

Gerd NIEDZWIEDZ¹, Dirk SCHORIES^{2,3}

¹ Universität Rostock, Forschungstauchzentrum (FTZ), 18059 Rostock

² Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

³ DLR Projektträger, Heinrich-Konen-Straße 1, D-53227 Bonn, Germany

gerd.niedzwiedz@uni-rostock.de

dirk.schories@gmx.de

Georeferenzierung von Unterwasserdaten: Iststand und Perspektiven

Zusammenfassung

Für jede wissenschaftliche Feldarbeit ist die genaue Angabe des Arbeitsortes für Messungen und/oder Probennahme absolut notwendig. Bei Taucharbeiten ist aber die Orientierung unter Wasser gerade bei mäßiger Sicht nicht immer einfach. Sie findet zudem nicht nur 2-dimensional statt. Die 3. Dimension, die Tiefe, spielt eine bedeutende Rolle. Innerhalb weniger Tiefenmeter ändern sich physikalische Parameter wie Druck, Helligkeit oder Temperatur im Wasser gravierend und dem entsprechend die hier zu beobachtende Flora und Fauna. Ein Unterwasserfoto, welches seinem geografischen Aufnahmeort, der Tiefe und anderen Umgebungsparametern nicht zugeordnet werden kann, ist u. U. nur von geringem wissenschaftlichem Wert. Die klassischen Verfahren bei der UW-Orientierung durch Taucher verlangen viel Erfahrung und führen nur bedingt zu befriedigenden Ergebnissen bei der Georeferenzierung von Daten. Moderne Navigationssysteme basierend auf GPS versagen unter Wasser physikalisch bedingt. Es gibt eine Reihe von Verfahren und inzwischen auch technische Hilfsmittel, um Abhilfe zu schaffen. Im Vortrag wird versucht diese einzuordnen und auf ihre praktische Einsetzbarkeit hin zu bewerten. Dabei wird auch der erreichte Stand eigener Entwicklungen dargestellt und diskutiert.

Schlüsselwörter: Forschungstauchen, Unterwasserorientierung, GPS, Georeferenzierung, Positionsgenauigkeit, Datenqualität, Dokumentation

Underwater-Georeferencing: State of the art, trends and perspectives

Abstract

For any scientific field work the exact indication of the place of work for measurements and/or sampling is absolutely necessary. When diving, however, the orientation under water is not always easy, especially with moderate visibility. It's not just 2-dimensional. The third dimension, the depth, plays a significant role. Within a few meters of depth, physical parameters such as pressure, brightness or temperature in the water drastically change and accordingly the flora and fauna observed here. An underwater photo that can not be assigned to its geographic location, depth, and other environmental parameters may be only of little scientific value. The classical procedures for the UW orientation by divers require a lot of experience and lead to only partially satisfactory results in the georeferencing of data. Modern navigation systems based on GPS fail physically under water. There are a number of procedures and now also technical aids that can help. The lecture attempts to classify these and evaluate their practical applicability. At the same time the level of own developments achieved is presented and discussed.

Keywords: *Scientific diving, underwater orientation, GPS, georeferencing, position accuracy, data quality, documentation*

1 Einführung

Forschungstauchen ist eine spezielle Form wissenschaftlicher Feldarbeit. Ohne exakte Definition des Untersuchungsortes würde allerdings ein wesentliches Qualitätsmerkmal dieser Feldarbeit fehlen. Beim Tauchen ist es wie bei der Seefahrt: für die Bezeichnung der Tauchstelle auf See werden meist deren geografische Koordinaten verwendet, weil eine Ortsbezeichnung im Sinne von "Seegebiet" zu ungenau ist. Die Vergabe von Namen für touristische Tauchspots wie bspw. "Sharkbay" dient anderen Zwecken und hat nicht das Ziel, Untersuchungsgebiete möglichst exakt für die wissenschaftliche Bearbeitung durch Taucher zu identifizieren.

Dem Taucher stehen unter Wasser in der Regel nur eingeschränkte Navigationsmittel zur Verfügung. Von der UW-Orientierung anhand natürlicher Merkmale (markante Bodenstrukturen, Pflanzenwuchs, Wassertiefe, Sonnenstand) mal abgesehen hat der Taucher in der Regel nur den UW-Kompass. Doch selbst erfahrene Taucher verfehlen damit angepeilte Ziele in den meisten Fällen. So haben viele der handelsüblichen UW-Kompassse eine Aufteilung der Kompassrose von 10°, einige wenige liegen bei 5°. Der magnetische Kompasszeiger muss gerade unter Wasser bei schlechten Sichtverhältnissen gut erkennbar sein, so dass der ablesbare Kompasskurs ohnehin nur mit Genauigkeiten von bestenfalls $\pm 3^\circ$ erkennbar ist. Das führt dann zu einer Abweichung vom Zielpunkt bei 100 m Entfernung von ± 5 m. Meist kommen aber noch eigene Fehler dazu (Verkanten des Kompasses, kurzzeitig höhere Kursdifferenzen mit unzureichender, subjektiv abhängiger Kompensation), so dass in der Realität oft größere Abweichungen auftreten. Bei schlechter Sicht ist ein angepeiltes

Unterwasserziel praktisch kaum zu treffen. Das nächste Problem ist die Frage, wann denn die Zielentfernung abgeschwommen wurde? Ohne weitere Instrumente bleibt nur das Zählen von Flossenschlägen. Das funktioniert mehr oder weniger gut und hängt stark von der Ausrüstung und der Erfahrung des Tauchers ab.

Sollen also für wissenschaftliche Zwecke bspw. für ein Monitoring entlang einer definierten Strecke (bspw. Transekte) UW-Daten erhoben werden ist entweder diese Strecke mittels einer Orientierungsleine zu kennzeichnen oder eine eventuell eingesetzte Taucherplattform an der Wasseroberfläche von Punkt zu Punkt zu verholen. Alle Verfahren verursachen in jedem Fall zusätzlichen Zeitaufwand.

Die Frage nach alternativen UW-Navigationsverfahren ist also naheliegend. Nachfolgend sollen einige prinzipielle Möglichkeiten vorgestellt werden, viele davon sind bereits technisch umgesetzt und am Markt eingeführt bzw. sollen eingeführt werden. Dem künftigen Nutzer dieser Techniken obliegt dann ggf. die Kaufentscheidung anhand einer Kosten-Nutzen-Abschätzung. Die Kostenentwicklung ist aber oft sehr dynamisch, weshalb in diesem Beitrag darauf nicht näher eingegangen wird.

2 Prinzipielles zu globalen Koordinatensystemen

Als geografische Koordinatenvorgabe ist die Angabe von Länge und Breite üblich, die auf der Erdoberfläche jeden Punkt definieren: So wurde über die Erde als näherungsweise Kugel ein Netz von 180 Breitengrade ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) und 360 Längengrade ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$) gelegt. Entlang $\varphi = 0^\circ$ verläuft der Äquator; bei $\varphi = 90^\circ$ finden wir den Nordpol und entsprechend bei $\varphi = -90^\circ$ den Südpol. Genauere Ortsbestimmungen auf der Erde müssen berücksichtigen, dass die Erde keine ideale Kugel ist und der magnetische nicht mit dem geografischen Pol zusammenfällt. Daraus resultieren Fehler bei der Positionsbestimmung. Diese Fehler spielen natürlich auch bei der Navigation mit dem Kompass eine Rolle, werden aber jetzt eventuell noch durch andere Methoden und Techniken verstärkt, mit der die Position bestimmt (gemessen) wird. Früher war es der Sextant, heute sind es bei GPS-Geräten Laufzeitmessungen von elektromagnetischen Signalen zwischen Satelliten im Weltraum und Empfangsgeräten auf der Erde.

