# **Akustische Unterwasserkommunikation**

Markus Grimm Betreuer: Christoph Söllner Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen SS2011 Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste, Lehrstuhl Betriebssysteme und Systemarchitektur Fakultät für Informatik, Technische Universität München Email: grimmm@in.tum.de

## KURZFASSUNG

Die drahtlose Unterwasserkommunikation eröffnet ein weites Anwendungsgebiet im Bereich der zivilen und militärischen Überwachung und Erkundung der Ozeane. Sensornetze, bestehend aus unter und über Wasser ausgesetzten Sensorknoten, nutzen dabei Ultra- und Infraschall zur Kommunikation, um Daten im Wasser zu übertragen. Dabei werden sowohl stationäre Sensorknoten (Bojen und Bodenmesseinheiten) als auch mobile autonome Unterwasserfahrzeuge verwendet.

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Probleme, die mit der akustischen Kommunikation unter Wasser verbunden sind und stellt entsprechende Lösungsansätze vor. Es wird zudem auf die gängigen Modulationsverfahren eingegangen und anschließend ein Überblick über aktuelle Anwendungen gegeben.

#### Schlüsselworte

Akustische Unterwasserkommunikation, Modulationsverfahren, ASK, FSK, PSK, OFDM, Unterwasser Sensornetze, Unterwassersensoren, Tsunami-Frühwarnsystem

## 1. EINLEITUNG

Schallwellen sind für die Kommunikation im Ozean von hoher Bedeutung, denn im Unterschied zu elektromagnetischen Wellen absorbiert Wasser Schallwellen kaum. Elektromagnetische Wellen haben in Wasser nur eine Reichweite von wenigen hundert Metern, Schallwellen hingegen können abhängig vom Einsatzszenario Reichweiten von über 1000 km erreichen. Wegen der elektrischen Leitfähigkeit von Salzwasser benötigt man zur Kommunikation mit elektromagnetischen Wellen unter Wasser viel Energie. Nur mit relativ niedrigen Frequenzen unter 300 Hz kann über weitere Strecken kommuniziert werden [16]. Hierfür werden jedoch relativ große Antennen benötigt. Hochfrequente elektromagnetische Wellen hingegen werden schon in geringen Tiefen weitestgehend abgeschirmt. Daher finden unter Wasser in der Regel Schallwellen Anwendung zur Kommunikation, zur Ortung und zum Zwecke der Navigation [16].

Die drahtlose Kommunikation unter Wasser eröffnet eine Reihe von militärischen und zivilen Anwendungsbereichen: Sie wird eingesetzt bei der Überwachung von klimatischen, biologischen und seismographischen Veränderungen in den Ozeanen, zur Erkundung der Meeresböden u.a. für die Erschließung neuer Ölvorkommen, aber auch zur Erkennung von feindlichen U-Booten und Minen. Nicht zuletzt durch die großen Tsunami Katastrophen von 2004 und 2011 ist ein reaktionsschnelles Tsunami-Frühwarnsystem von globalem Interesse, dessen Grundlage schnelle und effiziente Kommunikationsstrukturen sind.

Oftmals werden hierfür Sensornetze eingesetzt, die aus verteilten Sensorknoten, ausgestattet mit den jeweiligen Messeinrichtungen und Vorrichtungen zur Kommunikation, bestehen, um kollaborativ Monitoring-Aufgaben auszuführen. In dieser Arbeit werden zunächst die physikalischen Grundlagen der Ausbreitung von Schallwellen unter Wasser behandelt. Im Anschluss wird die Übertragung von Daten unter Wasser näher betrachtet und dabei auf den Aspekt der Modulation mit Hilfe eines Unterwassermodems eingegangen. In Abschnitt 4 werden darauf aufbauend die Bestandteile von Unterwassersensornetzen beschrieben. Nach der Betrachtung der Grundlagen werden zwei Anwendungen von Schallwellen unter Wasser vorgestellt und im Speziellen ein System zur Tsunami-Früherkennung vorgestellt. Als Abschluss werden die wichtigsten Aspekte bei der akustischen Unterwasserkommunikation noch einmal zusammengefasst und ein kurzer Ausblick auf die zukünftige Entwicklung in diesem Bereich gegeben.



Abbildung 1: Konzeptzeichnung eines Unterwassersensornetzes [3]

## 2. GRUNDLAGEN DES WASSERSCHALLS

In diesem Abschnitt werden die physikalischen Grundlagen der Schallausbreitung im Wasser behandelt, um einen Überblick über die Anforderungen an Systeme zur akustischen Kommunikation im Ozean zu geben.

Schall breitet sich in Wellenform aus, unter Wasser erfolgen die Schwingungen in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwelle).

Der für die Kommunikation benutzte Frequenzbereich liegt zwischen 10Hz und 1 MHz [5]. Diese Frequenzen liegen innerhalb der Frequenzbereiche des Infraschalls (< 16 Hz), des Hörschalls (16 Hz bis 20 kHz) und des Ultraschalls (20 kHz bis 1,6 GHz).

