Akustische Unterwasserkommunikation

Jun Chen
Betreuer: Christoph Söllner
Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen SS2010
Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste, Lehrstuhl Betriebssysteme und Systemarchitektur
Fakultät für Informatik, Technische Universität München
Email: chenjun@in.tum.de

KURZFASSUNG

In unserem heutigen Zeitalter spielen die Kommunikation und der dabei stattfindende Informationsaustausch eine sehr große Rolle. Neben der Kommunikation über elektromagnetische Wellen im Medium Luft und im Vakuum verwendet man akustische Wellen unter Wasser. Im dichten Medium Wasser können sich elektromagnetische Wellen nur schwer ausbreiten, wogegen aber Schallwellen keine so hohe Abschwächung erleiden [17]. Daher sind sie mit ihren Eigenschaften und Reichweite für die Kommunikation unter Wasser sehr von Bedeutung. Neben den Fragen der Modulation und Verwendung gibt es hierbei ebenso Grenzen und Probleme durch Störungen, welche im Verlaufe der Arbeit erläutert werden.

Schlüsselworte

Wasserschall, akustische Datenübertragung, FSK, ASK, PSK, QAM, Unterwassersensoren, Sensorennetze, Tsunami-Warnsystem, D.A.R.T. II

1. EINLEITUNG

Die Kommunikation mit Funkwellen unter Wasser erfordert sehr viel Energie. Ebenso erreicht sie nur geringe Reichweite und Datenrate. Akustische Wellen können sich hingegen in Unterwasserumgebungen besonders gut ausbreiten [17].
Die Bedeutung von Unterwasserkommunikation wurde zuerst im Militärbereich für den Wasserkampf mit U-Booten entdeckt. Heutzutage wird sie jedoch immer mehr für kommerzielle und private Anwendungen interessant [17]. Die Anwendung der akustischen Unterwasserkommunikation zur Fernsteuerung von Unterwasserroboter eröffnete neue Möglichkeiten zum Erforschen von unbekannte Tiefen oder bewahrt Menschen vor unangenehme Unterwasserarbeiten wie z.B. bei Ölplattformen.
Durch die Tsunami-Katastrophe im Dezember 2004 wurde die Nachfrage nach effektiver akustischer Kommunikation für Tsunami-Warnsystemen nochmals erhöht [10].
Diese Arbeit ist nach folgendem Schema gegliedert: Als erstes werden die physikalische Gegebenheiten sowie deren Einschränkungen erläutert. Anschließend wechseln wir unseren Fokus in Richtung Datenübertragung und betrachten den Aspekt der Reichweiten und Frequenzen, sowie die Modulation mit Hilfe des Unterwassermodems. Darauf werden zwei Typen von Sensoren mit deren Vor- und Nachteilen betrachtet, gefolgt von der Applikation in Sensorennetzen. Nach der Betrachtung der Grundlagen diskutieren wir diese in deren Praxiseinsatz in einem Tsunami-Warnsystem. Zum Abschluss folgt die Zusammenfassung in der die wichtigsten Punkte nochmals herausgestellt werden.

2. WASSERSCHALL

Die akustische Kommunikation unter Wasser wird mit sogenanntem Wasserschall realisiert. Wasserschall ist Verdichtung und Verdünnung von Wasser, die zu Dichteveränderung führt, weshalb Schall sich allgemein ohne ein Medium nicht ausbreiten kann [18]. Wasserschall wird von einem Sender erzeugt und von einem Empfänger aufgrund dieser Veränderung erkannt.

2.1 Schallgeschwindigkeit unter Wasser

Die Ausbreitung des Wasserschalls hat einen Distanz-Zeitfaktor, die Geschwindigkeit. Sie ist unter Wasser durch Tiefe (bzw. Druck), Temperatur und Salzgehalt bedingt. Mit der Zunahme der Temperatur, der Tiefe und dem Salzgehalt des Wassers nimmt diese ebenfalls zu. In Abbildung 1 sind einige dieser Beziehung nochmals verdeutlicht.
Im Meerwasser beträgt die Schallgeschwindigkeit rund 1450 m/s - 1540 m/s was mehr als ein 4-faches der Geschwindigkeit in der Luft (343 m/s) ist [8]. Eine Formel zur genauen Bestimmung kann [19] entnommen werden.

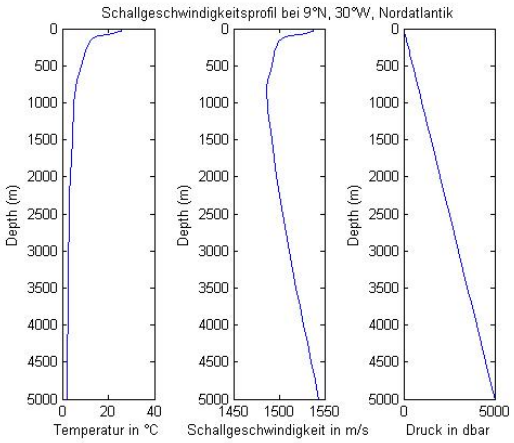

Abbildung 1: Abhängigkeiten der Schallgeschwindigkeit [21]

2.2 Ausbreitung und Frequenzen

Schall breitet sich in Wellenform aus. Im Wasser verbreitet er sich in Longitudinalwellen, d.h. die Schwingung erfolgen in Ausbreitungsrichtung der Welle [13].

Schallwellen haben eine Frequenz die beschreibt wie oft sich diese Welle pro Sekunde wiederholt. Wasserschall nutzt Frequenzbereiche von etwa 10 Hz bis 1 MHz. In diesen Frequenzbereich liegen drei Arten von Schall: Infraschall, Hörschall und Ultraschall (siehe Abbildung 2).

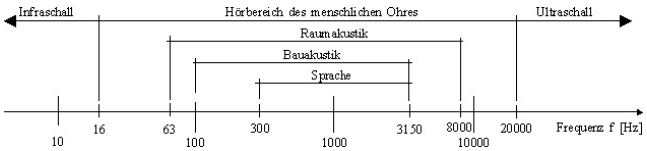

Abbildung 2: Schallarten und deren Frequenzen [14]

2.2.1 Infraschall

Infraschall ist Schall im Frequenzbereich das unter 16 Hz liegt und nicht von Menschen wahrgenommen werden [7].