Tauchgebiete sind meist lokal begrenzt, Tauchstrecken und UW-Vermessungen bleiben relativ kleinskalig. Hier würden sich u.U. Koordinatensysteme aus dem Vermessungswesen besser verwenden lassen als das übliche Sexagesimalsystem, welches die Koordinaten auf einer Kugeloberfläche beschreibt. Im Sexagesimalsystem hat ein Grad 60 Minuten und eine Minute 60 Sekunden. Minuten und Sekunden lassen sich in dezimaler Form schreiben. Für den seefahrenden Taucher ist es zumindest nützlich, die Umrechnung von einer in die andere Schreibweise zu kennen (Tab. 1; in GPS-Handhelds ist die Koordinatenschreibweise i. d. R. einstellbar).

Tab. 1: Angaben derselben geografischen Position in unterschiedlicher Schreibweise.

Beispiele: Dez.grad:	Grad°min'sec'' __° __' __''	Grad°min,dezmin' __° __, __'	Bogenmaß [-] = Dez.grad · Pi/180°
54,5°	54°30'00''	54°30,000'	0,95120444
57,12345°	57°07'24,42''	57°07,407'	0,99699228

Für die Berechnung von Distanzen auf der Erdoberfläche kommt immer das aus der Mathematik bekannte Bogenmaß zur Anwendung. Das Bogenmaß ist aus den geometrischen Berechnungen am Kreis bekannt. So ergibt sich der Kreisumfang $U = 2 \cdot \pi \cdot R$ (R = Kreisradius). Ein Kreisbogensegment hat die Länge $S = R \cdot \alpha$ (α = Öffnungswinkel [in Bogenmaß] des Segments) bzw.

$$S = U \cdot \frac{\alpha[-]}{2\pi} \text{ bzw. } S = U \cdot \frac{\alpha[^\circ]}{360^\circ} \quad (1.1)$$

also ist:
$$\alpha[-] = \alpha[^\circ] \cdot \frac{2\pi}{360^\circ} \quad (1.2)$$

Bezogen auf das Gradnetz der Erdoberfläche ist das Bogenmaß einer Minute $1 \text{ min}[-] = 1/60 \cdot \pi/180 = 2,9088821 \cdot 10^{-4}$. Idealisiert man die Erde als Kugel und multipliziert die Bogenminute mit dem Erdradius $R = 6.378.137 \text{ m}$ erhält man eine Distanz (Länge des Kreisbogensegments) von 1855 m. Mit anderen Worten: Die Bogenminute auf einem Großkreis entspricht also der Entfernung von 1 Seemeile. Damit ist klar, warum die mit dem Stechzirkel auf einer Seekarte abgegriffene Entfernung mit den Bogenminuten an der rechten Blattkante, also am Längengrad, referenziert wird, um dadurch die Umrechnung einer Distanz in Seemeilen vornehmen zu können. Weiter wird deutlich, welche Bedeutung die Kommastelle bei den Positionsangaben auf deren Genauigkeit hat. Nachfolgende Tabelle 2 ordnet 1/10 Grad, 1/10 Minute, 1/10 Sekunde und 1/10 des Bogenmaßes die entsprechende Distanz auf einem Großkreis zu.

Tab. 2: Fehlerquelle: Kommastelle

0,1° Grad = 1 dezgrad	0,1 min = 1 dezmin	0,1 sek.	0,1 [rad] =
11 131,9 m	185,5 m (= 1 Kabellänge)	3,09 m	0,1 rad = 5,73° ≈ 637 813,69 m

Eine Positionsgenauigkeit von 1,8 m wird somit aus rein mathematischen Gründen im Koordinatenformat Grad°min,dezmin' erst bei 3 Dezimalstellen in der Minutenangabe erreicht!

Die vollständige geografische Position enthält natürlich auch Angaben, ob sich der Punkt nördlich oder südlich vom Äquator (N, S) und östlich oder westlich (O, E/W) von Greenwich befindet. Üblich ist auch, den Längengrad ggf. mit führenden Nullen zu schreiben, weil dieser dreistellig werden kann. Die korrekte geografische Bezeichnung des Aufstellortes einer Messstation im Gebiet des künstlichen Ostseeriffes vor Nienhagen ist demnach N54°10,491' E011°56,602' bzw. N54°10' 29,4" E011°56' 36,1".

Man sollte noch wissen, dass für die Angabe geografischer Positionen auch andere Koordinatensysteme genutzt werden. Dafür gibt es regionale bzw. historische Gründe. Im deutschsprachigen Raum ist bspw. das Gauss-Krüger-System weit verbreitet (gewesen). Sehr viele amtliche topografische Kartenwerke, insbesondere großer und mittlerer Maßstäbe, bauen auf dem Gauß-Krüger-Koordinatensystem auf. Inzwischen werden im Rahmen der Internationalisierung diese nationalen Koordinatensysteme durch weltweit einheitliche UTM-Koordinaten ersetzt (UTM = Universal Transverse Mercator = globales Koordinatensystem auf der Erdoberfläche). Die Koordinatentransformationen zwischen diesen Systemen sind aber hier nicht das Thema. Moderne GPS-Handhelds führen diese Umrechnungen inzwischen problemlos aus.

3 Strategien zur Positionsbestimmung des Tauchers

3.1 Physikalische Probleme

Der Taucher befindet sich in einem Medium, in dem bekanntermaßen die Reichweite elektromagnetischer Wellen sehr klein ist. Von Vandyshev wurden Ergebnisse auf <http://www.vfo-magazin.de/2005/06/eindringtiefe-elektromagnetischer-wellen-in-wasser> in Form eines Diagramms publiziert, welches deutlich zeigt, dass elektromagnetische Wellen mit 10 000 KHz, also 10 Mhz gerade mal ca. 20 cm in Seewasser eindringen. Die bekannten Frequenzen von GPS-Signalen (L5: 1176,45 MHz; L2: 1227,60 MHz; L1: 1575,42 MHz) begründen die Annahme, dass sich die Reichweiten dieser Signale unter Wasser nur auf wenige Millimeter beschränkt, also praktisch keine Nutzbarkeit vorhanden ist. Da die Frequenzen der beim europäischen globalen Satellitennavigationssystem Galileo verwendeten Signale ebenfalls durchweg > 1000 MHz sind, ändert sich am Problem nichts Grundlegendes.

Die direkte Nutzung von GPS-Signalen durch Taucher unter Wasser ist somit nicht möglich!