## 2.1 Schallgeschwindigkeit im Wasser

Die Geschwindigkeit von Schallwellen unter Wasser hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab: Druck, Wassertemperatur und Salzgehalt. Bei einer Temperatur von 20°C und unter atmosphärischem Druck beträgt die Schallgeschwindigkeit in Wasser 1484 m/s, wohingegen sich der Schall in Luft nur mit einer vergleichsweise geringen Geschwindigkeit von ungefähr 340 m/s bewegt. Bei zunehmender Tiefe (bzw. Druck), Salzgehalt oder Temperatur nimmt die Schallgeschwindigkeit zu [13].

Abhängig von der geografischen Breite und damit der Wassertemperatur in den oberen Wasserschichten wird der durch die Druckzunahme bedingte Geschwindigkeitsanstieg bis in etwa 1km Tiefe durch die Temperaturabnahme überlagert. Ab dieser Tiefe ist die Wassertemperatur konstant bei etwa 4°C [19]. Das daraus resultierende Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit zur Tiefe ist schemenhaft in Abbildung 2 zu sehen.

Nach dem Brechungsgesetz wird eine Schallwelle immer in Richtung der niedrigeren Ausbreitungsgeschwindigkeit hin gebrochen. Schallwellen, die im Bereich der minimalen Schallgeschwindigkeit emittiert wurden, werden daher innerhalb dieser Wasserschicht "fixiert". Dadurch können sich die Schallwellen innerhalb dieses Kanals (dem sog. SOFAR-Kanal) über weite Strecken ausbreiten (vgl. Abbildung 2).

Direkt unterhalb der Meeresoberfläche ist die Temperatur häufig am höchsten und nimmt dann bis in ca. 50 m Tiefe relativ schnell ab. Dies hat zur Folge, dass Schallwellen, die sich unter- bzw. oberhalb dieser Grenze bewegen, aufgrund von Brechung die jeweils andere Schicht nicht erreichen können. Diese sog. akustische Schattenzone beeinflusst die Kommunikation zwischen diesen Wasserschichten stark [13].



#### Abbildung 2: Links: Schematisiertes Geschwindigkeitsprofil, Rechts: Schallausbreitung im SOFAR Kanal, Gepunktet: SOFAR Kanal [13, 19]

Die Schallgeschwindigkeit in Wasser ist zudem von der Frequenz abhängig, wodurch es zu Dispersionserscheinungen kommt. Dispersion beschreibt die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Frequenz einer Welle. Dieser Effekt kann, je nach relativer Bandbreite der Signale, zu erheblichen Laufzeit- bzw. Pulsformänderungen führen [13].

## 2.2 Mehrwegausbreitung

Infolge von Reflexionen am Meeresboden bzw. an der Wasseroberfläche kommt es zu unterschiedlich langen Laufwegen der Signale (die sog. Mehrwegausbreitung). Die dadurch auftretenden Amplituden- und Phasenschwankungen nehmen mit wachsender Entfernung von der Schallquelle zu, was sich auf die Anforderungen an das Modulationsverfahren und die mögliche Datenrate auswirkt. Man spricht hierbei von Intersymbolinterferenz [13].

## 2.3 Doppler-Effekt

Bewegungen von Sender oder Empfänger führen aufgrund des Doppler-Effekts zu Frequenzverschiebungen und damit zu einer Ausdehnung der Frequenzbandbreite. Dieser Effekt tritt nicht nur bei Tauchrobotern durch kontrollierte Bewegungen auf, sondern auch bei Bojen und Unterwassermesseinheiten, die Seegang und Strömungen ausgesetzt sind. Die Größenordnung des Doppler-Effekts ist proportional zum Verhältnis der Bewegungs- zur Ausbreitungsgeschwindigkeit [18]. Aufgrund der im Vergleich zu elektromagnetischen Wellen relativ niedrigen Geschwindigkeit der Schallwellen wird das Signal durch die Frequenzverschiebung deutlich stärker verzerrt als dies z.B. bei terrestrischem Funk der Fall wäre.

## 2.4 Unterwasserlärm

Als Unterwasserlärm werden Schallwellen bezeichnet, die nicht direkt vom Sender erzeugt werden. Dabei handelt es sich zum einen um natürliche Umgebungsgeräusche, erzeugt durch Wind, Strömungen, Regen, seismologische Aktivitäten oder Meeresbewohner. Den größeren Teil des Unterwasserlärms stellen dabei aber künstlich erzeugte Geräusche von Schiffen, Ölplattformen oder Pumpen dar.

Unterwasserlärm ist am stärksten im niederfrequenten Bereich und nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Je nach verwendetem Frequenzband können diese Geräusche das Signal-Rausch Verhältnis dadurch unterschiedlich stark beeinflussen [19]. Bei der Verwendung von höheren Frequenzbändern nimmt der Effekt demnach ab, was wiederum mit anderen Nachteilen wie der höheren Dämpfung verbunden ist.