2.2.2 Hörschall

Hörschall nennt man Frequenzen zwischen 16 Hz - 20 kHz. Wie der Name schon sagt, liegen in diesem Frequenzbereich die Geräusche die der Mensch auch wahrnehmen kann [14].

2.2.3 Ultraschall

Ultraschall gegenüber Infraschall hat einen viel höheren Frequenzbereich das zwischen 20 kHz - 1 GHz liegt und sich oberhalb des vom Menschen wahrnehmbaren Bereich befindet [7].

3. PROBLEME DER UNTERWASSERKOMMUNIKATION

Bei einer Kommunikation unter Wasser kommt es zu einigen Einschränkungen durch Störungen. Störungen schwächen oder verändern das Signal, sodass es zu schlechten Signal-Rausch-Verhältnissen bzw. Signalverlust beim Empfänger kommt. In diesem Abschnitt werden diese Probleme vorgestellt.

3.1 Absorption

Die Absorption ist die Hauptursache für die Reichweitenbeschränkung der akustischen Unterwasserkommunikation.
Die Intensität einer Schallwelle nimmt mit jeder zurückgelegten Einheit der Distanz ab. Die Energie wird von der Umgebung die sie durchdringt teilweise absorbiert, d.h. ein Teil der Schallenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt [17]. Die Absorption nimmt mit steigende Frequenz zu [3]. Hierbei ist die Beziehung der Distanz und der Frequenz sehr wichtig. Die Abnahme der Intensität, von rot zu schwarz, bei 2 kHz ist der Abbildung 3 zu entnehmen. Man erkennt dass diese mit der Distanz abnimmt.

3.2 Reflexion und Streuung

Das Meer ist begrenzt durch die Meeresoberfläche und den Meeresboden. Diese beiden Grenzen dienen nicht nur zum Differenzieren des Meeres von andere Schichten der Erde, sondern setzt ebenso Grenzen für den Schall im Wasser [17]. Beim Auftreffen einer Schallwelle von unten auf die Meeresoberfläche wird dieser bei ruhiger See fast komplett um 180° reflektiert. Durch den Seegang wird dies beeinflusst und kann auch zur Streuung führen. Beim Meeresboden wird diese Eigenschaft durch die Beschaffenheit des Bodens (z.B. Gesteinstyp oder Ebenheit) bestimmt. In Abbildung 3 sind diese Reflexionen oben und unten zu erkennen.
Zusätzlich treten Reflexion und Streuung auch bei Wasserblasen und größeren Objekten wie Fischen auf. Wegen den verschiedenen Temperaturverhältnissen an unterschiedlichen Teilen des Meeres werden Schallwellen gebrochen, sodass sie gegen die Meeresoberfläche oder -boden gelenkt werden.
Reflexion und Streuung verursachen das Problem der Mehrwegausbreitung. Bei der Mehrwegausbreitung werden Signale aufgrund der verschieden langen Wege zeitlich versetzt und erzeugen einen Nachhall was für Unverständlichkeit beim Empfänger sorgt. Ebenso führt diese Eigenschaft zu Intersymbolinterferenzen (ISI) die bei Datenübertragungen durch Überlagerungen der Frequenzen zu Informationsverlust führen [17].
Neben der Absorption ist dies eine der größten Hürden der Unterwasserkommunikation. In Abbildung 4 ist die Reflexion und der Mehrwegausbreitung nochmals grafisch dargestellt.
Die Stärke und Häufigkeit dieses Phänomens wird von der Tiefe, Entfernung und Frequenz der Übertragung bestimmt [17]. Sie ist stärker bei Verbindungen in vertikaler Richtung als in horizontaler Richtung.

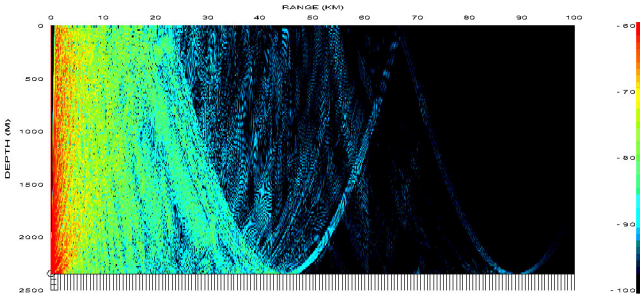

Abbildung 3: Energieverlust bei 2 kHz über 100 km [9]

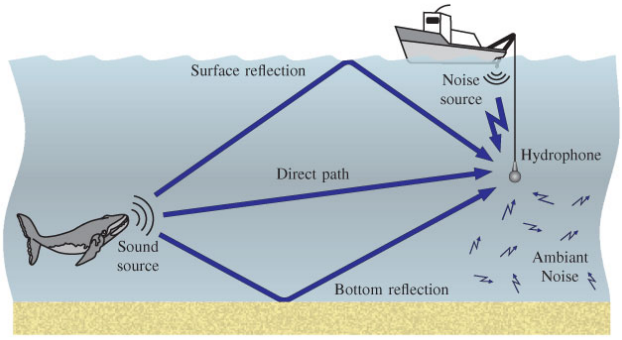

Abbildung 4: Störungen unter Wasser [1]

3.3 Unterwasserlärm

Unterwasserlärm bezeichnet Schallwellen die nicht vom Sender der Verbindung stammen. Der Lärm stört Signale vom Sender und verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) beim Empfänger.
Im Laufe der letzten Jahrezehnte hat der Unterwasserlärm

Tabelle 1: Reichweiten mit ihre Frequenzen [17]

	Reichweite (km)	Frequenz (kHz)
Lang	20 - 2000	0.5 - 10
Mittel	1 - 20	10 - 100
Kurz	< 1	> 100

durch die Erhöhung der Meeresaktivitäten, hauptsächlich des Schiffsverkehrs, drastisch zugenommen. Diese stören nicht nur die akustische Unterwasserkommunikation, sondern auch Meereslebewesen wie z.B. Wale und Delphine die Schallwellen zur Navigation und Kommunikation verwenden [2].
Durch die Aggregation von [19] lässt sich der Lärm in zwei Geräuschekategorien aufteilen:

3.3.1 Künstliche Geräusche

Ursprung direkt oder indirekt von Menschen, z.B. Schiffe, Ölplattformen, Pumpen, Taucher.