Unter Wasser befindliche Objekte werden heute i. d. R. hydroakustisch geortet. Diese Ortung beinhaltet Entfernung- und Richtungsmessung bezüglich eines Basispunktes. Grundlage dieser Messung sind Schallsignale, also unter Wasser erzeugte Töne einer bestimmten Frequenz. Die Entfernung wird anhand der Zeitdifferenz zwischen Signalabstrahlung und Empfang des reflektierten Signals ermittelt. Dabei spielt die Schallgeschwindigkeit im Wasser eine entscheidende Rolle. Diese ist abhängig vom Druck (Tiefe), Temperatur und Salzgehalt. Sehr oft kommt es im Meer in der Nähe der Wasseroberfläche zu deutlichen Änderungen dieser Parameter. Durchläuft der Schallimpuls Wasserschichten mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten können entsprechende Messfehler bei der Entfernungbestimmung auftreten. Hinzu kommt, dass es bei einer Schallabstrahlung, die nicht exakt vertikal erfolgt, zu Brechungs- und Reflektionseffekten (Impedanz) kommt, die sich ebenfalls auf die Ortungsgenauigkeit auswirken. Man kann diesen Problemen technisch begegnen bspw. durch Verwenden einer korrigierten Schallgeschwindigkeit bei der Entfernungsberechnung, angepasste Auswahl der Schallsignalfrequenzen und durch Anzahl, Anordnung und Größe der Sonarschwinger. Diese technischen Lösungen sind jedoch mehr oder weniger kostenintensiv bzw. verlangen eine vorher auszuführende physikalische Analyse des Wasserkörpers.

3.2 Tauchernavigation unter Wasser

Wie bereits erläutert stellt die UW-Navigation mit Instrumenten (Kompass) eine sinnvolle bzw. in vielen Fällen sogar zu favorisierende Hilfestellung bei der UW-Orientierung des Tauchers dar. Zur Positionsbestimmung wird aber zunehmend auch auf hydroakustische und Trägheits navigationsverfahren verwiesen.

Bei Forschungstaucherarbeiten sollte die geografische Position des Untersuchungsortes, wenn möglich, durch die Angabe der Wassertiefe ergänzt werden, in der Messdaten, Fotos oder Videos entstanden sind. Damit sind diese Daten dreidimensional georeferenziert. Die vom GPS-Gerät mitgeteilte geografische Höhe bezieht sich immer nur auf die Höhe des Gewässers, in dem getaucht wird. Neben dem GPS-Handheld zur Bestimmung von geogr. Breite und Länge ist also auch ein Tiefenmesser erforderlich, der möglichst zeitabhängig die Tauchtiefe speichert – also am Besten ein auslesbarer Tauchcomputer.

Seit 1985 wird mit Hilfe von 24 Satelliten das NAVSTAR-GPS (= Global Positioning System) als immer noch wichtigstes Ortungs- und Navigationssystem betrieben. Zur Bestimmung von geografischer Position (Länge, Breite) und ellipsoidischer Höhe ist der Signalempfang von mindestens 4 Satelliten erforderlich. Probleme bei der Berechnung der Position entstehen überall dort, wo ein direkter Sichtkontakt zu den Satelliten eingeschränkt ist (bspw. durch hohe Gebäude, Wald, Schiffsaufbauten), das Signal gestört bzw. seine Übertragung be- oder verhindert wird. Beginnend mit dem 1. Mai 2000 verbesserte sich die Ortungsgenauigkeit mit den Standard-Codes auf unter 10 m, weil die bis dahin praktizierte künstliche Signalverzerrung durch das Militär abgeschaltet worden ist. Die Ortungsgenauigkeit lässt sich mit speziellen Methoden (bspw. zusätzliche landgestützte Referenzstationen (dGPS)) in den cm-Bereich und mit Mehrfrequenzverfahren in den mm-Bereich weiter verbessern. Heute handelsübliche mobile GPS-Empfänger (Handhelds) weisen Ortungsgenauigkeiten bei freier Sicht von 3 – 5 m aus. Es ist zu erwarten, dass mit Einführung neuer Satellitensysteme (bspw. das europäische Navigationssystem Galileo) die Ortungsgenauigkeit evtl. weiter verbessert werden wird. Wie bereits in Punkt 2 erläutert, ist aber bei höherer Ortungsgenauigkeit ein entsprechend angepasstes Datenformat zu verwenden. Die Verwendung von (d)GPS gelingt aber nur oberhalb der Wasseroberfläche. Das GPS-Signal müsste immer transformiert oder zum Taucher transportiert werden, so dass es auch unter Wasser nutzbar ist.

Die GPS-Nutzung ist beim Tauchen nun folgendermaßen möglich:

3.2.1 Stationäre Nutzung

Der Signalempfang erfolgt über Wasser und zwar genau über der einzumessenden UW-Station. Üblicherweise wird die Antenne bzw. das gesamte GPS-Gerät an einer langen Stange montiert, deren unteres Ende vom Taucher platziert wird und deren anderes Ende sich oberhalb der Wasseroberfläche befindet. Der Taucher muss die Stange genau senkrecht halten.

Vorteil:

hohe Ortungsgenauigkeit (liegt im Bereich des GPS-Signalfehlers RGPS); geringer Einsatzaufwand. Bei Verwendung eines dGPS wäre sogar die Vermessung von UW-Strukturen möglich.

Nachteil:

keine aktive Navigation durch den Taucher möglich; Einsatz nur für Wassertiefen < Stangenlänge. Die Stange muss vom Taucher sicher (senkrecht) handelbar sein (Größe, Gewicht, Ablesbarkeit der Libelle).

3.2.2 Geschleppte GPS-Boje

Der Taucher schleppt eine Boje mit

- a) montiertem GPS-Handheld bzw. einem auslesbaren Tracker (Katzenhalsband) oder
- b) einer GPS-Antenne an der Wasseroberfläche.

Vorteil:

Das auf einer Boje am Seil geschleppte Handheld stellt die kostengünstigste und einfachste passive GPS-Nutzung durch Taucher dar. Die spätere Auswertung aufgezeichneter GPS-Tracks erlaubt bereits die Georeferenzierung von Messdaten, Wasserproben, UW-Fotos und -Videos.

Wird als Schleppmittel ein HF-taugliches Kabel mit ausreichender Zugfestigkeit eingesetzt, ist es zudem möglich, ein vom Taucher geführtes, wasserdicht eingeschlossenes GPS-Handheld mit der GPS-Empfangsantenne zu verbinden und dem Taucher damit ein aktiv nutzbares Navigationssystem während seines Tauchganges zur Verfügung zu stellen. Damit kann seine UW-Orientierung auch bei schlechten Sichtbedingungen enorm verbessert werden. Bessere UW-Orientierung erhöht immer auch die Sicherheit beim Tauchen.

Nachteil:

Es treten nicht vernachlässigbare Navigationsfehler auf! Die GPS-Boje befindet sich i. d. R. nicht genau über dem Taucher, sondern ist zu dessen Position infolge von Wind- und Wasserströmung horizontal verdriftet. Der Wert dieser Verdriftung C hängt insbesondere von der Länge der Schleppleine (Kabel) S im Verhältnis zur Tauchtiefe WT ab. Er kann ein Mehrfaches des GPS-Signalfehlers R_{GPS} betragen (Abb. 1).