## 2.5 Dämpfung

Die Absorptionsdämpfung (Umwandlung von Schallenergie in Wärme) lässt sich im Meerwasser zum größten Teil auf die Relaxationsdämpfung zurückführen. Relaxationsdämpfung tritt bei verzögerter Einstellung eines chemischen Gleichgewichts bei Druckänderung auf. Da im Meerwasser viele Komponenten in verschiedenen chemischen Zuständen vorliegen und sich das Verhältnis zueinander durch druckabhängige Gleichgewichtsreaktionen nur verzögert einstellt, wird der Schallwelle dadurch Energie entzogen.

Im kHz-Bereich wird dieser Effekt hauptsächlich durch Borsäure und Magnesiumsulfat hervorgerufen [13]. In [8] wurde dieser Zusammenhang experimentell bestätigt und eine empirische Formel für den Energiedämpfungskoeffizient angegeben. Abbildung 3 zeigt dessen schnellen Anstieg bei zunehmender Frequenz.

Absorption tritt im Wasser außerdem bei Reflexionen am Meeresboden, an Eis, Luftblasen oder anderen Hindernissen auf. Die Schallintensität nimmt zudem mit dem Quadrat der Entfernung zur Schallquelle ab (Divergenz). Alle diese Effekte führen zu einer Abnahme der Energie einer Schallwelle und damit deren Reichweite.



Abbildung 3: Energiedämpfungskoeffizient von akustischen Wellen im Wasser [19]

#### 2.6 Latenzzeit

Die Übertragungsgeschwindigkeit, die mit elektromagnetischen Wellen erreicht werden kann, entspricht der Lichtgeschwindigkeit und liegt demnach bei etwa 300.000 km/s. Die damit verbundenen Latenzzeiten sind für viele Anwendungen dabei vernachlässigbar klein. Bei der akustischen Unterwasserkommunikation hingegen sind die Latenzzeiten aufgrund der sehr viel niedrigeren Geschwindigkeit der Schallwellen um ein Vielfaches größer.

Eine Angabe der *round trip time* (RTT, Laufzeit eines Datenpakets von der Quelle zum Empfänger und zurück) für ein Paket ist vor allem aufgrund der hohen Variabilität der Schallgeschwindigkeit, hervorgerufen durch die Mehrwegausbreitung, kaum möglich [16]. Daher sind viele bekannte Transportschicht-Protokolle für die Anwendung unter Wasser ungeeignet, da diese eine genaue Abschätzung der RTT benötigen.

#### 2.7 Reichweite

Die Reichweite von Schallwellen unter Wasser hängt wie in Abschnitt 2.5 bereits angedeutet, stark von den jeweiligen Frequenzen ab. Je nach Anwendung und gewünschter Reichweite muss entsprechend das Frequenzband gewählt werden. In Referenz [5] werden die Frequenzbänder nach Reichweite in fünf Kategorien aufgeteilt, zu sehen in Tabelle 1.

Die Datenrate hängt maßgeblich von der verwendeten Frequenz ab. Daher sind für hohe Datenraten hohe Frequenzen wünschenswert, diese können jedoch nur über kurze Distanzen verwendet werden.

	Reichweite [km]	Trägerfrequenz [kHz]
Sehr lang	1000	< 1
Lang	10 - 100	2 - 5
Mittel	1 - 10	$\approx 10$
Kurz	0.1 - 1	20 - 50
Sehr kurz	< 0.1	> 100

Tabelle 1: Signalreichweiten [5]

# 3. NACHRICHTENÜBERTRAGUNG

Für die akustische Datenübertragung unter Wasser müssen die zuvor vorgestellten Einschränkungen und Hindernisse beachtet und adäquate Lösungen gefunden werden.

Um Nachrichten unter Wasser zu senden oder zu empfangen, benötigt man einen Wasserschallwandler (auch Unterwassermodem genannt). Als Wandlungseffekt wird vorwiegend die piezoelektrische und die magnetostriktive Wandlung genutzt [13]. Die Aufgabe eines Wasserschallwandlers besteht darin, die zu sendenden Daten auf eine Trägerfrequenz zu modulieren und die Schallwellen abzusetzen, sowie Signale zu empfangen und daraus Daten wiederherzustellen (Demodulation).

Die Anforderungen bei der Konstruktion eines Wasserschallwandlers sind hoch: Sie müssen neben hoher Beständigkeit gegen äußere Einflüsse, wie z.B. Dichtigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Druckfestigkeit, eine gute Anpassungsfähigkeit an das Übertragungsmedium Wasser aufweisen [13]. Für eine genauere Beschreibung der Funktionsweise eines Wasserschallwandlers wird an dieser Stelle auf die Patentschrift von Troin und Cazaoulou [20] verwiesen.

Im folgenden Abschnitt werden einige gängige Modulationsverfahren und eine Einteilung der Signale vorgestellt.

