck-Synchronsatelliten in den Vordergrund. Sie könnten den Nachrichtenverkehr übernehmen, Warnmeldungen, Wetterkarten und allgemeine Mitteilungen für See- und Luftverkehr ausstrahlen, Notrufe empfangen und weitergeben und die für ein Navigationssystem erforderlichen Signale senden.

Ein solches Projekt, das vor allem von der Weltschiffahrtsorganisation (eine Unterorganisation der Vereinten Nationen) angeregt wurde, ist das System INMARSAT. Es soll in der ersten Ausbauphase nur der Nachrichtenverbindung dienen, später jedoch auf die übrigen genannten Zwecke erweitert werden. Über zwanzig Staaten (unter ihnen die Sowjetunion und die VR Polen) und zahlreiche internationale Organisationen (z. B. der Internationale Seefunkausschuß, die Internationale Zivilluftfahrtorganisation, die Welt-Wetter-Organisation) sind in den Arbeitsgruppen vertreten; erste Versuchssatelliten wurden gestartet. Gelingt es, dem System endgültig zum Durchbruch zu verhelfen, wird neben einem großen Schritt zur opti-

malen Navigation (und Kommunikation) zugleich ein deutliches Beispiel für Wirksamkeit und Nutzen internationaler Zusammenarbeit und friedlicher Koexistenz erbracht.

## Auf Kurs im Weltraum

Bis Ende September 1978 wurden seit den denkwürdigen Tagen von Sputnik-1 allein nahezu 1300 sowjetische Raumflugkörper durch Raketen emporgetragen. Weitaus die meisten fanden ihren Weg und erreichten ihr Ziel. Sie umrunden den Erdball auf vorgegebenen Bahnen, steuern über Millionen Kilometer Planeten an, treffen und verkoppeln sich im erdnahen Raum in buchstäblicher Millimeterarbeit.

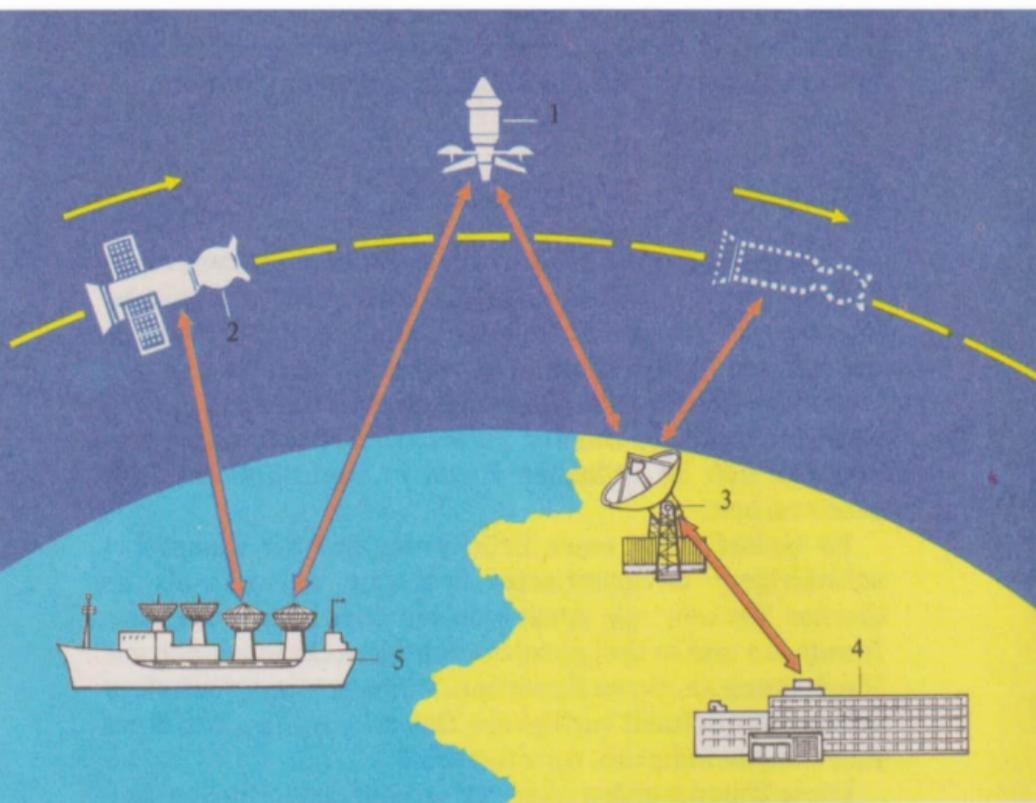
Es bedarf kaum einer Erörterung, daß die Raumfahrt schwierigere navigatorische Probleme aufwirft als irdischer Verkehr; sie spielt sich bis über sehr große Entfernungen und in drei gleichberechtigten Dimensionen auf Flugbahnen ab, deren Erreichen, Einhalten und Verändern präzise und schnell verfügbare Daten über Standort, Kurs und Geschwindigkeit voraussetzen.