3.3.2 Umgebungsgeräusche

Ursprung von Meeresflora und -fauna, geologische Aktivitäten, Strömungen, Regen.

3.4 Zeitliche Verzögerung

Bei der elektromagnetischen Kommunikation basiert die Übertragungsgeschwindigkeit auf der Lichtgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/s. Bei einem Erdumfang von ca. 40.000 km kann ein Signal innerhalb von 1 Sekunde diese 7.5x umrunden. Im Vergleich dazu beträgt die Wasserschallgeschwindigkeit ca. 1500 m/s was $5 \cdot 10^{-6}$ davon darstellt.
Durch diese viel niedrigere Geschwindigkeit muss man bei der akustischen Unterwasserkommunikation die Übertragungszeit viel mehr in Betracht ziehen, was man bei Lichtgeschwindigkeit fast vernachlässigen kann. Aus diesem Grund haben akustische Kommunikationen viel höhere Latenzzeiten als die der Elektromagnetischen. Durch die vielen physikalischen Variablen (Dichte, Temperatur, Salzgehalt) auf lange Distanzen ist es kaum möglich eine genaue Paketumlaufzeit bzw. *round trip time* (RTT) zu bestimmen.

4. REICHWEITEN

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, hängen die Reichweiten der akustischen Unterwasserkommunikation sehr von den Frequenzen ab. Daher müssen unterschiedliche Anwendungen mit verschiedenen Reichweiten ebenso auch verschiedene Frequenzen verwenden. Die Tabelle 1 beschreibt laut [17] die drei typischen Kategorien. Beispielanwendungen für lange Reichweite findet man bei Ozean-Tomographie, mittlere Reichweite meistens bei Kommunikation zwischen Sensorenknoten und Meeresoberfläche und kurze Reichweite haben Kommunikation zu Wartungsrobotern von Ölplattformen.
Generell werden für kurze Entfernungen meist Ultraschall und für lange Entfernungen Infraschall verwendet.
Um eine hohe Datenrate zu erziehen müssen hohe Frequenzen verwendet werden. Doch aufgrund der beschriebene Eigenschaft der Absorption muss man mit steigender Distanz, die verwendete Frequenz senken [17]. Damit wird die Reichweite des Signals erhöht und das SNR optimal gehalten, sodass eine zuverlässige und effiziente Verbindung aufgebaut werden kann.

5. UNTERWASSERMODEM

Das Überwinden der nun kennengelernten physikalischen Hürden macht die akustische Kommunikation unter Wasser möglich. Zum Senden und Empfangen von Daten wird ein Unterwassermodem benötigt. Ein Unterwassermodem hat die Aufgabe Daten in eine Trägerfrequenz zu modulieren und zu versenden, sowie Signale zu empfangen und die Daten daraus zu rekonstruieren (Demodulation).
Die genaue Funktionalität eines solchen Modems kann dem Patent von Troin und Cazaoulou entnommen werden [4].
Im folgenden Abschnitt werden einige Modulationsverfahren gefolgt von den Daten- und Fehlerraten der typischen Signaltypen vorgestellt.

5.1 Modulation

Neben der Abhängigkeit der Datenrate von physikalischen Gegebenheiten, ist es ebenfalls möglich Datenraten zwischen Sender und Empfänger mit Hilfe von Modulationsverfahren zu steigern. Die Modulation ist die Veränderung einer Trägerfrequenz durch die Daten- bzw. Nutzfrequenz. Einfache binäre Modulationsverfahren benötigen zwei Zustände bzw. Sendesymbole zur Darstellung von 0 und 1. Durch komplexere Variation dieser ist es möglich in einen Sendesymbol mehr als nur ein Bit zu übermitteln, wodurch die Datenrate dadurch vervielfacht werden kann. Für die akustische Kommunikation sind hierbei vier Modulationsverfahren besonders interessant.

5.1.1 Frequenzumtastung (FSK)

Die Frequenzumtastung (*frequency-shift keying*) ist ein Frequenzmodulationsverfahren (FM) bei der diskrete Zustände wie 0 und 1 durch diskrete Frequenzänderung dargestellt werden.
In Abbildung 5 ist eine Form dieses Verfahrens grafisch dargestellt. Diese spezielle Form mit zwei Zuständen wird auch 2-FSK bzw. *binary* FSK (BFSK) genannt [11]. Jeder Zustand 0 und 1 (oben) wird durch eine jeweilige Frequenz (unten) dargestellt. Die zu sendende Signale werden durch die Aneinanderreihungen der repräsentativen Frequenzen zusammengesetzt. Wie im Abbildung 5 zu sehen ist wird "1010" dargestellt.
Diese Modulation ist unter Wasser wegen der Abhängigkeiten der Absorption und 1-Bit pro Sendesymbol durch niedrige Datenrate geprägt.

5.1.2 Amplitudenumtastung (ASK)

Die Amplitudenumtastung (*amplitude-shift keying*) ist ein Amplitudenmodulationsverfahren (AM) welches analog zu FSK die Zustände mit Hilfe von unterschiedliche Amplituden moduliert.
Bei einer binären ASK (BASK) bzw. 2-ASK werden zwei verschiedene Amplituden verwendet [11]. An diesen unterschiedlichen Amplituden können dann die zwei Zustände 0 und 1 erkannt werden (Abbildung 6 mitte).
In einer Umgebung mit minimale bzw. keine Störungen kann dies auch einfach durch ein Ein- und Ausschalten des Signals umgesetzt werden. Diese Form der Umsetzung nennt man auch On-Off Keying (Abbildung 6 unten) [11].