## **3.1 Modulationsverfahren**

Unter Modulation versteht man das Verändern eines Trägersignals in Abhängigkeit eines informationstragenden Signals. Dem Trägersignal wird dadurch die Information aufgeprägt, die am Empfänger möglichst ohne Verfälschung aus dem Signal rekonstruiert werden kann. Durch Modulation wird außerdem versucht, die Kanalkapazität besser auszunutzen (Multiplexing). Gerade bei der akustischen Kommunikation unter Wasser soll so die netto Datenrate erhöht werden.

#### 3.1.1 Amplitudenumtastung

Die Amplitudenumtastung (ASK) ist ein Amplitudenmodulationsverfahren, das die Signalzustände mit Hilfe von unterschiedlichen Amplituden moduliert. Bei der binären Amplitudenumtastung (BASK) werden hierfür zwei verschiedene Amplituden verwendet, die die Zustände 0 und 1 kodieren [15]. In Abbildung 4 ist beispielhaft die Modulation der Signalfolge "1010" dargestellt.



Abbildung 4: Binäre Amplitudenumtastung[15]

#### 3.1.2 Frequenzumtastung

Bei der Frequenzumtastung (FSK) wird die Trägerfrequenz einer periodischen sinusförmigen Schwingung zwischen einem Satz unterschiedlicher Frequenzen verändert, welche die einzelnen zu sendenden diskreten Zustände (wie 0 oder 1) darstellen. Die zu sendenden Signale werden durch Aneinanderreihung der jeweiligen Frequenzen zusammengesetzt [15]. In Abbildung 5 ist die Form der binären Frequenzumtastung (BFSK) mit zwei Zuständen für die Signalfolge "1010" dargestellt.



Abbildung 5: Binäre Frequenzumtastung [15]

#### 3.1.3 Phasenumtastung

Die Phasenumtastung (PSK) nutzt zur Modulation des Nachrichtensignals Phasensprünge bzw. -verschiebungen des Trägersignals. Der einfachste Fall der binären Phasenumtastung (BPSK) lässt sich anschaulich als Multiplikation des Trägers mit  $\pm 1$  beschreiben (+1 für die logische 1, -1 für die logische 0 des Datensignals) [15]. Dadurch wird die Phase des Trägersignals um 0° bzw. 180° verschoben.

Das Problem beim Empfangen eines PSK-Signals ist die Phasensynchronisation. Um die Zuordnung von Phase zu Signalwert herzustellen wird beim Verbindungsaufbau ein spezielles Synchronisationswort übertragen. Andernfalls könnte bei falscher Zuordnung, wenn also der Empfänger auf der falschen Phase einrastet und damit die Phase um  $\pi$  verschoben interpretiert wird, die Bitfolge beim Empfänger invertiert werden [15].

Bei der Phasendifferenzmodulation, Differential Phase Shift Keying (DPSK), werden die Bits durch die Änderung der Phase kodiert. Bei der Verwendung von zwei Symbolen kodiert eine Änderung der Phase um 0° eine 0, die Änderung der Phase um 180° kodiert 1. Die Information ist hierbei in der Differenz der Phasenlagen aufeinanderfolgender Schritte kodiert, während bei der klassischen PSK die Information direkt in der Phase kodiert ist. Zwei aufeinanderfolgende Einsen würden bei der einfachen binären PSK keine Phasenverschiebung hervorrufen, während bei der binären DPSK die zweite 1 durch einen (zusätzlichen) Phasensprung um 180° kodiert wird [15].

Diese Variante der Kodierung hat zwei wesentliche Vorteile: Zum einen ist die Messung einer Phasenänderung auf Empfängerseite deutlich einfacher realisierbar, da kein gemeinsamer Referenzzeitpunkt benötigt wird. Zum anderen wird durch diese Art der Kodierung eine automatische Synchronisation auch nach Verbindungsabbrüchen gewährleistet, da die Information spätestens ab dem zweiten gelesenen Bit korrekt interpretiert wird [15].

In Abbildung 6 ist die Phasenumtastung am Beispiel der Signalfolge "0110" abgebildet.

#### 3.1.4 Quadraturamplitudenmodulation

Die Quadraturamplitudenmodulation (QAM) ist ein Modulationsverfahren, das durch eine Kombination von Phasenumtastung und Amplitudenumtastung realisiert ist. Das di-



Abbildung 6: Phasenumtastung [15]

gitale Datensignal wird dabei auf zwei Signale gleicher Frequenz aufgeteilt, die addiert dem Träger (ebenfalls gleiche Frequenz) aufmoduliert werden. Die zwei Signale, die Inphase *I* und die zu *I* um 90° verschobene sog. Quadratur *Q*, können beide benutzt werden, um Informationen zu übertragen. Hierzu werden beide unabhängig voneinander mittels Amplitudenmodulation moduliert. Die beiden Signale stehen orthogonal zueinander und stören sich deswegen gegenseitig nicht.