Diese Daten werden nicht nur – wie meistens in See- und Luftfahrt – an Bord der bemannten oder unbemannten Raumflugkörper, sondern häufig von Bodenstationen ermittelt. Wenn nötig, werden daraus Signale für Steuerkommandos an die Raumflugkörper abgeleitet.

Bei *Fremdortung* von Bodenstationen aus sind funktechnische Verfahren am wichtigsten. Ihr einfachstes wurde der Fremdpeilung entlehnt (vgl. S. 57). Ein *Bakensender* an Bord des Raumflugkörpers strahlt z. B. im Meterwellenbereich Ortungssignale aus. Sie werden von mehreren zusammenarbeitenden Bodenstationen empfangen und ausgewertet.

Einfache Richtungspeilung genügt allerdings nicht. Man bestimmt, ähnlich wie beim Dopplernavigators, die durch den Dopplereffekt bedingten Frequenzänderungen und leitet aus ihnen Weg- und Flugbahnkomponenten ab.

Die Genauigkeit dieser Methode läßt sich steigern, indem man den Dopplereffekt zweimal ausnutzt. Dazu wird der Raumflugkörper mit einem Transponder ausgerüstet, einer



*Kommunikation zwischen Flugleitzentrum (4) und Raumflugkörper (2) bei bemannten Raumflugunternehmen mit Hilfe eines Beobachtungsschiffes (5), eines Relaisatelliten (1) und einer Boden-Beobachtungsstation (3). Der Satellit vermittelt den Kontakt, wenn sich das Raumschiff im »Funkschatten« der Erde, also außerhalb des unmittelbaren Empfangsbereichs der Erdstationen befindet.*

Einrichtung also (vgl. S. 81), die empfangene Funksignale mit Signalen ihres Senders beantwortet. Von der Bodenstelle wird dem Transponder ein Funksignal zugestrahlt. Er empfängt es wegen des Dopplereffekts mit etwas veränderter Frequenz und schickt es mit dieser Frequenz zur Bodenstation zurück. Dabei tritt der Dopplereffekt nochmals in Erscheinung. Die gesamte Frequenzänderung wird größer und damit leichter und genauer meßbar.

Radarechos vom Mond und später von Planeten wurden empfangen, als die Raumfahrt noch in ihren Anfängen

steckte. Trotzdem bleibt das konventionelle Radarverfahren vorerst auf Entfernungen von wenigen Tausenden Kilometern beschränkt, sofern Raumflugkörper als Radarziele dienen. Ihre rückstrahlende Fläche ist im Vergleich zur Entfernung sehr gering. Nur ein winziger Bruchteil der Energie der Suchimpulse wird in Richtung zur Bodenstation reflektiert. Außerdem sinkt die Signalstärke mit dem Quadrat der Entfernung (Erhöhung der Distanz auf das Doppelte, Rückgang der Signalstärke auf ein Viertel usw.); weil dies für Hin- und Rückweg gilt, nimmt die Intensität des von einer Bodenstation empfangenen Echos sogar mit der vierten Potenz der Entfernung ab.