5.1.3 Phasenumtastung (PSK)

Die Phasenumtastung (*phase-shift keying*) ist ein Phasenmodulationsverfahren (PM) das Phasenlagen statt diskreter

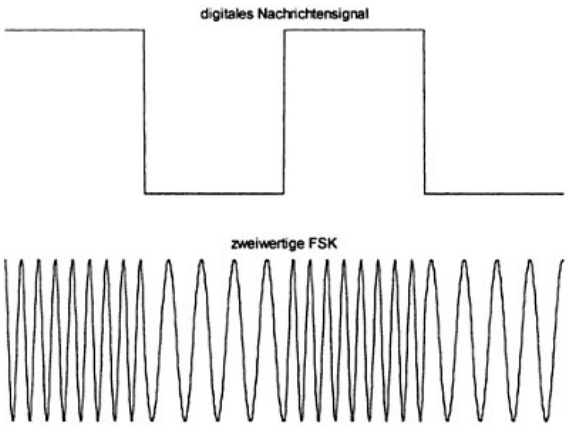

Abbildung 5: Binäre Frequenzumtastung (BFSK) [11]

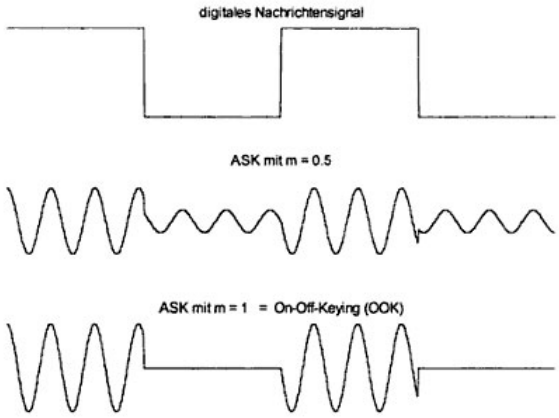

Abbildung 6: Binäre Amplitudenumtastungumtastung (BASK) [11]

Frequenzen zu Modulation nutzt. Dafür verwendet es eine Sinus- oder Kosinus-Trägerfrequenz und moduliert die Zustände als Phasenverschiebung bzw. -sprünge dieser Trägerfrequenz [11].
Abbildung 7 veranschaulicht auch hier die binäre Variante dieses Verfahren. Da diese Variante zwei Zustände benötigt wird die Trägerfrequenz von 0° um 180° verschoben. Nehmen wir nun an die Trägerfrequenz bestehen aus normalen Sinusschwingungen, dann starten die 0-Phasen bei der steigende Kurve und die 1-Phasen bei der fallende Kurve, d.h. die "0" wird mit der normalen und die "1" mit der verschobene Sinusschwingung dargestellt. In unseren Beispiel ist die Sequenz "110100" zu erkennen.
Bei diesem Verfahren bestehen die zu sendenden Signalen aus Aneinanderreihungen der Schwingungen aus verschiedenen verschobenen Phasen der Trägerfrequenz. Die Demodulation dieses Verfahrens muss hierbei kohärent sein, d.h. Sender und Empfänger müssen auf der selben Frequenz operieren, da die Phasen sonst nicht genau erkennbar sind [11].

Quadraturphasenumtastung (QPSK)
Die bis jetzt kennengelernten Verfahren machen es möglich

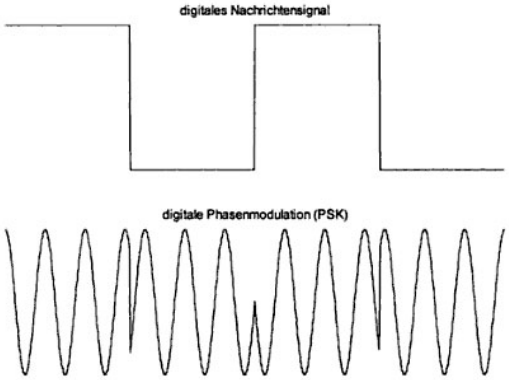

Abbildung 7: Binäre Phasenumtastung (BPSK) [11]

Binärdaten auf drei verschiedene Arten zu versenden. Alle drei sind nicht sehr effizient da sie pro Sendesymbol nur ein Bit übertragen. Eine praktische Variante der PSK ist die Quadraturphasenumtastung (*quadrature phase-shift keying*) bzw. 4-PSK. In dieser Variante besitzt das Verfahren vier Sendesymbole in der jeweils zwei Informationsbits enthalten wodurch die Datenrate verdoppelt werden kann [11]. Ebenso ist sie ein mehrdimensionales Verfahren wie wir gleich sehen werden.
Um diese Variante umzusetzen werden die zu übertragende Bits sozusagen nummeriert und in zwei Teile aufgeteilt, dem Realteil I und Imaginärteil Q. Die Namen der Teile haben keinen Bezug auf die komplexen Zahlen aus der Mathematik, sondern bezeichnen die beiden Dimensionen. I besteht aus den Bits mit ungerader Nummerierung und Q aus die der Geraden. I und Q werden regulär mit BPSK moduliert. Die Besonderheit dabei ist jedoch, dass Q gegenüber I um 90° verschoben ist (Kosinus), welches dadurch orthogonal zu I steht wodurch sie sich nicht gegenseitig stören. Anschließend werden beide modulierte Teile zusammenaddiert und stellt somit das QPSK Signal dar.
Die Abbildung 8 zeigen die beiden Teile aller vier Sendesymbole von QPSK. Auch hier bestehen die zu sendenden Signale aus den Aneinanderreihungen dieser Schwingungen. Die Demodulation eines Sendesymbols kann mit Hilfe eines Konstellationsdiagramms wie in Abbildung 9 veranschaulicht werden. Das QPSK Signal wird am Demodulator zuerst wieder in ihre Bestandteile I und Q getrennt. Da I aus Kosinus-Schwingungen und Q aus Sinus-Schwingungen bestehen ist die Realisierung technisch einfach. Jeder Bestandteil wird darauf parallel abgetastet. Die beiden erhaltene Werte werden im Diagramm an ihre Achsen nachverfolgt. Dadurch erhält man wieder die modulierten Bits.
Die Anordnung der Punkte in diesem Konstellationsdiagramm ist nach dem Gray-Code Schema, bei der die benachbarten Zustände sich jeweils nur um ein Bit unterscheiden. Dadurch gibt es bei gestörten Übertragungen meist nur Fehler in einem Bit, wodurch Übertragungen robuster und Fehlerkorrekturen einfacher werden [11].
Die Kreislinie in Abbildung 9 gibt die Plazierungsmöglichkeiten der Punkte an. Da PSK zwar verschiedene Phasen haben, aber immer die gleiche Amplitude, kann es sich deswegen nur auf der Kreislinie bewegen.