#### Abbildung 7: Quadraturamplitudenmodulation (4-QAM)

Zur anschaulichen Darstellung drückt man Amplitude und Phase des addierten Signals zum Zeitpunkt der Abtastung in Polarkoordinaten in einem Konstellationsdiagramm aus, wobei die Amplitude dem Abstand vom Ursprung entspricht und die Phase dem Winkel relativ zum Schnittpunkt der I/Q Achsen. Diese Art der Darstellung ist möglich, da I und Q orthogonal zueinander stehen. Die Anzahl der darstellbaren Symbole, die Punkte in der komplexen Ebene darstellen, wird in Form einer Zahl ausgedrückt. In Abbildung 8 ist ein solches Konstellationsdiagramm für die QAM mit vier Symbolen gegeben, das die Anordnung der Datensymbole zeigt. Abbildung 7 zeigt die Komponenten der 4-QAM und das addierte Signal, wobei hier zu beachten ist, dass die Modulation der Amplitude durch Multiplikation mit 1 bzw. -1 geschieht. Prinzipiell ist es möglich, die Anzahl der darstellbaren Symbole beliebig zu erhöhen, doch erschwert dies zunehmend die Demodulation. Bei der Demodulation muss der rekonstruierte Punkt im Konstellationsdiagramm den vorher definierten Symbolen zugeordnet werden. Wird die Anzahl der darstellbaren Symbole erhöht, werden gleichzeitig die Toleranzbereiche zwischen den Symbolen verkleinert und damit eine eindeutige Zuordnung erschwert [15].



Abbildung 8: Konstellationsdiagramm für 4-QAM [15]

#### 3.1.5 Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren

Das orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) ist ein sog. Multicarrier-Modulationsverfahren, das mehrere orthogonale Trägersignale zur Datenübertragung verwendet. Dieses Verfahren eignet sich besonders für drahtlose Kommunikation, da es weniger anfällig für schmalbandige Störungen ist, da diese, falls sie nur einen Teil der Trägersignale betreffen, nur einen Teil der Daten betreffen. Treten Störungen bei einem Teil der Trägersignale auf, können diese zudem einfach von der Datenübertragung ausgeschlossen werden [12, 15].

Der zu übertragende Datenstrom mit hoher Datenrate wird bei der OFDM in Subdatenströme niedriger Datenrate aufgeteilt, die jeweils einzeln mit einem der zuvor vorgestellten Modulationsverfahren auf Subträger moduliert werden. Die durch die Trägersignale beschriebenen Funktionsräume der einzelnen Subsignale sind dabei orthogonal zueinander zu wählen, damit auf Empfängerseite die Trägersignale bei der Demodulation unterschieden werden können.

Das OFDM Signal wird aus den einzelnen Subsignalen durch eine komplexrechnende inverse diskrete Fouriertransformation erzeugt. Auf Empfängerseite kann das Signal anschließend mittels der schnellen Fouriertransformation wieder in die einzelnen Subsignale separiert werden [12].

OFDM wird in der Funktechnik bei WLAN, DVB-T und LTE eingesetzt. Es kommt außerdem bei ADSL zur Anwendung. Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung des Modulationsvorgangs. Die zu übertragenden Daten wurden hier bereits in Subsignale aufgteilt und einzeln auf die Trägerfrequenzen  $f_1$  bis  $f_n$  moduliert.

## 3.2 Signaltypen

Datendurchsatz und Zuverlässigkeit eines Unterwassersensorknotens werden durch die physikalischen Einschränkungen stark limitiert. Demnach ist es sinnvoll, die Anforderungen an ein solches System je nach Anwendung zu klassifizieren. In [6] wird eine solche Einteilung der zu übertragenden



#### Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Modulation mit OFDM [1]

Signale in Kontroll-, Messwert- und Videosignale vorgenommen, die im Folgenden näher betrachtet wird:

## 3.2.1 Kontrollsignale

Als Kontrollsignale werden Signale zur Steuerung, Navigation und Statusübertragung bezeichnet. Sie müssen mit hoher Zuverlässigkeit übertragen werden, benötigen aber eine geringe Bandbreite von unter 1 kBit/s.

#### 3.2.2 Messwertsignale

Für die Übertragung von Messdaten und Bildern mit niedriger Auflösung benötigt man hingegen Bandbreiten bis etwa 10 kBit/s. Hierbei sind geringe Übertragungsfehler im Bereich von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  vertretbar.

#### 3.2.3 Videosignale

Die Übertragung von hochauflösenden Bild- und Videodaten benötigt die größte Bandbreite. Bei einer Auflösung von einem Megapixel ( $\approx$  8 MBits) benötigt die Übertragung des Bildes selbst bei einer Bandbreite von 500 KBit/s mehrere Sekunden. In diesem Fall ist eine Fehlerrate bis 10<sup>-4</sup> akzeptabel.

#### 4. SENSORKNOTENSYSTEME

Sensorknotensysteme zur Überwachung von Aktivitäten im Ozean bestehen aus einer Kombination von verschiedenen Sensor- und Kommunikationseinheiten, wie in Abbildung 10 beispielhaft zu sehen ist.



