

## Akustisches mobiles ad-hoc Netzwerkprotokoll - GUWMANET

Michael Goetz<sup>a</sup>, Ivor Nissen<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE), Wachtberg, Germany

<sup>b</sup>Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG) der WTD 71, Kiel Germany

Email: michael.goetz@fkie.fraunhofer.de, IvorNissen@Bundeswehr.org

Unterwasserkommunikation spielt nicht nur im militärischen Bereich eine immer größere Rolle, sondern auch bei zivilen Anwendungen. Dabei sollen getauchte Einheiten oder Unterwassersensoren untereinander und mit der Oberfläche vernetzt werden. Kommunikation in Unterwassernetzwerken kann aufgrund der hohen Absorption von elektromagnetischen Wellen in Salzwasser über größere Entfernung nur akustisch erfolgen. Um zuverlässig bei unterschiedlichen Wetterbedingungen Nachrichten austauschen zu können, ist man entweder auf sehr tiefe Frequenzen mit geringen Bandbreiten, oder Multi-Hop-Strategien angewiesen. Für letzteres wird ein Netzwerkprotokoll benötigt, welches die Weiterleitung der Nachrichten in Richtung des Empfängers organisiert. Im Folgenden wird auf die Aspekte eingegangen, die in einem akustischen Unterwassernetzwerk berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren wird das Netzwerkprotokoll *Gossiping in Underwater Mobile Ad-Hoc Networks* (GUWMANET) vorgestellt, das speziell für diese Anforderungen entwickelt wurde.

### Medienzugriff

Ein wichtiger Aspekt bei der drahtlosen akustischen Unterwasserkommunikation ist, dass das Medium Wasser von allen Teilnehmern geteilt werden muss; im Gegensatz zu drahtgebundenen Netzwerken bei denen die Teilnehmer typischerweise getrennte Leitungen verwenden. Der Medienzugriff, das heißt wer wann senden darf, spielt daher in Unterwassernetzwerken eine essentielle Rolle. Ein Lösungsansatz ist die zeit-, frequenz- oder codebasierte Aufteilung des Mediums. Hierbei werden den Teilnehmern bestimmte Zeitslots, Frequenzbereiche beziehungsweise orthogonale Codes zugewiesen. Durch die Aufteilung sinkt jedoch die Datenrate, die einem einzelnen Teilnehmer zur Verfügung steht. Das ist insbesondere dann ineffizient, wenn Daten hauptsächlich ereignisgesteuert gesendet werden. Beispielsweise sendet ein Sensor nur, wenn er etwas detektiert hat. In diesem Fall blockiert jeder Teilnehmer einen Teil der Bandbreite durch seinen vorreservierten Bereich, auch wenn er keine Nachrichten übertragen möchte. Stehen allerdings Nachrichten zur Übertragung bereit, können diese nur mit einer sehr niedrigen Datenrate übertragen werden. Weitere Details siehe [2012O].

Eine Alternative zur festen Vergabe von Bandbreite besteht in einem randomisierten Medienzugriff. Hierbei wird keine feste Einteilung vorgegeben, sondern alle Teilnehmer nutzen die komplette Bandbreite. Folglich kann es bei gleichzeitiger Übertragung von verschiedenen Teilnehmern zu Kollisionen und damit zu Paketverlusten kommen. Um dies zu vermeiden, wird in terrestrischen Netzen meist vor der Übertragung einer

Nachricht eine Kanalreservierung durchgeführt. Was in Luft mit Lichtgeschwindigkeit nur wenige Mikrosekunden benötigt, dauert in Unterwassernetzwerken hingegen mehrere Sekunden, da sich Schall im Wasser mit lediglich 1500 Metern pro Sekunde ausbreitet. Anstatt den Kanal aufwendig zu reservieren, setzt GUWMANET daher auf möglichst kurze Übertragungen, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zu minimieren.

### Kollisionen

Bei der Bewertung von Übertragungsverfahren für die Punkt-zu-Punkt-Kommunikation spielt Robustheit, beispielsweise gegen Störgeräusche, Mehrwegeausbreitung oder Doppler-Effekten, meist die wichtigste Rolle. In Netzwerken hat jedoch die Übertragungsdauer einen erheblichen Einfluss auf die Paketübertragungsrate, da es bei längerer Übertragung häufiger zu Paketverlusten durch Kollisionen kommt.