Eine Vervielfachung der Radarreichweite auf Planetenentfernungen ist möglich, wenn man auch hier Transponder einsetzt. Das gegenwärtig beispielsweise für Mond- und Raumsonden wichtigste Verfahren ist eine Kombination von Radar- und Dopplermessungen. Es liefert Entfernungs-, Richtungs- und Geschwindigkeitswerte mit einer Genauigkeit, wie sie von keinem Navigationsverfahren der See- und Luftfahrt auch nur annähernd erreicht wird. So kann man die Abstände von Millionen Kilometer entfernten Raumsonden bis auf Meter genau messen. Geschwindigkeitskomponenten von Millimetern pro Sekunde sind der Messung zugänglich.

Freilich wird die Präzision dieser Meßverfahren mit sehr hohem technischem Aufwand erkaufte. Die besonderen Bedingungen der Raumfahrt bringen es mit sich, daß er vor allem zu den Bodenstationen verlegt werden muß.

Masse, Raumangebot und verfügbare Energie sind in allen Raumflugkörpern begrenzt. So müssen sich die Sender von Raumsonden mit Leistungen bescheiden, die einige zehn Watt nicht übersteigen; auch den Abmessungen ihrer zur Erde weisenden Richtantennen sind Grenzen gezogen. Zu den Bodenstationen gelangt ein äußerst schwaches Signal. Es ragt nur wenig aus dem allgemeinen Rauschhintergrund – verursacht durch ungezählte natürliche und künstliche Quellen elektromagnetischer Strahlung – heraus und wäre mit üblichen Funkempfängern und Antennen kaum zu entdecken.

Das zwingt zu den in Bodenstationen und auf Beobachtungsschiffen installierten riesigen Antennenspiegeln,

deren Durchmesser 100m und mehr erreichen. Sie sammeln in ihrem »Brennpunkt« die winzigen Energiebeträge für den nachgeschalteten Empfänger.

Aber auch der Empfänger »rauscht«, und es bedarf äußerst komplizierter Kunstgriffe, um sein Eigenrauschen herabzusetzen. So finden wir in den besonders kritischen Eingangsstufen, die das Signal von der Antenne zuerst erreicht, besonders rauscharme parametrische Verstärker oder auch Maser, die dem Laser eng verwandten Molekularverstärker. Allein die für ihre Funktion nötige Kühlung – mit flüssigem Stickstoff oder flüssigem Helium – bedingt umfangreiche Aggregate.

Mit optischen Hilfsmitteln, mit Teleskopen etwa oder mit Spezialkameras, werden im wesentlichen Bahndaten von Erdsatelliten ermittelt. Bei Fernflügen über Hunderttausende oder Millionen Kilometer versagt die optische Ortung. Ohnehin ist sie nur nachts bei klarem Himmel möglich.

Raumschiffe utopischer Romane wählen und steuern beliebige Kurse. Interplanetarische Navigationssysteme, Funkfeuer auf Himmelskörpern, die Tiefe des Raums abtastende Höchstleistungs-Radargeräte an Bord versorgen die Navigatoren mit allen nötigen Angaben . . .

Dies alles gibt es noch nicht. Navigationshilfsmittel an Bord unbemannter und auch bemannter Raumflugkörper sollen vor allem kontrollieren und unterstützen. Sie wachen darüber, daß von Bodenstationen vorgegebene oder in Bordrechnern gespeicherte Bahnen eingehalten und berichtet werden.

Dazu werden Solldaten, z. B. die einzuhaltende Flugbahn, mit Istwerten, hier der tatsächlichen Flugbahn, verglichen. Die Differenz ist Grundlage für die Bildung von Signalen, die Korrekturen auslösen oder, bei Handsteuerung, den Kosmonauten Anweisungen hierfür übermitteln.

Solche Messungen setzen an Bord ein stabiles Bezugssystem voraus, das seine Lage unabhängig von allen Flugbewegungen beibehält. Die technische Ausführung kennen wir bereits (vgl. S. 47): Es ist die kreiselstabilisierte Plattform. Sie begegnet uns an Bord zahlreicher Raumflugkörper.