Abbildung 10: Architektur eines Unterwassersensornetzwerks [5]

## 4.1 Unterwasser Sensorknoten

Unterwasser Sensorknoten werden häufig am Meeresgrund verankert und kommunizieren direkt oder über einen speziellen Sensorknoten mit einer an der Oberfläche schwimmenden Plattform, welche wiederum Daten per Satellit oder Funk zur Auswertung an Land oder Schiff weitergibt.

Es gibt eine Vielzahl von Anwendungsfällen, für die der Einsatz von Sensorknoten am Meeresboden in Frage kommt. Ein Sensorknoten kann z.B. eingesetzt werden, um Temperatur, Wasserqualität, Strömungsverhalten oder seismologische Aktivitäten zu messen.

Die Stromversorgung eines Unterwassersensorknotens wird durch Batterien gewährleistet. Eine eigene Stromversorgung mit Solarpanelen ist aufgrund der Dunkelheit am Meeresboden nicht möglich. Bei niedrigem Ladezustand oder für Wartungsarbeiten kann der Sensor zudem über einen speziellen Bergungsmechanismus zum Auftreiben gebracht werden [5].

## 4.2 Bergungsmechanismus

Der Bergungsmechanismus dient dazu, den Sensor vom Anker zu trennen und zum Auftreiben zu bringen. Dieser Vorgang wird in der Regel aus der Ferne aktiviert und funktioniert ebenfalls akustisch, meist mittels eines frequenzmodulierten Signals, da diese Art der Modulation bei niedriger Datenrate am zuverlässigsten ist [11]. Es gibt verschiedene Ansätze, wie der Sensor zuverlässig vom Anker getrennt werden kann. In [9] ist ein Mechanismus beschrieben, der hierfür den verbindenden Draht zwischen Anker und Sensor mit einer hohen Spannung zum Schmelzen bringt. Der Vorteil dieser Variante ist, dass sie ohne Motor auskommt.

## 4.3 Autonome Unterwasserfahrzeuge

Als Ergänzung zu den mehr oder weniger statisch verankerten Sensorknoten wird in den letzten Jahren verstärkt auf die Entwicklung von autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUV) gesetzt. Ihr Vorteil liegt in dem relativ großen Arbeitsbereich, der nur durch die Reichweite des akustischen Signals beschränkt wird [10, 17]. Durch den Einsatz von autonomen Unterwasserfahrzeugen entstehen zusätzliche Anforderungen an die Kommunikationstechnik, da hier der Doppler-Effekt stärker zum Tragen kommt [19]. Abbildung 11 zeigt ein AUV der Firma Saab Seaeye, das zum Umwelt-Monitoring eingesetzt wird.



Abbildung 11: AUV Seaeye Sabertooth [2]

## 4.4 Unterwasser Sensornetze

Die Architektur eines Unterwasser Sensornetzes hat große Auswirkungen auf die Faktoren Energieverbrauch, Kapazität und Zuverlässigkeit [5]. Die Zuverlässigkeit ist aufgrund der oft hohen Kosten eines Unterwassersensornetzes hierbei das entscheidende Kriterium. In [5] werden drei verschiedene Referenzarchitekturen vorgestellt, die je nach Anwendung diese Faktoren unterschiedlich gewichten.

Der Datenverkehr innerhalb eines Sensornetzes nimmt mit der Anzahl der beteiligten Sensorknoten rapide zu. Daher sind effiziente Routing- und Kollisionsverhinderungsmechanismen nötig, um den Datenverkehr in dem gemeinsamen Übertragungsmedium Wasser zu regeln. Häufig werden dazu Routingknoten eingesetzt, die horizontal mit den benachbarten Sensorknoten kommunizieren und die gesammelten Daten vertikal an die über der Wasseroberfläche liegenden Sendeplattform weiterleiten [16].

## 5. ANWENDUNGEN

Die Anwendungsgebiete der Kommunikation unter Wasser sind vielseitig. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts und der Erfindung der ersten Wasserschallwandler wurde sich intensiv mit der akustischen Kommunikation auseinandergesetzt.

Den Anstoß für die größten Entwicklungen gab jedoch der zweite Weltkrieg. Zu dieser Zeit wurde das Sonar zur Ortung von U-Booten entwickelt. Außerdem entstand das erste System zur Unterwassertelefonie (Deckname "Gertrude"). Weitere Geräte zur Ortung und Navigation folgten. Neben dem Einsatz zur militärischen Kommunikation und Ortung ist die praktische Anwendung von Schallwellen unter Wasser heute auch im zivilen Bereich von großem Interesse. Im Folgenden werden zwei Systeme, die sich die Schallausbreitung unter Wasser zu Nutze machen, vorgestellt.