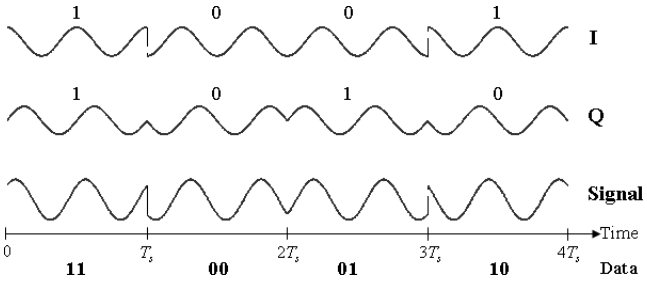

Abbildung 8: Quadraturphasenumtastung (4-PSK oder QPSK) [22]

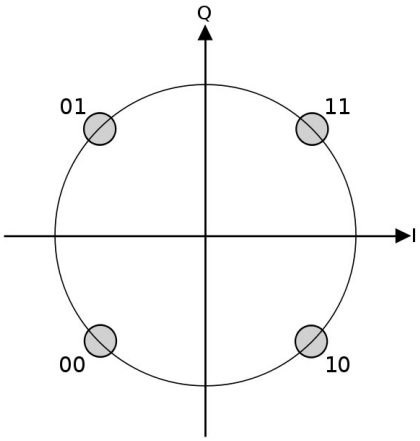

Abbildung 9: Konstellationsdiagramm der QPSK und 4-QAM (ohne Kreisbegrenzung) [23]

5.1.4 Quadraturamplitudenmodulation (QAM)

Quadraturamplitudenmodulation (*Quadrature amplitude modulation*) ist wie die ASK ein Amplitudenmodulationsverfahren. Sie kombiniert dabei ASK und PSK.
Die Implementation erfolgt fast analog zu QPSK mit den Unterschieden, dass die beiden Teile (I und Q) nach der Trennung mit ASK statt PSK moduliert werden und anschließend I mit Kosinus und Q mit dem Minus-Sinus multipliziert werden [5]. Zum Abschluss werden die beiden Teile durch die Summe wieder zusammengefügt und repräsentieren das QAM Signal.
Das Konstellationsdiagramm der 4-QAM ist das selbe wie bei QPSK, da keine verschiedene Amplituden in dem Fall nötig sind. Die Datenrate wird ebenfalls durch die Modulation von zwei Bits je Sendesymbol verdoppelt. Noch höhere Datenraten sind durch Erhöhung der Anzahl der Zustände möglich. Die Erhöhung erfolgt in Schritten der Zweierpotenzen. Ein Beispiel ist das 16-QAM welches 16 Zustände verwendet und somit pro Sendesymbol 4 Bits ($2^4 = 16$) übertragen kann. Theoretisch ist die Erhöhung fast beliebig, doch jede Erhöhung verengt die Räume zwischen den Punkten und somit auch die Toleranzbereiche für die Demodulation.
Die Konstellationsdiagramme mit 16 und 32 Zustände sind der Abbildung 10 zu entnehmen. In den Diagrammen kann man erkennen, dass die Amplitude eine wichtige Rolle spielt. Da sich die Punkte nicht wie bei QPSK immer auf einer Kreislinie befinden, können sie unterschiedliche Amplituden besitzen. Ein Beispiel sind die Zustände "0011" und "0000" der 16-QAM welche die selbe Phase, aber unterschiedliche Amplituden besitzen.

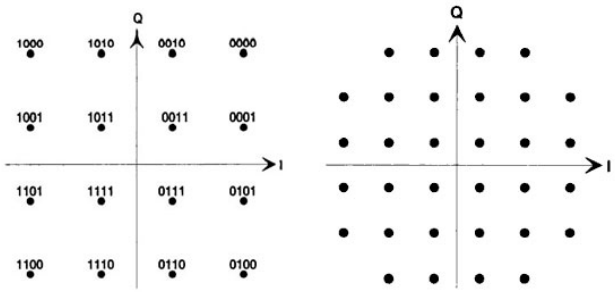

Abbildung 10: Konstellationsdiagramm der 16-QAM (links) und 32-QAM (rechts) [11]

5.2 Signaltypen mit Datenraten und Fehlertoleranzen

Je nach Anwendung hat ein Unterwassermodem verschiedene Datenraten mit den zugehörigen akzeptablen Fehlerraten. Laut [17] gibt es drei Signaltypen die unter Wasser übertragen werden.

5.2.1 Kontrollsignale

Diese Signale dienen der Wartung und Kontrolle der Sensoren. Sie erfordern eine hohe Zuverlässigkeit mit niedriger Fehlerrate, sodass eine Datenrate von unter 1 kb/s ausreichen

5.2.2 Messdaten

Messdaten haben dagegen andere Anforderung. Neben den vielen Zahlenwerten beinhalten sie ebenfalls sehr kleine Bilddaten weshalb eine Datenrate ab 10 kb/s nötig sind. Gegenüber der Kontrollsignale besteht hier keine so hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit, sodass eine Fehlerrate von $10^{-3} - 10^{-4}$ akzeptabel sind.

5.2.3 Multimediasignale

Die höchsten Datenraten werden für Multimediasignale benötigt. Wegen der hohen Qualität bzw. hohe Datenmengen werden Datenraten von 10 - 500 kb/s benötigt. Hierbei ist eine Fehlerrate bis 10^{-4} vertretbar.

6. UNTERWASSERSENSOREN

Unterwassersensoren werden verwendet um über eine lange Zeit einen Bereich des Meeres zu überwachen und Daten zu sammeln, die von Wissenschaftler ausgewertet werden. Die Anwendungen sind sehr vielfältig. Beispielsweise können Sensoren die Strömung und die Temperatur vom Golf von Mexiko protokollieren oder regelmäßig Wasserproben entnehmen und deren Bestandteile messen um den Verlauf der Verschmutzung herauszufinden. Die Vielfalt ist allein durch die Vorstellungskraft des Menschen begrenzt.
Generell bestehen Hightech Unterwassersensoren aus vier Hauptkomponenten:

- Sensorenknoten
- Anker

- Bergungsmechanismus
- Treibeinheit

Im folgenden Abschnitt werden zwei Arten von Sensorenknoten und deren Vor- und Nachteile betrachtet.