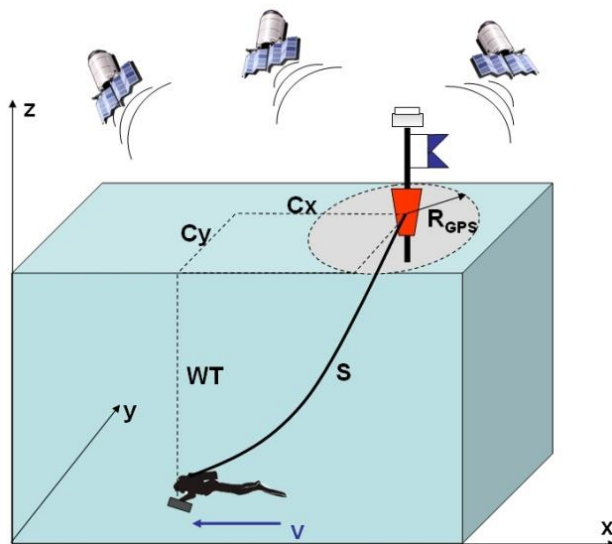


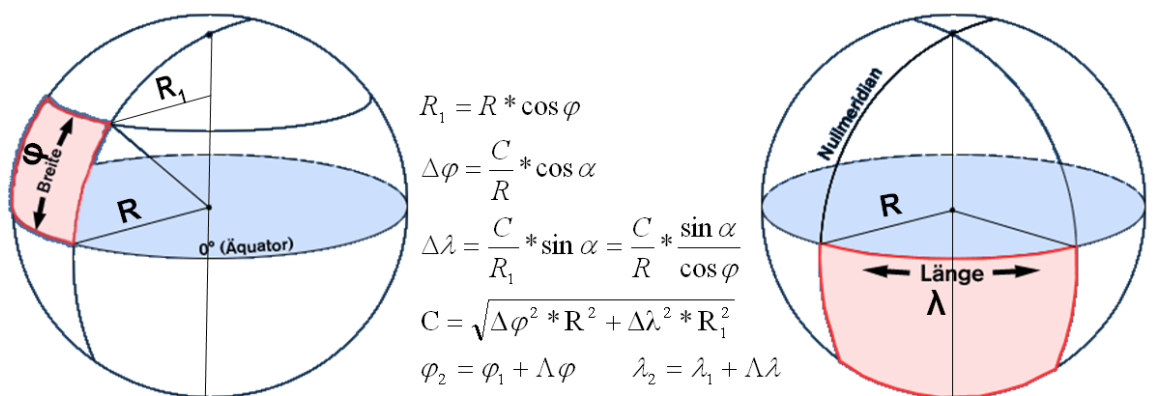
Abb. 1: Taucher schleppt GPS-Boje.

Angenommen, die Krümmung des Schleppkabels ist zu vernachlässigen, so kann mit Hilfe bekannter Rechenregeln bereits am rechtwinkligen Dreieck gezeigt werden, dass bei einer Tauchtiefe (Kathete 1) von 10 m und einer Schleppleinenlänge (Hypotenuse) von $S = 12$ m eine näherungsweise Verdriftung (Kathete 2) von ca. $C = 6,6$ m bzw. bei $S = 13$ m eine Verdriftung von $C = 8,3$ m zu erwarten ist. Das ist bereits das 2–3-fache des üblichen GPS-Signalfehlers R_{GPS} auf See.

Es gibt aber Korrekturmöglichkeiten:

- die GPS-Boje wird insbesondere bei der Probennahme oder im Moment des Fotografierens möglichst senkrecht über dem Taucher platziert (straff gehaltenes Kabel). Das Ziel ist, die Verdriftung C auf nahezu 0 m zu reduzieren! Das gelingt unter "guten" Bedingungen (geringe Tauchtiefe, keine Wind- oder Wasserströmung, keine Eigenbewegung) ganz gut, insbesondere im Buddyteam, wo sich ein Taucher auf die Beprobung und der 2. Taucher auf die Bojenführung konzentrieren kann. Damit sind die Beprobungsorte später ausreichend genau identifizierbar.
- Der Wert der Verdriftung C und ihre Richtung wird abgeschätzt. Das ist nicht ganz so simpel wie am rechtwinkligen Dreieck gezeigt. Einerseits führen die Kabeleigenschaften (Durchmesser, Gewicht im Wasser) und die hydrodynamische

Belastung zu einer Kabelkrümmung. Die Biegesteifigkeit des Kabels kann i. d. R. vernachlässigt werden. Andererseits ist die Oberflächenboje Wind- und Wasserkraften ausgesetzt. Diese Kräfte stehen mit den hydrodynamischen Kräften auf das UW-Kabel in einem Verhältnis, welches die Richtung der Verdriftung C bzgl. der Taucherposition bestimmt. Hinzu kommt, dass die hydrostatische Auftriebskraft der Boje groß genug sein muss, damit diese aufgrund der hydrodynamischen Abtriebskräfte des Schleppkabels nicht untergeht. Diese Probleme entstehen vor allem dann, wenn der Taucher sich selbst bewegt (Scooterfahren) oder in einer Wasserströmung arbeitet. Es wird hier immer zu einer Verdriftung C kommen. Diese ist dann so gut wie möglich zu ermitteln! Dazu wurden bspw. für die am FTZ der Uni Rostock verwendeten UW-Kabel umfangreiche Variantenrechnungen durchgeführt, so dass der Betrag der Verdriftung C ausreichend genau ermittelbar ist. Die Verdriftungsrichtung muss derzeit öfters noch abgeschätzt werden, wobei in vielen Fällen davon ausgegangen werden kann, dass die Boje hinterhergeschleppt wird, dh. es gilt: Verdriftungsrichtung = Tauchkurs - 180°. Ist die Verdriftung C als Vektor bekannt gelingt es mit dem Inhalt von Abb. 2 und der Formeln (1) die GPS-Position der Antenne auf die der Taucherposition zu korrigieren:



- Bei kleinen Positionsunterschieden sollte vereinfachend in einer Ebene gearbeitet werden können.
- Deren Seitenlängen sind $\Delta \lambda \cdot R_1$ und $\Delta \varphi \cdot R$.
- Die Entfernung zw. P_2 und P_1 ist C;
- Die Richtung von P_1 nach P_2 ist α .

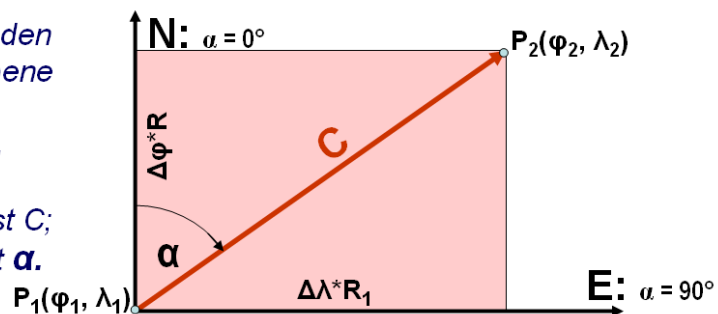


Abb. 2: Korrektur der Antennenposition P1 auf die Taucherposition P2.