Abbildung 1 zeigt eine Simulation der Kollisionswahrscheinlichkeit mit verschiedenen Übertragungsverfahren. Es zeigt sich, dass beispielsweise UOFDM [2009W] trotz seiner hohen Robustheit für Unterwassernetzwerke ungeeignet ist, da die Kollisionswahrscheinlichkeit schon bei 500 Paketen pro Stunde auf über 90 % ansteigt. Bei Verfahren mit sehr kurzen Übertragungsdauern, wie beispielsweise TUWACS [2009N], welches eine Nachricht in einem kurzen Burst von 300 ms sendet, liegt die Kollisionswahrscheinlichkeit selbst bei 1000 Paketen pro Stunde bei nur etwa 10 %. Das verdeutlicht den großen Einfluss, den die Übertragungsdauer auf die Performanz eines Netzwerks hat. Es gilt daher, dass ein kurzes Übertragungsverfahren vorzuziehen ist, selbst wenn, wie im Fall von OFDM1, doppelt so viele Daten übertragen werden können, da sich die Kollisionswahrscheinlichkeit bereits vervierfacht.

### Fragmentierung

Eine Fragmentierung einer Nachricht auf mehrere kurze Übertragungen ist ebenfalls ineffizient, wie in Abbildung 2 dargestellt ist. Bereits eine Aufteilung einer Nachricht auf zwei Pakete erhöht die Kollisionswahrscheinlichkeit um das 2-3fache. Folglich ist die oberste Prämisse, so wenig Daten wie möglich über den akustischen Kanal zu versenden. Daher sollten Daten nur in einer komprimierten Form übertragen werden. Anstelle der Rohdaten müssen Sensordaten beispielsweise vorverarbeitet werden, um die Datenmenge zu reduzieren.

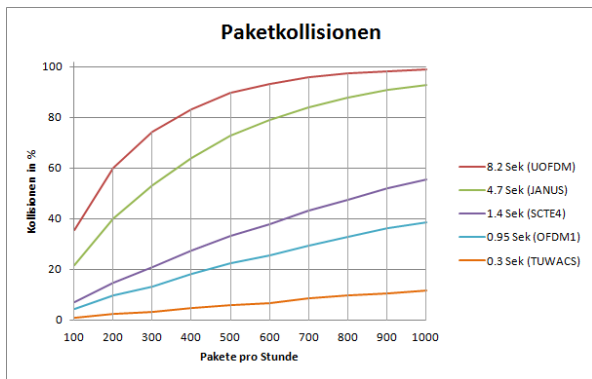


Abbildung 1: Kollisionswahrscheinlichkeit bei steigender Netzwerkauslastung für verschiedene Übertragungsverfahren.

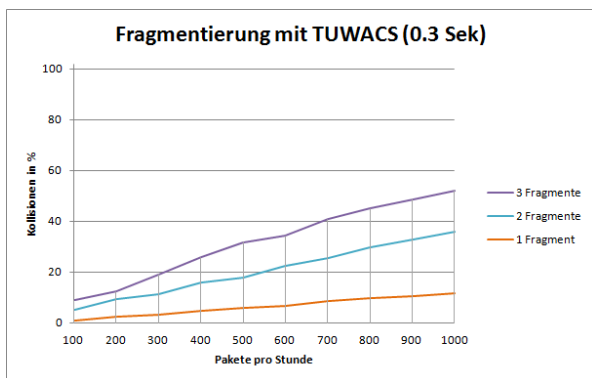


Abbildung 2: Kollisionswahrscheinlichkeit bei steigender Netzwerkauslastung mit und ohne Fragmentierung.

### Anwendungssprache GUWAL

Eine Möglichkeit zur Generierung sehr kurzer Nachrichten ist die Verwendung der Anwendungssprache *Generic Underwater Application Language* (GUWAL) [2012N]. Sie spezifiziert ein Format, mit dem Daten für verschiedene Anwendungsgebiete für den Unterwasserkontext übertragen werden können. Die Standardpaketlänge beträgt dabei lediglich 16 Byte. Dies ermöglicht es, sämtliche Daten mit nur einer einzigen TUVACS Übertragung zu verschicken, ohne die Nachricht vorher fragmentieren zu müssen.

Trotz der kurzen Länge von 16 Byte, unterstützt GUWAL hunderte von Unterwasseranwendungen. Darunter die Versendung von kurzen Textnachrichten, Steuerbefehlen für Unterwasserfahrzeuge, Detektionsmeldungen oder GPS-Positionen. Durch die effiziente Speicherung können die Daten mit einer Genauigkeit übertragen werden, die für die meisten Anwendungen ausreichend ist. Eine GPS-Position hat beispielsweise eine Genauigkeit von ~1.5 Metern.