6.1 Akustischer Bergungsmechanismus

Ein wichtiger Mechanismus den beide Sensorentypen gemeinsam haben, ist der Mechanismus zum Bergen. Dafür wird über die akustische Kommunikation ein sogenannter Release-Befehl an das Bergungsmodul des Sensorenknotens gesendet, der nach Verifikation des Befehls die Befestigung des Ankers löst oder durchtrennt, sodass der Knoten durch die Treibeinheit an die Meeresoberfläche treiben kann.
Abbildung 11 stellt ein solches Bergungsmodul dar. Bei diesem Mechanismus wird der rote Teil eingezogen und somit den Anker gelöst.
Solche Systeme verwenden nur Kontrollsignale und arbeiten je nach Entfernung auf niedrige bis mittelhohe Frequenzen.

Abbildung 11: Bergungsmechanismus der Firma Sonardyne [15]

6.2 Traditionelle Sensorenknoten

Eine einfache Methode um Messdaten vom Meeresgrund zu erhalten sind die traditionellen Sensorenknoten [16]. Diese Sensoren werden bei der Verwendung an einen zu überwachenden Bereich des Gewässers transportiert und dort versenkt und später wieder geborgen.
Während der Sensorenknoten im Wasser ist sammelt er die vorgesehenen Daten und speichert sie auf seinem Datenträger. Sind die benötigten Daten komplett oder die Kapazität der Batterie bzw. der Datenträger des Knotens erschöpft, wird der Knoten geborgen und die Wissenschaftler können die gesammelten Daten auswerten.

6.2.1 Vorteile

Die traditionelle Methode ist viel kostengünstiger als die folgende Echtzeitvariante. Durch das Versenken und die Bergung von Sensorenknoten entstehen nur hierfür, sowie den Transport, Kosten.
Wegen der Abgeschiedenheit ohne Kommunikation in der Messphase ist der Energiebedarf konstant klein sodass der Energievorrat relativ lange nutzbar ist.

6.2.2 Nachteile

Wie schon vorher angedeutet hat der Sensor begrenzte Kapazitäten an Energie und Speicherplatz. Das Ausnutzen von Solarenergie für den Energiebedarf kann aufgrund der Dunkelheit in der Tiefe des Meeres nicht verwendet werden.
Durch die späte Interaktion und Überprüfung des Sensorenknotens beim Bergen können eventuelle Probleme durch Beschädigung oder Fehlkonfiguration erst am Ende der Messphase erkannt werden. Zu diesem Zeitpunkt kann es bereits zu spät sein und somit das gesamte Projekt zum Scheitern bringen [16].

6.3 Echtzeit-Sensorenknoten

Die neuere Methode basiert auf Sensorenknoten die über eine konstante Verbindung zu den Wissenschaftlern der Kontrollstationen verfügen [16].
Für die Verbindung benötigt man neben dem Sensorenknoten noch eine Relay-Boje zwischen der Oberfläche und dem Meer, sowie einen Satelliten. Der Satellit ist meist nötig da die zu überwachende Bereiche weit vom Land entfernt sind und dadurch ebenfalls die Übertragung beschleunigt werden kann.
Die generelle Funktionalität lässt sich wie folgt beschreiben: Zuerst sendet der Sensorenknoten Daten über die akustischen Kommunikation zur Relay-Boje. Diese leitet es über eine elektromagnetische Kommunikation zum Satelliten weiter. Vom Satelliten aus werden die Daten dann an die Kontrollstationen am Land geschickt. Eine grafisches Darstellung (Abbildung 12) dieser Methode kann später am Praxisbeispiel in einem Tsunami-Warnsystem entnommen werden.

6.3.1 Vorteile

Mit der konstanten Verbindung ist eine Echtzeitüberwachung der Sensoren, sowie Messdaten möglich. Durch die bidirektionale Verbindung können Wissenschaftler von der Kontrollstation aus direkt die Sensoren warten und neu konfigurieren [16].
Da die Messdaten über die Verbindung sofort weitergeleitet werden, benötigt es nicht unbedingt Datenträger zum Speichern von Messdaten, wodurch die Speicherprobleme von traditionellen Sensorenknoten beseitigt sind.

6.3.2 Nachteile

Zu den Nachteilen zählt auch bei dieser Methode die fehlende Möglichkeit der Nutzung von Solarenergie, sodass die Energiekapazitäten begrenzt sind.
Wegen den zusätzlichen benötigten Geräte für die Verbindung zur Kontrollstation entstehen viel höhere Kosten im Gegensatz zur traditionellen Methode.
Die Möglichkeit der Kommunikation während der Messphase erzeugt ebenso einen höheren Energiebedarf was höhere Anforderungen an die Energieversorgung stellt.

6.4 Fazit

Beide Systemen haben ihre Vor- und Nachteile. Die Wahl wird meist durch die Kosten- und Zeitfaktoren getroffen. Die Echtzeit-Sensorenknoten haben hohe Flexibilität und erzeugen schnelle Resultate wogegen traditionelle Sensorenknoten niedrige Kosten und schnelle Umsetzung bringen.

7. UNTERWASSER SENSORENNETZE

Ein Sensorenknoten hat sehr begrenzte Energiereserven und Messreichweiten. Um eine größere Fläche abzudecken werden oft mehrere solcher Sensorenknoten benötigt. Mit Echt-

zeit-Sensorenknoten, die eine lokale bidirektionale Kommunikation erlauben, entstehen sogenannten Sensorennetze.
Vorteile dieser Netze liegen in den Erweiterungen der Messreichweite durch Synchronisation untereinander, der Verbindungsreichweite und Energiereserven mit Hilfe von Routingprotokollen die Hops erlauben. Durch höhere Anzahl an Sensorenknoten entsteht jedoch mehr Datenverkehr was zu gegenseitigen Störungen führt. Daher ist es besonders sinnvoll in einen Unterwassernetz Routingknoten einzusetzen, die horizontal auf kurze Entfernung mit den Sensorenknoten kommunizieren und Daten vertikal auf mittellanger Entfernung zur Boje weiterleiten. Dadurch können die Übertragungen von Sensoren durch höhere Datenraten verkürzt, sowie die Energiereserven geschont werden.