Die technische Umsetzung der GPS-Nutzung kann somit relativ einfach erfolgen oder aber auch bereits etwas aufwändiger mit kommerziellem Anspruch. So wurde an der Universität in Valdivia (Chile) bereits 2007 damit begonnen, nach Variante 2a zu verfahren (siehe Abb. 3). Nachdem es gelungen war, einen Hersteller von hochwertigen UW-Foto/Videogehäusen davon zu überzeugen, auch ein UW-Gehäuse für ein GARMIN-GPS 76 zu bauen, konnte die UW-GPS-Nutzung nach Variante 2b gemeinsam mit der Universität Rostock erfolgen. Anfänglich wurde das GPS-Gehäuse vom Taucher noch per Hand geführt. Später gab es bessere Lösungen für die

Unterbringung der UW-Kabel oder auch für kombinierte Montagen von GPS, Video-kamera und zusätzlicher Messsensorik.



Abb. 3: Links: GPS-Einsatz (Variante 2a). Mitte und rechts: GPS-Handheld im UW-Gehäuse (Variante 2b).

Analoge kommerzielle Lösungen (bspw. das Valtamer-UW-Tablett mit GPS-Oberflächenboje; <http://allecoproducts.fi/uns/>) arbeiten prinzipiell genauso, sehen etwas eleganter aus, sind dafür aber teurer in der Anschaffung.

Der scheinbare Vorteil des UW-Tabletts, als modernes Schreibgerät oder gar Fotokamera beim Tauchen verwendbar zu sein, könnte sich aber auch als Problem erweisen. Bei begrenzter Tauchzeit, sind alle UW-Arbeiten möglichst schnell und einfach durchzuführen. Das Verfassen längerer Texte sollte deshalb immer an der Wasseroberfläche erfolgen.

3.2.3 GPS kombiniert mit Trägheitsnavigation

Wiederum ist ein genau einmessbarer Referenzpunkt die Startposition der Tauchstrecke. Die geografische Position der Startposition ist also gegeben. Vereinfacht dargestellt registriert jetzt ein vom Taucher mitgeführtes Gerät mit Hilfe von Trägheitssensoren Beschleunigungskräfte F_x , F_y , F_z , woraus sich die Verschiebung Δs ergibt (Gl. 2.1). Liegen die Beschleunigungswerte (a_x , a_y , a_z) im 3-dimensionalen Koordinatensystem in einem bestimmten Zeitabschnitt Δt vor, lassen sich daraus veränderte Geschwindigkeiten (v_x , v_y , v_z) berechnen und mit den bekannten kinematischen Beziehungen die zurückgelegten Wege (s_x , s_y , s_z) bestimmen:

$$a = \frac{F[N]}{m[kg]} \rightarrow \Delta v = a * \Delta t \rightarrow \Delta s = \frac{1}{2} * a * \Delta t^2 \quad (2.1)$$

Damit kann die räumliche Verlagerung des Gerätes nach einem Zeitschritt Δt berechnet werden – der Kurs wird wie in der Seefahrt gekoppelt. (siehe TAMIN = "Track And Memory Indicated Navigation"; das Gerät war auf www.taminportal.de beschrieben, diese Domain steht inzwischen (Stand 8/2019) aber zum Verkauf).

Wer bereits einmal ein Schiff mit Koppelnavigation, also ohne Landsicht und ohne GPS gesteuert hat, kennt die sich ergebenden Probleme. In der Seefahrt sind die Vorgaben (u. a. Steuerkurs und Geschwindigkeit) genau einzuhalten. Die Kursbestimmung mit Trägheitsnavigation verlangt eine permanent hohe Genauigkeit bei der

Messung der 3-dimensionalen Beschleunigung und eine Datenverarbeitung in Echtzeit. Die zwischenzeitliche Fehlerkorrektur (Abgleich der berechneten mit der GPS-Istposition) ist vorteilhaft und vermutlich auch notwendig. Damit wäre neben der Navigation über die Beschleunigungsaufnehmer zusätzlich also noch ein GPS-Empfänger erforderlich. Eine Arbeitsgruppe an der Fachhochschule Aachen hatte sich genau mit diesem Problem beschäftigt (siehe: <https://idw-online.de/de/news328723>) – lange gab es von dort aber trotz mehrfacher Nachfrage keine weiteren Informationen – Anfang September/2019 dann aber doch noch: die Entwicklung wurde eingestellt! Als Fazit ist zu vermuten, dass ein hoher Entwicklungs- und dann technischer Aufwand entsteht, der sich in den Kosten des Systems niederschlagen wird. Anfangs geweckte Erwartungen wurden nicht erfüllt. Eigentlich ist das schade, weil die Idee an sich sehr viel Potenzial enthält.

Vielleicht deshalb hat man an diesem System aber anderswo weitergearbeitet. Auf der Düsseldorfer Messe BOOT'2016 stellte die finnische Firma ARIADNA-Tech ein Gerät vor, welches in der Lage sein soll, drahtlos den Taucher unter Wasser navigieren zu lassen. Die Markteinführung sollte ursprünglich 2017 erfolgen, auf der Internetseite <http://ariadna.tech/> wurden aber ebenfalls Terminverschiebungen angekündigt. Aus den Beschreibungen lässt sich vermuten, dass auch hier das Prinzip der Trägheitsnavigation verwendet worden ist.

3.2.4 GPS kombiniert mit Hydroakustik (Richtungsortung)

An der Wasseroberfläche empfangene GPS-Signale werden benutzt, um ausgehend von diesen genau eingemessenen Referenzpunkten die Position des Tauchers über eine hydroakustische Ortung (drahtlos) zu bestimmen. Hier gibt es verschiedene Varianten. Eine davon wird bspw. beim Easy-Track technisch umgesetzt (Abb. 4). Dieses System könnte vom Taucher auch aktiv für seine UW-Navigation benutzt werden.

Vorteil:

Der Taucher bleibt „freihändig“ für andere Arbeiten verwendbar

Nachteil:

Ein deutlich höherer finanzieller Investitionsaufwand und u. U. Mehraufwand zur Installation und zum Betrieb der Anlage. Die Fehler bei einer hydroakustischen Entfernungsmessung steigen bekanntlich mit größer werdendem Signalweg; sie sind zudem abhängig von Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit (Temperatur, Salzgehalt), die sich über den Signalweg (manchmal deutlich) ändern können!

Eine weiterentwickelte Variante dieses Navigationsprinzips finden wir in dem extra für Taucher entwickelten System NAVIMATE™ (Quelle: www.navimate.com). Hier werden ebenfalls über ein Einweg-Signal dem Taucher eigene Positionsdaten und die seiner Buddies mitgeteilt. Die Information erscheint auf einem "Wrist unit" – einem am Handgelenk zu tragendem Display, ähnlich aussehend wie das eines Tauchcomputers. Auf der Web-Seite von NAVIMATE wird von der Markteinführung 2019 gesprochen. Anfragen an den Hersteller wurden leider bislang nicht beantwortet. So ist bspw. nicht bekannt, ob von Navimate die abgeschwommene Tauchstrecke aufgezeichnet wird (analog zu einem GPS-Track) und eine nachfolgende Georeferenzierung von Daten, Fotos und Videos erlaubt.

