

Kanalangepasste Unterwasserkommunikation

Ein Beitrag von DANIEL M. MIELKE

Der Bedarf an zuverlässiger, möglichst hochratiger Unterwasserkommunikation wächst in vielen Bereichen rasant an. Physikalisch bedingt sind nur Schallwellen unter Wasser über längere Distanzen ausbreitungsfähig. Doch der akustische Unterwasserkanal ist hinsichtlich der Ausbreitungsbedingungen (Mehrwegeausbreitung und Dämpfung) und der Kapazität (Datenrate, die fehlerfrei übertragen wird) hochgradig zeitvariant. Im Mobilfunk, wo adaptive Datenraten unterstützt werden, ist man schon seit den 90er Jahren weiter. Die Aufgabe bestand daher darin, ein robustes, adaptives Übertragungsverfahren zu entwickeln, um ein GSM-ähnliches Netzwerk unter Wasser zu realisieren.

Autor

Daniel M. Mielke studiert an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

dmmi@tf.uni-kiel.de

Unterwasserkommunikation | Unterwassermodem | Unterwasserkanal

1 Motivation

Die drahtlose Übertragung von Daten ist heutzutage in vielen Lebensbereichen eine Selbstverständlichkeit geworden. Jedoch sind praktisch all diese Systeme für die Nutzung an der Luft (z. B. Mobilfunknetze, WLAN) bzw. im Weltraum (z. B. Raumsonden, TV-Satelliten) ausgelegt. Drahtlose Kommunikation im Wasser ist im Verhältnis dazu wenig erforscht, obwohl auch hier zahlreiche Einsatzgebiete denkbar sind. Neben der naheliegenden Verwendung zur Kommunikation unter Tauchern oder bemannten U-Booten sind hier unter anderem unbemannte Sonden (AUVs) zu nennen. Es ist zu erwarten, dass diese in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen werden; sei es zur Ortung und zum Abbau von Bodenschätzen oder auch zur Vermessung von Gewässern.

Die drahtlose Kommunikation im Wasserkanal kann theoretisch auf verschiedene Weise erfolgen: *Elektromagnetische Wellen* kommen üblicherweise in den oben genannten Beispielen vor. Im Wasser sind diese jedoch aufgrund der besonderen Eigenschaften dieses Mediums problematisch. Höhere Trägerfrequenzen, die für eine akzeptable Datenrate erforderlich sind, erfahren eine sehr starke Dämpfung, sodass auch schon bei kürzesten Strecken Probleme auftreten. In einem Versuch konnte beobachtet werden, dass eine handelsübliche WLAN-Verbindung (802.11n, 2,4 GHz) bereits nach einigen wenigen Zentimetern zusammenbricht. *Optische Systeme* haben ebenfalls das Problem der kurzen Reichweite, was durch Streuung und Verunreinigungen im Wasser begründet ist. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es hierzu Projekte gibt, in denen die Reichweite durchaus über der Sichtweite liegt.

Unterwasserkommunikation mit *Schallwellen* stellt eine weitere interessante Option dar, die der Autor in seiner Bachelorarbeit mit dem Titel »Kanalangepasste Unterwasserkommunikation« untersucht hat. Zwar existieren bereits Unterwassermodems, die auf der Basis von Schallwellen Daten übertragen, doch sind diese in ihrer Datenrate sehr begrenzt (10 kBit/s) und wenig flexibel. Ziel der Arbeit war es, ein akustisches Unterwassermodem zu entwickeln, das erheblich höhere Daten-

raten als bestehende Systeme ermöglicht, sobald die Qualität des Übertragungskanals dies zulässt. Gleichzeitig soll die Kommunikation bei einer schlechteren Qualität des Kanals nach Möglichkeit nicht abbrechen. Diese Eigenschaften stellen ein kanaladaptives Verhalten dar. Zudem sollten mehrere Trägersignale parallel zum Einsatz kommen, um zum einen die Datenrate noch weiter zu steigern und um zum anderen auch die Ausfallsicherheit zu erhöhen.

2 Der Unterwasserkanal

Der Unterwasserkanal für Schallwellen weist einige Eigenschaften auf, die in ähnlicher Form auch in anderen Übertragungskanälen zu beobachten sind. Ein Beispiel stellt hier die Mehrwegeausbreitung des Signals dar: Befindet sich ein Nutzer mit seinem Mobiltelefon in einer Stadt, so werden die elektromagnetischen Wellen beispielsweise an Häuserfassaden reflektiert. Das Signal muss also einen längeren Weg zurücklegen als die direkte Verbindung (LOS, Line of Sight) zur Basisstation darstellt. Folglich kommt am Empfänger das gleiche Signal mehrfach zeitlich versetzt an.