## 5.1 Sound Surveillance System

Das SOSUS (*SOund SUrveillance System*) ist ein US amerikanisches Geräuschüberwachungssystem, ursprünglich entwickelt zur Überwachung von U-Boot Aktivitäten in den Ozeanen. Es handelt sich hierbei um ein Netzwerk aus fest installierten und verkabelten Unterwassersensoren, die, ausgestattet mit Unterwassermikrofonen, Geräusche aufnehmen und diese per Kabel zur Auswertung an Land übertragen. Die hochsensiblen Sensoren erlauben es, Geräusche mit einer akustischen Leistung von weniger als einem Watt über mehrere hundert Kilometer Entfernung zu entdecken. Nach dem Ende des kalten Krieges wurden Teile des Systems abgeschaltet. Einige Unterwassersensoren werden weiterhin genutzt um Aktivitäten von Walen zu verfolgen [4].

## 5.2 Tsunami Frühwarnsystem GITEWS

Das deutsch-indonesische System zur Tsunami Früherkennung GITEWS ist ein komplexes System verschiedener Sensortypen wie Seismometer, Ozeaninstrumenten und GPS-Sensoren, das seit 2008 im indischen Ozean eingesetzt wird.

## 5.2.1 Systemkomponenten

Um schnell und zuverlässig eine sich ausbreitende Tsunami-Welle erkennen zu können, wurden eine Reihe unterschiedlicher Systeme kombiniert. An Land erfassen Seismometer und GPS-Stationen kleinste Bewegungen der Kontinentalplatten. Dadurch kann innerhalb kürzester Zeit die Stärke, die Bruchrichtung und das Epizentrum einer Erdverschiebung bestimmt werden, was für die Bewertung des Tsunami-Risikos von essenziellem Wert ist. Auf hoher See erfassen Messbojen und Unterwasser-Drucksensoren Erderschütterungen und Veränderungen des Wasserdrucks. Die Unterwassersensoren kommunizieren akustisch mit Oberflächenbojen, die die gesammelten Daten per Satellitenverbindung zur Auswertung an Land übertragen. Zusätzlich registrieren Detektoren in Küstennähe Veränderungen des Wasserstands, um eine Vorhersage treffen zu können, wo die Woge auf die Küste treffen wird [7].

#### 5.2.2 Unterwassersensoren

Für die Erkennung einer sich ausbreitenden Tsunami-Flutwelle misst ein Unterwassersensor den Druck der auf ihm lastenden Wassersäule, um dadurch den Wellengang an der Oberfläche zu bestimmen. Hierfür werden präzise Drucksensoren benötigt, die selbst aus einer Tiefe von mehreren Kilometern den Wellengang zentimetergenau bestimmen können. Denn eine Tsunami-Welle hat die Eigenschaft, dass sie im tiefen Wasser oft nur einige Zentimeter hoch ist und dabei eine Wellenlänge von 100 bis 500 km besitzt [14].

Zu diesem Zwecke wurden für das GITEWS Projekt zwei unabhängige Bodensensoren (PACT und OBU) entwickelt und in seismologisch kritischen Gebieten wie z.B. an den Kontinentalplattenrändern ausgesetzt. In der Nähe einer jeden Bodeneinheit wurde zusätzlich eine Oberflächenboje installiert. Zur Kommunikation verwenden alle drei Systeme (PACT, OBU und Boje) das Unterwassermodem Ham.node der Firma Develogic. Das Modem verwendet zur Modulation je nach Anwendung entweder OFDM-mDPSK für hohe Datenraten oder n-mFSK (nicht kohärente Variante der FSK) für niedrigere Datenraten mit höherer Zuverlässigkeit. Die Aufgabe des PACT Systems ist es, den Wasserdruck am Meeresboden zu messen. Die Energiereserven betragen dafür ca. 3000 Wh. bei einer vorraussichtlichen Betriebsdauer von 29 Monaten. Das OBU System misst zusätzlich zum Wasserdruck seismologische Aktivitäten und speichert diese auf einer internen Festplatte. Die Energiereserven von 12500 Wh. ermöglichen eine Laufzeit von etwa 12 Monaten [7].

PACT und OBU messen beide alle 15 Sekunden den Druck der Wassersäule und übertragen die gesammelten Daten im regulären Betrieb alle 4 bzw. 6 Stunden. Wird vom System ein Tsunami erkannt, werden automatisch alle zwei Minuten Daten übertragen. Die von OBU gesammelten seismologischen Daten können extern getriggert in Echtzeit übertragen werden. OBU verwendet hierfür OFDM-mDPSK (11.2-19.2 kHz) zur Modulation, PACT hingegen n-mFSK (9-12.8 kHz) aufgrund der niedrigeren Datenmenge (100 Byte pro Nachricht im Gegensatz zu 50 bis 500 KB bei OBU).

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Erforschung der Tiefen unserer Ozeane benötigt man zuverlässige und leistungsfähige Kommunikationsmittel. Für die drahtlose Kommunikation eignet sich die Kommunikation über elektromagnetische Wellen hierfür nur bedingt, da diese nur begrenzte Reichweiten besitzen. Eine andere und besser geeignete Möglichkeit der Kommunikation besteht in der Anwendung von akustischen Signalen, die in dieser Arbeit näher betrachtet wurden.