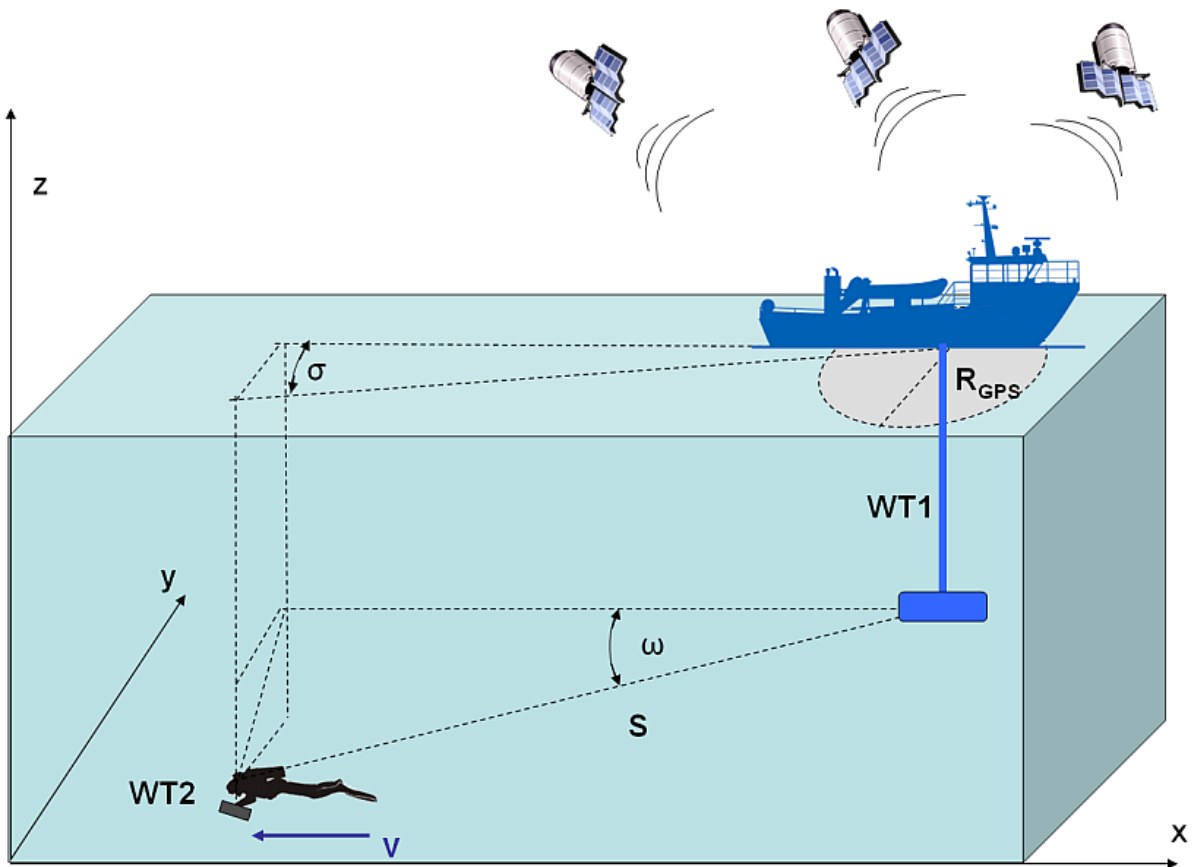


Abb. 4: Das Easy-Track-System (Quelle: www.appliedacoustics.com).

3.2.5 GPS kombiniert mit Hydroakustik (Entfernungsmessung)

Dem letzten System, welches hier der Vollständigkeit halber besprochen werden soll, liegt eine Idee zugrunde, die Friedrich Balck von der TU-Clausthal-Zellerfeld auf einem Forschungstauchersymposium bereits im Jahr 2000 vorstellte. Er sprach dort über "Vermessungsmethoden für den Flachwasserbereich". Genau genommen handelt es sich um die Verlagerung des Prinzips der GPS-Ortung an der Erdoberfläche in den Unterwasserbereich. Für die Entfernungsmessung (sonst zwischen Satellit (Signalquelle) und dem Empfänger auf der Erdoberfläche) erfolgte hier nicht über elektromagnetische Signale, sondern erst einmal einfach über 3 abspulbare Leinen, deren Längen R_1 , R_2 , R_3 permanent gemessen werden – also rein mechanisch.

Es wurden an 3 definierten Orten A, B, C Seilspulen aufgestellt, die in der Lage sein sollten, die Länge (R_1 , R_2 , R_3) ihres abgespulten Seiles zu messen und beim Nachlassen der Seilzugkraft dieses wieder aufzutrommeln (Abb. 5). Die Seilenden wurden miteinander im Punkt D verbunden. Diese Verbindungsstelle ist in bestimmten Grenzen frei verschiebbar, wobei aber gleichzeitig die abgetrommelten Seillängen $R_1 - R_3$ verändert werden. Sind die räumlichen Koordinaten der Orte A, B, C und die abgespulten Seillängen R_1 , R_2 , R_3 genau bekannt lassen sich die 3d-Koordinaten von Punkt D berechnen. D befindet sich nämlich im Schnittpunkt von 3 Kugeln mit dem Radius R_1 um Punkt A, R_2 um Punkt B und R_3 um Punkt C. Die mathematische Herleitung der entsprechenden Gleichungen haben die Autoren des Beitrages selbst einmal vorgenommen und Beispielrechnungen durchgeführt. Die Tests mit einem kleinen Excel-Sheet zeigten plausible Ergebnisse. Nebenbei bemerkte präsentierte der

Ideengeber Friedrich Balck in seiner damaligen Präsentation eigene Ergebnisse aus Objektvermessungen unter Wasser.

Mit Hilfe von GPS und Hydrakustik ist die Methode für das wissenschaftliche Tauchen technisch wie folgt erweiterbar: an den Orten A, B, C werden 3 Bojen platziert und ihre Position z. B. mit (d)GPS genau eingemessen. Damit sind deren räumliche Koordinaten bekannt. An jeder Boje befindet sich eine hydroakustische Sende- und Empfangseinheit zur Messung der Entfernung zum Punkt D – das ist die Position des Tauchers. Mit den bekannten geometrischen Beziehungen lässt sich diese Position jetzt berechnen.