Vermutlich werden solche Plattformen künftig ohne Kreisel mit ihren unvermeidbaren Mängeln auskommen. Die in Entwicklung befindlichen *Lasergyroskope* ersetzen Kreisel durch Laserstrahlen. Diese durchlaufen geschlossene Bahnen und reagieren auf Richtungsabweichungen mit Frequenzänderungen. Ein Lasergyroskop enthält keine beweglichen Teile und zeichnet sich durch hohe Genauigkeit und Lebensdauer aus.

Auch in der Raumfahrt wird die kreiselstabilisierte Plattform häufig mit Beschleunigungsmessern ausgestattet und zum Trägheitsnavigationssystem erweitert. Es ist, wie das der Luftfahrt, autonom, kann also auf äußere Hilfsmittel verzichten.

Lichtausbreitung im Weltraum erfolgt ohne Behinderung durch Lufttrübung, Wolken usw. Optische Methoden spielen daher bei der Ermittlung der Istdaten eine wichtige Rolle.

In der Astronavigation der Raumfahrt kehrt der Leitstern in neuer Qualität wieder. Fixsterne übernehmen seine Aufgabe. Sie werden mit *Sternsensoren* angepeilt, extrem verkleinerten Teleskopen, die mit einem Sekundärelektronenvervielfacher gekoppelt sind. Er wandelt geringste Lichtintensitäten in elektrische Signale um. Sie sorgen dafür, daß der Fixstern stets genau im »Fadenkreuz« des Sensors bleibt. Bei Kursabweichungen ändert sich die Stellung des Sensors gegenüber der kreiselstabilisierten Plattform. Daraus werden Korrektursignale abgeleitet.

Bei bemannten Raumflügen beobachtet die Besatzung meist selbst Kontrollsterne; die Verarbeitung der Meßwerte geschieht jedoch ebenfalls automatisch.

Gut für den Einsatz im »durchsichtigen« Weltraum eignet sich das *optische Radar*. Es verwendet statt Funkwellen Laserstrahlen, mit denen sich eine weit höhere Meßgenauigkeit als mit Radiowellen erreichen läßt. Zumindest bei verhältnismäßig geringen Entfernungen, z. B. der Ansteuerung eines Weltraumpartners oder bei Landeoperationen, kann es wertvolle Hilfe leisten.

Das konventionelle Radargerät bewährt sich als Höhenmesser bei Landungen auf Himmelskörpern und bei der Einleitung und Kontrolle von Rendezvous-Manövern.

Ob es künftig an Bord von Raumfahrzeugen weitreichende Radar- oder andere Funknavigationsanlagen geben wird, ist noch offen. Auch wissen wir nicht, ob sich mit den Fortschritten von Erkenntnis und technischer Entwicklung nicht ganz neuartige Möglichkeiten ergeben werden, z. B. Navigationsverfahren, deren Grundlage Schwere- oder Magnetfelder bilden.

Gewiß ist: Auch in der Navigation – gleich ob an der Erdoberfläche, in der Luft oder im Weltraum – wird es keinen Stillstand geben, solange Menschen ihre Kenntnisse und Fähigkeiten zum Nutzen aller anwenden.

»akzent« – die Taschenbuchreihe  
mit vielseitiger Thematik:  
Mensch und Gesellschaft,  
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft  
und Technik. – Lebendiges Wissen  
für jedermann, anregend und aktuell,  
konkret und bildhaft.

---

**Weitere Bände:**

Mletzko / Mletzko, Die Uhr des Lebens

Katona, Interessantes aus der

Medizintechnik

Mohrig, Wie kam der Mensch zur Familie?

Lange, Die Farben der Tiere

Dorschner, Planeten – Geschwister

der Erde?

Rehbein, Oldtimer auf Schienen

Müller / Pötsch, Vom Schneckenpurpur

zum Jeansblau