### Netzwerkprotokoll GUWMANET

Wie eingangs bereits erwähnt wurde, kann die Reichweite eines Netzwerks über die direkte Punkt-zu-Punkt Sende-reichweite erweitert werden, indem die Knoten eine Nachricht in Richtung des Ziels weiterleiten. Hierfür bedarf es eines Netzwerkprotokolls, welches zusätzliche Kontroll-

informationen benötigt, die jeder Nachricht hinzugefügt werden müssen. Analog zu den Anwendungsdaten muss auch hierbei darauf geachtet werden, dass so wenig Daten wie möglich übertragen werden müssen. Dies macht herkömmliche Netzwerkprotokolle, die in terrestrischen Netzwerken eingesetzt werden, unbrauchbar, da diese auf deutlich höhere Datenraten ausgelegt sind.

Das Netzwerkprotokoll GUWMANET [2012G] wurde speziell für die Anforderungen von Unterwassernetzwerken entwickelt. Ein wichtiges Designkonzept von GUWMANET ist die Wiederverwendung von Informationen aus den GUWAL Anwendungsdaten, so dass diese vom Netzwerkprotokoll nicht zusätzlich übertragen werden müssen. Beispielsweise enthält ein GUWAL-Paket eine Absender- und eine Zieladresse, die für die Routenentscheidungen benötigt wird. Dabei verwendet GUWMANET selbstlernende Algorithmen, so dass Routeninformationen nicht direkt übertragen werden müssen, sondern mit der Zeit erlernt werden. Aus diesem Grund benötigt GUWMANET lediglich 10 Bits für zusätzliche Netzwerkkontrollinformationen, bestehend aus einer Sender- und Vorgängeradresse, um nicht nur Absender und Ziel identifizieren zu können, sondern auch die dazwischenliegenden Netzwerkknoten.

In einem Unterwassernetzwerk ist es oft schwierig, eine stabile Route zwischen zwei Knoten aufzubauen. Störgeräusche, beispielsweise durch ein vorbeifahrendes Schiff, können den Empfang einzelner Knoten entlang einer Route temporär stören. Auch die Ausbreitungsbedingungen variieren ständig, da sie unter anderem von der Temperatur und damit von der Tageszeit abhängen. Somit kann eine etablierte Route durch das Netzwerk zeitweise gestört sein. Damit nicht permanent eine neue Route gefunden werden muss, verwendet GUWMANET eine spezielle Technik, das sogenannte Korridorrouting. Dabei werden nicht nur die Knoten entlang der direkten Route zwischen Sender und Empfänger involviert, sondern auch dessen Nachbarknoten. In Abbildung 3 ist ein solches Korridorrouting skizziert. Die gestrichelten Linien zeigen die optionalen Verbindungen durch die benachbarten Knoten. Diese springen ein, wenn sie mitbekommen, dass die Nachricht nicht über den direkten Weg weitergeleitet wurde. Hierdurch wird außerdem die Robustheit bei Ausfällen einzelner Knoten erhöht, die beispielsweise durch Versandung oder Batteriemangel entstehen können.

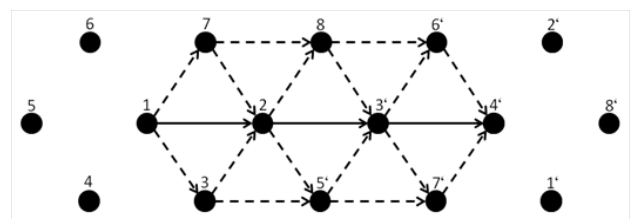


Abbildung 3: Korridorroute bei GUWMANET. Die Nachbarn der direkten Route beteiligen sich an der Weiterleitung.