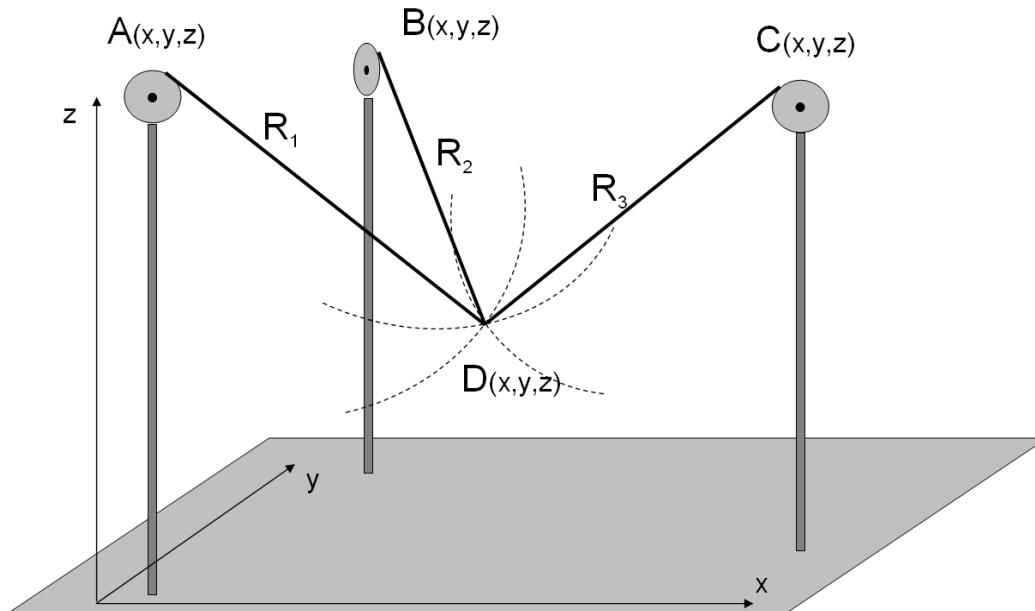


Abb. 5: mechanisches Modell zur räumlichen Messung von Punkten im Raum nach F. Balck.

Vorteile:

Die Koordinatenbestimmung für den Punkt D kann recht genau sein, vorausgesetzt die Messwerte sind fehlerfrei. Je nach betriebenen technischen Aufwand kann das System passiv (nur zur zeitabhängigen Positionsbestimmung) oder zusätzlich noch zur aktiven Navigation durch den Taucher benutzt werden. Sind die Koordinaten für A, B, C bekannt und bleiben unveränderlich, könnte eine sich anschließende Arbeit auch ohne weitere GPS-Nutzung ausgeführt werden! Eine Kabelverbindung zur Wasseroberfläche entfällt.

Nachteile:

Es könnte ein hoher Arbeits- und Zeitaufwand beim Einrichten der Arbeitsstelle für das genaue Einmessen der Eckpunkte A, B, C entstehen. Die Entfernungen zwischen den Eckpunkten sind begrenzt und hängen u. U. stark von den bathymetrischen und hydrologischen Bedingungen am Arbeitsort ab. Auf einige Fehlermöglichkeiten bei hydroakustischer Abstandsmessung wurde ja bereits hingewiesen. Die Strecken AD, BD, CD müssen frei sein von hydroakustischen Hindernissen. Damit wäre das Verfahren in dieser Form wahrscheinlich eher für kleinskalige Vermessungen bzw. Ortung von UW-Objekten geeignet, die sich über einen längeren Zeitraum am

selben Ort hinzieht. Es verlangt einen hohen technischen Aufwand (GPS, Hydroakustik, Kalibrierungen), der sich in den Kosten niederschlagen wird.

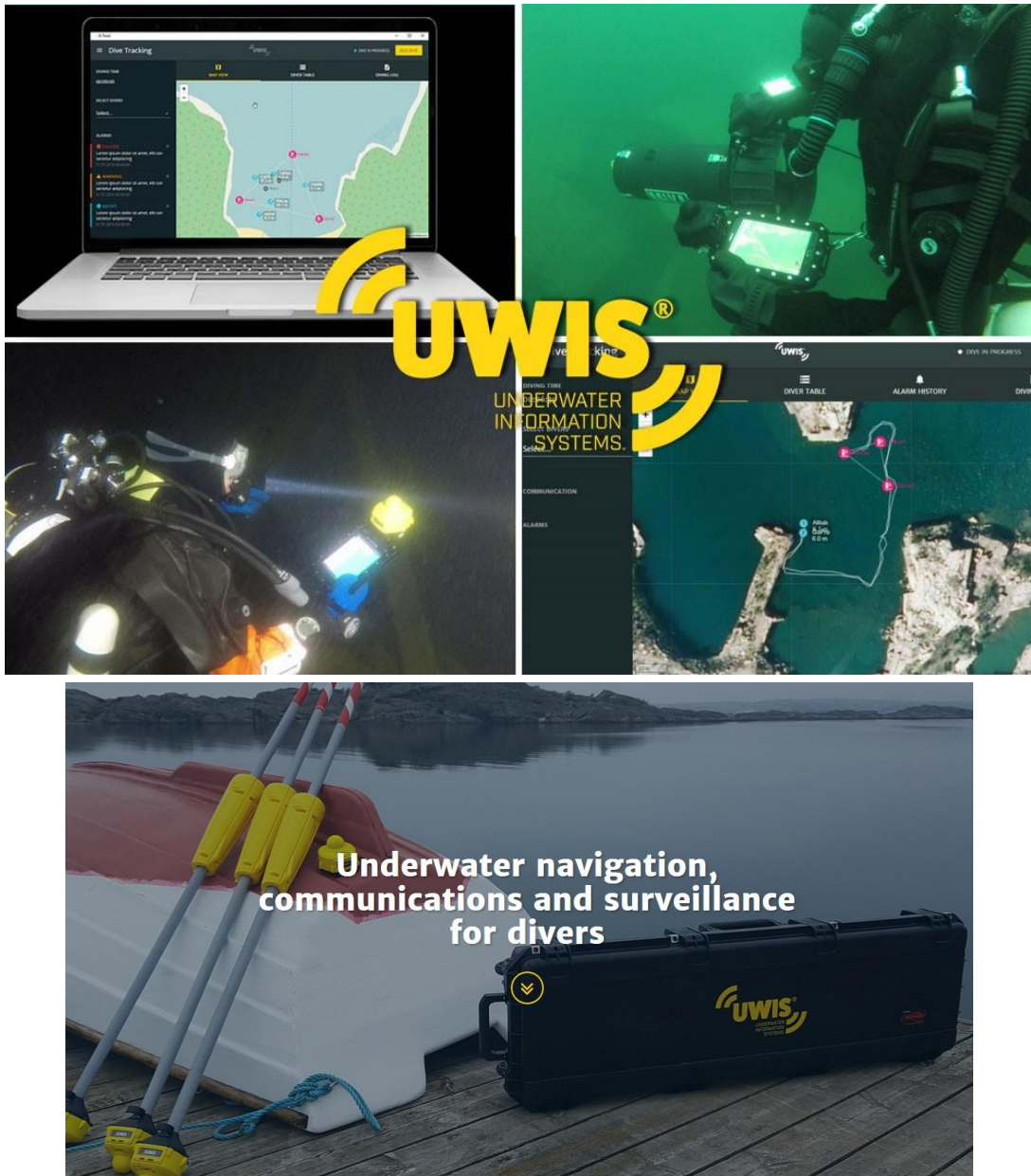


Abb. 6a: Das UWIS-Navigationssystem.