8. PRAXISANWENDUNG

Unterwasserkommunikation findet in vielen Bereichen Anwendungen. Neben dem Einsatz in Sonar- oder Echolotgeräten, wurde sie in der Vergangenheit hauptsächlich in Militärbereich verwendet.
Eines dieser Militärprojekte ist das SOSUS (Sound Surveillance System) der USA welches in den 50er Jahren zur Überwachung der sowjetische U-Boote verwendet wurde. Sie nutzt Hydrophone die auf den Meeresgrund installiert sind um passiv nach U-Boot-Geräuschen zu lauschen. Die Verbindung zur Kontrollstation kam mit Hilfe eines langen Unterwasserkabels zustande [20].
Neben dem Einsatz der Unterwasserkommunikation im Militärbereich ist deren praktische Anwendung in lebensrettenden Tsunami-Warnsystemen sehr von Bedeutung [6]. Im nächsten Abschnitt werden die Verwendung der vorher eingeführten Unterwassersensoren anhand eines Tsunami-Warnsystems vorgestellt.

8.1 Tsunami-Warnsystem: D.A.R.T. II

Ein Tsunami-Warnsystem soll eine drohende Tsunami-Welle schon weit vorm Erreichen der Ufer erkennen und die Menschen vor dieser Drohung frühzeitig warnen. Eine der essentiellen Komponenten ist die Kommunikation zwischen den Drucksensoren auf dem Meeresgrund und der Relay-Boje an der Meeresoberfläche welche die Information an bemannte Kontrollstationen am Land weiterleitet. Diese zeitliche Anforderungen erfordern Echtzeit-Sensorenknoten.

8.1.1 Einleitung

Eines der aktuellen Tsunami-Warnsysteme ist das D.A.R.T. II (Deep ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) Projekt vom US National Oceanic and Atmosperic Administration. Dieses Projekt überwacht vor allem das Pazifische Meer, sowie den amerikanischen Teil des Atlantik.

8.1.2 Spezifikation

Die Sensoren besitzen einen 32 Bit, 3.3V Motorola 68332 Mikrocontroller mit 4MB Flash Speicher und 512 Byte RAM. Die Verbindung zwischen Sensoren und die Boje operiert auf Frequenzen 9 - 14 kHz mit einer Geschwindigkeit von 600 Baud. Zur Übertragung der Daten wird eine Variante der FSK verwendet. Zur Energieversorgung besitzen die Sensoren zwei Batteriepacks (Modem 1.560 Wh, Mikrocontroller 2.000+ Wh) die ungefähr vier Jahre ausreichen, je nach Auslastung auch weniger. Die Energiereserve der Boje besteht ebenso aus zwei Batteriepacks (Modem 1.800 Wh, Mikrocontroller und Satellitenverbindung 2.569 Wh), aber halten nur zwei Jahre [6].

Zusammenfassung:

- Mikrocontroller: 32 Bit, 3.3V Motorola 68332
- Speicher: 4 MB Flash und 512 Byte RAM
- Unterwassermodem: Benthos ATM-880
  - Frequenzen: 9 - 14 kHz
  - Datenrate: 600 Baud (Symbole pro Sekunde)
  - Modulation: MFSK (Multifrequenzumtastung)
- Energieversorgung: Batteriepacks Typ D (Mono)
  - Sensoren 4 Jahre
  - Boje 2 Jahre

8.1.3 Funktionaliät

Die Funktionalität dieses Systems ist in Abbildung 12 skizziert. Zuerst werden Drucksensoren in seismologisch kritischen Gebieten, z.B. an Kontinentalplattenrändern, plaziert. Nahe jedem dieser Sensoren wird ebenfalls eine Boje, zur Weiterleitung an Satelliten, installiert. Die Drucksensoren messen kontinuierlich Vibrationen der Erde und Wellengang. Dafür besitzen sie auf der Sensoren-Seite zwei automatische Benachrichtigungsmodi [6].

Standard Modus: Bei regulären Aktivitäten befinden sich die Sensorenknoten in einer Art Bereitschaftsmodus mit niedrigem Energieverbrauch. Ohne ungewöhnliche Aktivitäten leiten sie alle 6 Stunden Messdaten, wie z.B. durchschnittliche Wellenhöhe, Energiestand und Zeitstempel, an die Kontrollstationen weiter, welche daran erkennen können ob das System korrekt arbeitet.

Event Modus: Kommt es zu einer größeren Erschütterung bzw. übersteigen die Messewerte einen Schwellenwert, so alarmieren die Sensoren selbstständig die Kontrollstationen. Dazu senden sie diese Messdaten über die akustische Kommunikation an die Boje, welches diese darauf über einen Satelliten per elektromagnetische Kommunikation an die Kontrollstationen weiterleitet. Nach einer kurzen Überprüfung auf Fehlerfreiheit entscheiden die Mitarbeiter der Station ob eine Tsunami-Warnung ausgesandt werden muss.

Neben den beiden automatischen Modi, besitzen die Sensoren ebenfalls einen manuellen Modus mit der Wissenschaftler auf der Kontrollstation-Seite außerplanmäßige Abfragen und Wartungsarbeiten tätigen können.

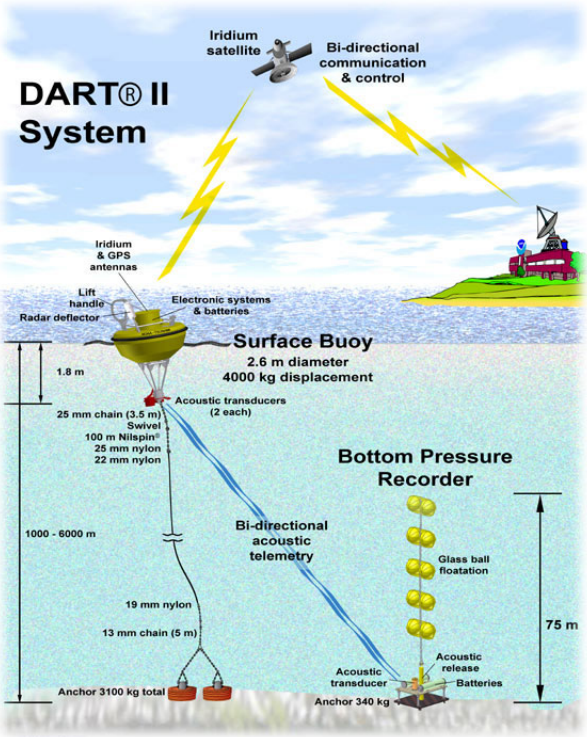

Abbildung 12: Funktionalität eines Tsunami-Warnsystems [12]