## Dezentrale Sensordatenfusion

Die Sensordatenfusion bei GUWMANET, auf Basis von GUWAL-Nachrichten, unterscheidet sich von der klassischen zentralen Datenfusion. Ein Knoten der einen Kontakt detektiert (beispielsweise wenn ein AUV einen Gegenstand im Sonar ortet, oder ein Bodenknoten einen Gegenstand in oder auf der Wassersäule elektromagnetisch respektive akustisch detektiert), generiert eine entsprechende Nachricht, welche von den unmittelbaren Nachbarn empfangen wird. In einem klassischen Netzwerkprotokoll verarbeitet ein Knoten eine Nachricht nur, wenn diese für sie bestimmt ist. In GUWMANET wird jedoch der Informationsgehalt jeder Nachricht geprüft und ausgewertet. Daher kann ein Knoten sein eigenes Lagebild durch das „Geschwätz“ (Gossip) der anderen verbessern. Die dahinter stehende Idee, im Vergleich zur klassischen zentralen Fusion, soll durch ein einfaches Beispiel zur Mittelwertbildung veranschaulicht werden:

Liegen alle Informationen an einem zentralen Punkt vor, kann ein Mittelwert bestimmt werden, durch die bekannte Vorschrift:

$$mean = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n value(k)$$

Dieses Ergebnis muss anschließend wieder an alle Sensoren zurückgeführt werden. In Unterwassernetzwerken, mit hohen Latenzen und niedrigen Datenraten, kann eine iterative Strategie jedoch von Vorteil sein. Für den Mittelwert wäre die Schleife gegeben durch:

$$mean(1) = value(1);$$

$$mean(i + 1) = \frac{i \cdot mean(i) + value(i + 1)}{i + 1}; i = 1..n - 1$$

Jeder Knoten fusioniert seine eigenen Daten mit denen der Nachbarn und verbessert somit schrittweise das Ergebnis. Anschließend werden die aggregierten Sensordaten erneut ausgesendet. Für die akustische Detektion in einem Bodenknoten bei einem Aufklärungsszenario sei das einmal schematisiert dargestellt:

Durch das Beamforming in einer Sensorplattform wird eine Richtung und gegebenenfalls die Höhe festgestellt. Diese Information wird als GUWAL-Nachricht, die mit einem Zeitstempel versehen wird, ausgesendet. Hört ein Nachbar die Nachricht, leitet er sie gegebenenfalls weiter. Zusätzlich detektiert dieser Nachbar das Objekt ebenfalls und meldet mit einer eigenen Detektionsnachricht Peilung und Höhe. Aber es ist nun in beiden Knoten möglich, aus beiden Peilmeldungen einen Schnittpunkt und somit die genaue Position zu bestimmen. Dieses Zusatzwissen wird in Form einer neuen dritten Kontaktmeldung ausgesendet.

Bei bewegten Fahrzeugen wird oft ein Tracking benötigt. Der Vorteil gegenüber der klassischen zentralen Datenfusion besteht nun darin, dass bereits vor Ort bei den

Sensoren das Wissen besteht. Zum Beispiel kann ein hinzugerufenes Aufklärungs-AUV direkt mit den neuen Informationen über den aktuellen Track informiert und gegebenenfalls umgeleitet werden. Eine Übertragung zur Datenfusionszentrale und zurück würde bei den niedrigen Schallgeschwindigkeiten im Wasser zu viel Zeit benötigen.

## Erprobung im Seeversuch

In einem internationalen Seeversuch im Mai 2014 vor der Küste von La Spezia wurde das hier vorgestellte Konzept aus GUWAL und GUWMANET in Kombination mit dem Übertragungsverfahren TUWACS, welches ein Paket in einem kurzen Burst von 300 ms überträgt, erprobt. Der Seeversuch wurde im Rahmen des europäischen Projekts *Robust Acoustic Communication in Underwater Networks* (RACUN) durchgeführt. Daran beteiligt waren Italien, Niederlande, Norwegen und Schweden unter der Leitung von Deutschland.

Es wurden zwei Szenarien getestet, eine Minensuche mit einem autonomen Tauchfahrzeug (AUV) und eine Aufklärungsmission bei der Schiffe und getauchte Fahrzeuge von Bodenknoten detektiert und gemeldet werden sollten. Beide Szenarien konnten erfolgreich demonstriert werden; mit Paketübertragungsraten von durchschnittlich 90 %. Mit dem Konzept nur sehr kurze Nachrichten zu übertragen, erzielte GUWMANET deutlich bessere Ergebnisse als ein Vergleichsprotokoll, das auf Fragmentierung angewiesen war [2015].

## Partitionierte Netzwerke

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Integration von mobilen Teilnehmern, beispielsweise autonomen Tauchfahrzeugen oder Glidern. Diese mobilen Einheiten können eine wichtige Rolle in partitionierten Netzwerken einnehmen, indem sie Nachrichten zwischen einzelnen Partitionen austauschen. Dabei muss das Netzwerkprotokoll zeit- und ortsunabhängig sein, was unter dem Begriff *Delay Tolerant Networking* (DTN) zusammengefasst wird.