Manchmal entwickeln sich aber die Dinge schneller als erwartet, was zu einer Ergänzung dieser Ausführungen am 23.09.2019 führte. Während einer Weiterbildung für Forschungstaucher in Kristineberg im Sven Loven Centre for Marine Infrastructure 8/2019 durften die Teilnehmer mit Hilfe des in Finnland gebauten UWIS übungshalber navigieren (siehe www.uwis.fi). Das UWIS-Navigationssystem besteht aus 3 an der Wasseroberfläche treibenden Bojen und einem vom Taucher mitgeführten Empfänger (Abb. 6a & b). Die 3 Bojen messen permanent ihre GPS-Position und können so ihre Abstände an der Wasseroberfläche kontinuierlich berechnen. Zusätzlich findet zwischen den 3 Oberflächenbojen und dem Empfänger beim Taucher eine Kommunikation auf hydroakustischer Basis statt. Diese dient der Bestimmung der Abstände



Abb. 7b: Das UWIS-Navigationssystem.

zwischen Taucher und Oberflächenbojen. Damit ist genau die Idee von F. Balck technisch umgesetzt worden. Die treffenden Oberflächenbojen machen das System sehr einfach handelbar. Die o. g. Nachteile zum Einmessen der Oberflächenbojen entfallen. Vom Taucher kann zusätzlich ein UW-Tablett am Empfänger angeschlossen werden, so dass er mit diesem komfortabel interagieren kann. Der finnische Hersteller hebt folgende Merkmale des Navigationssystems hervor:

- bis zu 100 Taucher können gleichzeitig navigieren
- 100 Wegpunkte sind nutzbar
- Aufzeichnung der Tauchdaten: Position, Zeit, Tiefe, Temperatur
- Positionsgenauigkeit: $\pm 2,5$ m
- Tiefengenauigkeit: $\pm 0,1$ m
- max. Tiefe: 100 m; Durchmesser der Arbeitsfläche: 1000 m
- max. Distanz des Computers von der Masterboje: 200 m

Auf der Webseite www.uwis.fi/en/users/scientific-diving wird der besondere Vorteil des UWIS für wissenschaftliche Unterwasserarbeit herausgestellt. Zudem kann die Technik bei Anwendung spezieller Software zusätzlich zur räumlichen Vermessung von Unterwasserobjekten verwendet werden.

4 Zusammenfassung

Die optimale, technisch ausgereifte und gleichzeitig preiswerte Lösung für eine genaue UW-Navigation gibt es derzeit noch nicht. Letztlich ist die verwendete Methode nach folgenden Kriterien auszuwählen, deren Wichtung vom Tauchteam selbst vorzunehmen ist:

- gewünschte bzw. notwendige Genauigkeit bei der Positionsbestimmung und Georeferenzierung von UW-Daten
- Größe des betauchten Gebietes und der dort herrschenden hydrologischen und meteorologischen Bedingungen (Gefahr von Verlust oder Beschädigung)
- Zeitaufwand zur Definition und Kennzeichnung des Untersuchungsgebietes
- verfügbare finanzielle Mittel (Reserven für Ersatzgeräte)
- Reparaturmöglichkeiten am Einsatzort
- Notwendigkeit der flexiblen bzw. mobilen Einsatzfähigkeit der Technik
- Vorhandensein von Schiffen vor Ort
- Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Navigationsdaten

Im Forschungstauchzentrum an der Universität Rostock wird seit mehr als 10 Jahren nach Variante 2a und 2b gearbeitet (siehe Abb. 3). Die Korrektur der GPS-Position entsprechend der Verfahrensweise in Abb. 2 ist in ein selbst geschriebenes Computerprogramm integriert, welches Daten aus den benutzten Geräten zeitlich synchronisiert und nebenbei auch noch einen Untertitel für Video schreiben kann. Auch für Zeitrafferaufnahmen ist die Erstellung solcher Untertitel möglich. Die jetzt vorhandene Hardware (GPS-Handheld im UW-Gehäuse, montiert auf einem Zeichenbrett oder auf einem Scooter, Antennenkabel zur GPS-Boje bis 50 m Länge) hat sich unter praktischen Anforderungen bewährt. Die Georeferenzierung von UW-Messungen und Beobachtungen kann die Qualität der Ergebnisse aus der UW-Feldarbeit erheblich verbessern und wertet Fotos und Videos entsprechend auf. Die Technik ist inzwischen auch unter zum Teil sehr robusten Bedingungen zum Einsatz gekommen; Beschädigungen waren sehr selten. Die wenigen Ausfälle liessen sich oft bereits am Einsatzort reparieren. Die Technologie mit der GPS-Boje lässt sich mit den DGUV-Regeln für das Forschungstauchen zudem sehr gut in Einklang bringen. Außerdem ist es möglich, die GPS-Navigation mit neuen Tauchtechniken zu kombinieren: so lässt sich ein UW-Scooter mit Hilfe von GPS wesentlich besser navigieren (Abb. 7).

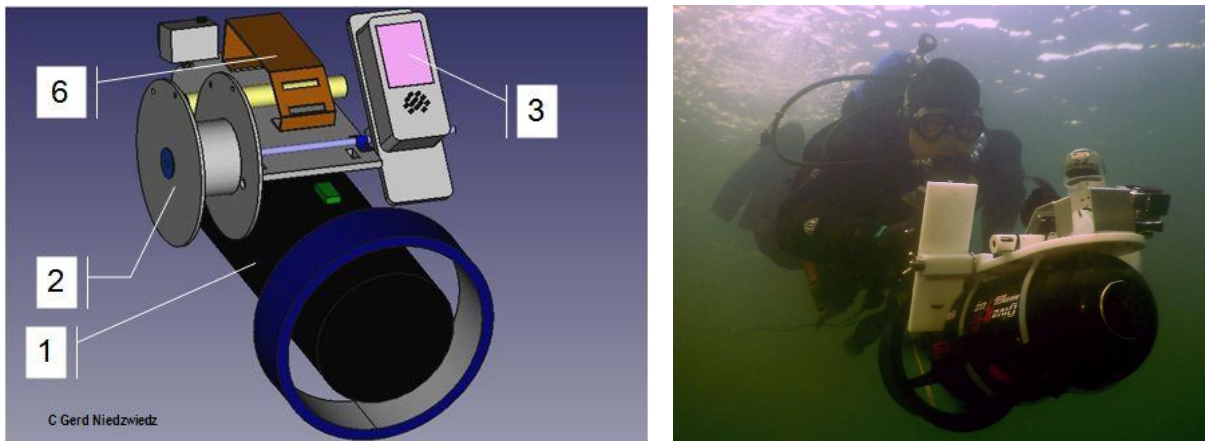


Abb. 8: Scooterkonzept mit GPS-Navigationssystem ergänzt durch UW-Kompass, Videokamera und CTD-Sonde.

Die Fahrstrecke mit UW-Scooter kann 2 – 3-mal länger sein als die abgetauchte Distanz, da der Luftverbrauch deutlich geringer ist. Während der Fahrt wird per Videokamera dokumentiert und mit CTD-Sonde gemessen. So wurden in den letzten Jahren mehrere Taucheinsätze erfolgreich bspw. im Projekt Baltic-TransCoast durchgeführt. Es besteht derzeit nicht unbedingt die Notwendigkeit, andere Navigationstechniken zu verwenden – allerdings durchaus das Interesse, neue Möglichkeiten kennenzulernen und zu testen. Hierbei wäre UWIS eindeutiger Favorit!

Danksagung

Die Autoren möchten sich insbesondere bei Pertti Arvonen von UWIS aus Finnland bedanken, der viele Informationen zum UWIS-Navigationssystem lieferte und die Verwendung firmeneigener Bilder im Artikel erlaubte.