9. ZUSAMMENFASSUNG

Damit der Mensch auch die Möglichkeit hat, die unerreichbaren Tiefen der Gewässer zu erkunden wird die drahtlose Unterwasserkommunikation benötigt. Wegen der hohen Abschwächung der elektromagnetischen Signale unter Wasser musste eine andere Möglichkeit der Kommunikation gefunden werden. Dafür bieten sich die akustische Signale an die wir in dieser Arbeit näher kennengelernt haben.
Zuerst haben wir die physikalischen Grundlagen von Wasserschall betrachtet. Die Geschwindigkeit, deren Ausbreitung und die drei relevanten Frequenztypen.
Die Probleme der Unterwasserkommunikation durch Absorption, Reflexion, Streuung, Mehrwegausbreitung, Unterwasserlärm und die zeitlichen Verzögerungen waren Thema des folgenden Kapitels. Die Absorption ist die Umwandlung von einem Teil der Schallenergie in Wärmeenergie. Sie steigt mit der Frequenz und Distanz. Reflexion und Streuung treten beim Auftreffen von Schallwellen auf Meeresoberfläche und -boden, sowie große Objekte auf. Sie führen zu Mehrwegausbreitungen die zeitlich versetzte Signale verursachen und ISI erzeugen. Neben der Störung durch unerwünschten Unterwasserlärm, sind die Latenzzeiten der Verbindung recht hoch.
Die Reichweiten hängen stark von der verwendeten Frequenz ab. Bei hoher Reichweite benötigt man Infraschall und für niedrige Reichweiten ist Ultraschall nutzbar.
Um Daten senden zu können benötigt man ein Unterwassermodem das die Daten zum Senden in Trägerfrequenzen moduliert. Dafür haben wir mehrere Modulationsverfahren (FSK, ASK, PSK, QPSK und QAM) kennengelernt. Durch Modulation von mehreren Bits in einem Sendesymbol können höhere Datenraten erzielt werden.
Das Unterwassermodem wird in Unterwassersensoren verwendet und dient bei traditionellen Sensorenknoten nur zur Bergung. Echtzeit-Sensorenknoten nutzen es aktiver. Sie haben eine konstante Verbindung zur Kontrollstation und können in Echtzeit Daten übermitteln und Befehle empfangen. Die aktive Nutzung führt auch zum Aufbau von Sensorennetzen welche Messbereiche, Energiereserven und Verbindungsreichweiten erweitern können.
Zum Abschluss wurden Praxisanwendungen vorgestellt. Dazu haben wir speziell ein Tsunami-Warnsystem mit seiner Funktionsweise und Spezifikation betrachtet.

10. LITERATUR

[1] A. Q. Arnaud Jarrot, Cornel Ioana. Denoising underwater signals propagating through multi–path channels, 6 2010. http://www.ensieta.fr/e3i2/images/E3I2/Publi/publi/JARROT_05a.pdf.

[2] S. Donner. Lärm unter wasser: Von wegen stiller ozean. Online Artikel, 10 2009. http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,652873,00.html.

[3] R. E. Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements: Part i: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3):896–907, 1982.

[4] M.-S. F. Georges Troin and N. F. Claude Cazaoulou. Underwater acoustic transmission method and equipment to improve the intelligibility of such transmissions. Patent, 11 1996. US 5572485.

[5] P. D.-I. habil. Günter Söder. Underwater acoustics. Vorlesung, 6 2010. www.lnt.ei.tum.de/download/2010_NT1_Soeder/NT1_Kapitel6.pdf.

[6] S. E. S. Hugh B. Milburn, Christian Meinig and A. I. Nakamura. Real-time deep-ocean tsunami measuring, monitoring, and reporting system: The noaa dart ii description and disclosure. Technische Spezifikation, 6 2010. http://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart_ii_description_6_4_05.pdf.

[7] I. K. Jürgen Kiefer. *Allgemeine Radiologie: Strahlenanwendung, Strahlenwirkung, Strahlenschutz.* Georg Thieme Verlag, 2003.

[8] P. D.-I. D. Kraus. Underwater acoustics. Vorlesung, 6 2010. http://homepages.hs-bremen.de/~krausd/iwss/uwa.html.

[9] M. G. Lee Freitag, Milica Stojanovic and S. Singh. Acoustic communications for regional undersea observatories. In *In Proc. Oceanology Intl*, 2002.

[10] N. Magazine. U.s. announces plan for an improved tsunami detection and warning system. Ankündigung, 6 2010. http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/s2369.htm.

[11] M. Meyer. *Kommunikationstechnik. Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung.* Vieweg Verlag, 2002.

[12] U. N. Oceanic and A. Administration. Dart ii system, 6 2010. http://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart_mooring.jpg.

[13] D. D. Russell. Longitudinal and transverse wave motion, 6 2010. http://paws.kettering.edu/~drussell

/Demos/waves/wavemotion.html.

[14] U.-P. D. M. J. Setzer. Schall. Online Buch, 6 2010. http://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall /indexschall.htm.

[15] Sonardyne. Acoustic release transponders. Produktkatalog, 6 2010. http://www.sonardyne.co.uk/Products /ReleaseActuation/systems/acoustic_releases.html.

[16] E. Sozer, M. Stojanovic, and J. Proakis. Underwater acoustic networks. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 25(1):72 –83, jan 2000.

[17] M. Stojanovic. Underwater acoustic communications. In *Electro/95 International. Professional Program Proceedings.*, pages 435 –440, 21-23 1995.

[18] Trikustik. Akustik lexikon. Lexikon, 6 2010. http://www.trikustik.at/wissen/akustik.html.

[19] R. J. Urick. *Principles of Underwater Sound*. McGraw Hill, New York, 1975.

[20] E. C. Whitman. Sosus the "secret weapon" of underwater surveillance. Online Artikel, 6 2010. http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_25 /sosus.htm.

[21] Wikipedia. Beispiel eines schallgeschwindigkeitsprofils, 6 2010. http://upload.wikimedia.org /*wikipedia*/*de*/2/26/Schallgesch_nordatl.jpg.

[22] Wikipedia. Timing diagram for qpsk, 6 2010. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b /be/QPSK_timing_diagram.png.

[23] Wikipedia. Timing diagram for qpsk, 6 2010. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f /QPSK_Gray_Coded.svg.