Die physikalischen Grundlagen und limitierenden Faktoren wurden zu Beginn vorgestellt, ebenso wie die Einflussfaktoren auf die Reichweite und Geschwindigkeit der akustischen Signale. Durch die vielen unerwünschten Einflüsse auf die Qualität der Übertragung bestehen besondere Anforderungen an die Art der Signalübertragung. Hierfür wurden mehrere Modulationsverfahren (ASK, FSK, PSK, QAM, OFDM) vorgestellt, die alle unter Wasser ihre Anwendung finden. Um das Thema abzuschließen wurden zwei Anwendungsszenarien von Unterwassersensornetzen kurz vorgestellt. Die akustische Kommunikation wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Kommunikation unter Wasser spielen. Gerade im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel ist die Beobachtung der Ozeane von großem Interesse. Nicht betrachtet wurden im Zuge dieser Arbeit Verfahren zur Zugriffskontrolle und Kollisionsverhinderung. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf den Artikel [16] verwiesen, der sich mit diesen Themen und anderen Aspekten, die beim Design von Netzwerkprotokollen unter Wasser von Bedeutung sind, beschäftigt.

## 7. LITERATUR

- [1] An Introduction to Orthogonal Frequency Division Multiplex Technology. http://ieee.li/pdf/viewgraphs/introduction\_ orthogonal\_frequency\_division\_multiplex.pdf, 7 2011
- [2] Autonomous Undersea Vehicle Applications Center. http://auvac.org/configurations/view/95,72011
- [3] Underwater Acoustic Network. http://www.ua-net.eu/?q=gallery&g2\_itemId=33,7 2011
- [4] ABILEAH, R. ; MARTIN, D. ; LEWIS, S. ; GISINER, B. : Long-range acoustic detection and tracking of the humpback whale Hawaii-Alaska migration. In: OCEANS '96. MTS/IEEE. 'Prospects for the 21st Century'. Conference Proceedings Bd. 1, 1996, S. 373 –377 vol.1
- [5] AKYILDIZ, I. F. ; POMPILI, D. ; MELODIA, T. : Underwater acoustic sensor networks: research challenges. In: *Ad Hoc Networks* 3 (2005), Nr. 3, S. 257 – 279
- [6] BAGGEROER, A. : Acoustic telemetry–An overview. In: IEEE Journal of Oceanic Engineering 9 (1984), 10, Nr. 4, S. 229 – 235
- [7] BOEBEL, O.; BUSACK, M.; FLUEH, E. R.; GOURETSKI, V.; ROHR, H.; MACRANDER, A.; KRABBENHOEFT, A.; MOTZ, M.; RADTKE, T.: The GITEWS ocean bottom sensor packages. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (2010), 8, Nr. 8, S. 1759–1780
- [8] BREKHOVSKIKH, L. ; LYSANOV, I. : *Fundamentals of ocean acoustics*. AIP Press/Springer, 2003 (AIP series in modern acoustics and signal processing)
- [9] FLAGG, M.; GOLDSTEIN, A.; HARVEY, A.; HOLTMEIER, G.: Device for remotely decoupling coupled objects with a fusible link underwater. 11 2006
- [10] HYAKUDOME, T.: Design of Autonomous Underwater Vehicle. In: International Journal Of Advanced Robotic Systems 8 (2011), Nr. 1, S. 131 – 139
- [11] KILFOYLE, D. ; BAGGEROER, A. : The state of the art in underwater acoustic telemetry. In: Oceanic Engineering, IEEE Journal of 25 (2000), 1, Nr. 1, S. 4 –27
- [12] KNÖRZER, S. : Funkkanalmodellierung für OFDM-Kommunikationssysteme bei Hochgeschwindigkeitszügen. Univ.-Verl. Karlsruhe, 2009 (Karlsruher Forschungsberichte aus dem Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik)
- [13] LERCH, R. ; SESSLER, G. ; WOLF, D. : Unterwasserschall (Hydroakustik). In: *Technische Akustik*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 537–571
- [14] LEVIN, B. ; NOSOV, M. : *Physics of tsunamis*. Springer, 2008. ISBN 9781402088551

- [15] MEYER, M.: Kommunikationstechnik. Vieweg, 2002. ISBN 9783528138653
- [16] POMPILI, D. ; AKYILDIZ, I. : Overview of networking protocols for underwater wireless communications. In: *IEEE Communications Magazine* 47 (2009), 1, Nr. 1, S. 97 –102
- [17] SOZER, E. ; STOJANOVIC, M. ; PROAKIS, J. : Underwater acoustic networks. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (2000), 1, Nr. 1, S. 72 –83
- [18] STOJANOVIC, M.: Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer. In: Wireless on Demand Network Systems and Services, 2008. WONS 2008. Fifth Annual Conference on, 2008, S. 1–10
- [19] STOJANOVIC, M. ; PREISIG, J. : Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. In: *Communications Magazine*, *IEEE* 47 (2009), 1, Nr. 1, S. 84–89
- [20] TROIN, G.; CAZAOULOU, C.: Underwater acoustic transmission method and equipment to improve the intelligibility of such transmissions. 11 1996