In einer nationalen Studie wurde GUWMANET um eine solche DTN-Funktionalität erweitert, zusammen mit weiteren Komponenten wie Verschlüsselung und Authentifizierung. Diese Erweiterungen werden unter dem Namen GUWMANET+ zusammengefasst und wurden ebenfalls in einem Seeversuch im Dezember 2014 vor Bornholm erprobt. Dabei wurden zwei AUVs vom Typ ATLAS Seacat eingesetzt, um Nachrichten zwischen verschiedenen Bodenknoten auszutauschen, vergleichbar mit einem Postboten.

In einem DTN müssen die Knoten ihre Nachrichten solange zwischenspeichern, bis ein mobiler Postbote die Daten abholt. Sobald ein Postbote in der Nähe ist, gibt sich dieser zu erkennen und die Knoten beginnen mit der Wiederholung der gespeicherten Nachrichten. Damit nicht mehrere Knoten gleichzeitig mit der Übertragung beginnen, berechnen sich die Knoten ihre Priorität anhand der Anzahl und der Wichtigkeit der gespeicherten Nachrichten. Außerdem merkt sich jeder Knoten, welche

Nachrichten er bereits dem Postboten übermittelt und welche er von ihm empfangen hat. Auch der Postbote merkt sich, mit wem er bereits welche Nachrichten ausgetauscht hat und überträgt nur die neuen, unbekanntenen Nachrichten.

## Versteckte Kommunikation in Botnetzen

Die akustische Kommunikation kann nicht nur für Unterwassernetzwerke genutzt werden. In einer Studie [2014] konnte gezeigt werden, dass Daten mit Ultraschall unbemerkt zwischen infizierten Computern ausgetauscht werden können. Die Techniken, die dabei eingesetzt wurden, entsprechen denen aus den Unterwassernetzwerken die hier vorgestellt wurden, da auch hier nur geringe Datenraten erzielt werden können.

Bei einem Versuchsaufbau konnten mit serienmäßig eingebauten Laptoplautsprechern und Mikrofonen bereits Reichweiten von bis zu 20 Metern erzielt werden. Zusätzlich konnte diese Reichweite durch den Einsatz des Netzwerkprotokolls GUWMANET weiter erhöht werden, indem Daten von Raum zu Raum weitergeleitet wurden. Somit konnte ein ganzes Botnetzwerk etabliert werden, durch das selbst vom Internet getrennte Geräte ausspioniert werden können.

Durch den Einsatz von GUWMANET+ und den darin integrierten DTN-Techniken, ist es sogar möglich, Daten mit Hilfe von infizierten mobilen Geräten aus Gebäuden heraus oder in Gebäude hinein zu bringen. Ein Ansatz, der von bisherigen Sicherheitskonzepten nicht berücksichtigt wird und somit ein völlig neues Bedrohungsrisiko darstellt.

## Literatur

- [2015] M. Goetz, I. Nissen, R. Otnes, P. van Walree, *Performance Analysis of Underwater Network Protocols within International Sea Trial*. IEEE Oceans, Genova, 2015.
- [2014] M. Hanspach, M. Goetz, *On Covert Acoustical Mesh Networks in Air*. 2013 the 3rd International Conference on Communication and Network Security (ICCNS 2013), London, 2013.
- [2012G] M. Goetz, I. Nissen, *GUWMANET - Multicast Routing in Underwater Acoustic Networks*. In Proceedings of MCC, Vol. 2, Warsaw, Poland, 2012.
- [2012N] I. Nissen, M. Goetz, *Generic Underwater Application Language (GUWAL) - Specification of Tactical Instant Messaging in Underwater Networks*. WTD71 - 0070/2012 FR, FWG, Kiel, 2012.
- [2012O] R. Otnes et al., *Underwater Acoustic Networking Techniques*. Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-25224-2.1.
- [2009N] I. Nissen, *Alternativ Ansatz zur verratsarmen Unterwasserkommunikation durch Verwendung eines Transienten im Kontext von IFS und JUWEL*. FWG Forschungsbericht IB 2009-3, 2009.
- [2009W] P. van Walree, G. Leus, *Robust Underwater Telemetry with Adaptive Turbo Multiband Equalization*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 34, No. 4, 2009.