Dasselbe Problem tritt auch im Unterwasserkanal auf, und zwar je nach Art des Gewässers unterschiedlich stark. Während Mehrwegeausbreitung auf offener See mitten in einem tiefen Gewässer eine untergeordnete Rolle spielt (die Entfernung zu potenziellen Reflektoren wie dem Meeresgrund ist so groß, dass die Komponenten ausreichend gedämpft werden), ist die Situation in einem Hafenbecken oder im Flachwasser eine ganz andere. Die letztgenannten Szenarien sind gute Beispiele für eine massive Mehrwegeausbreitung. Die Schallwellen werden vom Sender emittiert und breiten sich im Wasser aus. Zunächst erreichen sie über den LOS-Pfad den Empfänger, doch es findet zudem eine Reflexion an der Wasseroberfläche, dem Grund, an Spundwänden und Wasserfahrzeugen statt. Diese Mehrwegekomponenten erreichen ebenfalls den Empfänger, allerdings zu späteren Zeitpunkten. Man beachte, dass der Sender üblicherweise in der Zwischenzeit bereits neue Daten verschickt hat, deren Empfang durch die verzögerten Komponenten der vorherigen Übertragung

beeinträchtigt wird. Dieser Effekt fällt bei Schallwellen im Wasser deutlich stärker ins Gewicht als beispielsweise bei elektromagnetischen Wellen an der Luft. Der Grund dafür ist die erheblich geringere Geschwindigkeit, mit der sich Schall im Wasser im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Somit treten auch bei kurzen Distanzen zu einem Reflektor vergleichsweise große Verzögerungen auf. Dem Effekt der Mehrwegeausbreitung kann man, anders als bei anderen Störungen wie beispielsweise Rauschen, nur sehr bedingt mit einer erhöhten Sendeleistung begegnen, da hierbei auch die Intensität der Echos zunehmen würde.

Eine weitere wichtige Angabe bei der Einschätzung eines Kanals ist das Verhältnis von Signal und Rauschen (SNR, Signal to Noise Ratio). Das SNR hat direkten Einfluss auf die Kapazität eines Kanals, welche in der Informationstheorie eine zentrale Größe darstellt und die maximal mögliche Datenrate limitiert. In der Literatur werden als mögliche Störquellen für den akustischen Unterwasserkanal Wasserfahrzeuge, konkurrierende Kommunikationsstrecken, seismische Aktivität, Meerestiere oder auch das Brandungsrauschen genannt (Nasri et. al 2009).

Zudem muss beachtet werden, dass der Kanal stark frequenz- und zeitabhängig ist. Die Intensität der Schalldämpfung im Wasser ist abhängig von der Frequenz des Signals. Auch die im Wasser gelösten Chemikalien und Mineralstoffe haben einen Einfluss auf diese Dämpfung.

3 Kanaladaption

Eine Anpassung der Datenrate an die aktuelle Kanalqualität ist bei der drahtlosen Übertragung digitaler Daten heutzutage alltäglich. Als Beispiel sei hier das Mobilfunknetz erwähnt: Das ursprüngliche GSM-Netz mit seinem Datendienst GPRS ist nach wie vor im Einsatz. Es verwendet eine robuste Codierung sowie eine robuste Modulation, die stets für den *worst case* ausgelegt ist, unabhängig davon wie gut oder schlecht der Kanal tatsächlich ist. Als *worst case* kann zum Beispiel das Szenario

betrachtet werden, in dem sich der Nutzer am Rande einer Funkzelle befindet.

Über die Jahre wurde das bestehende System um modernere Modulations- und Codierungsverfahren erweitert. Diese Erweiterungen tragen Namen wie EDGE, EGPRS oder EGPRS-2 und ermöglichen höhere Datenraten als der anfängliche GPRS-Datendienst, sofern der Kanal dies zulässt (vgl. z. B. Kottkamp 2008).

Diese Idee wurde nun für die Entwicklung eines Unterwassermodems aufgegriffen. Zum Einsatz kommen die Codierungs- und Modulationsverfahren der oben aufgeführten Systeme, zwischen denen je nach Kanalqualität (vordergründig in Abhängigkeit des SNR) gewechselt werden kann. Offensichtlich ist hierbei eine Abschätzung der Qualität des Kanals erforderlich. Diese kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen, deren Eignung im Rahmen der Arbeit untersucht wurden.

4 Träger

Um Daten drahtlos zu übertragen, wird der Datenstrom aus dem Basisband auf einen Träger höherer Frequenz moduliert, sodass die Übertragung in einem Frequenzbereich stattfindet, der zu dem verwendeten Kanal passt. Um den Durchsatz zu erhöhen, besteht zudem die Möglichkeit, den Datenstrom aufzuteilen und auf mehrere verschiedene Träger parallel zu verteilen (Abb. 1). Die Trägerfrequenzen müssen dabei so gewählt werden, dass es nicht zu störenden Überlappungen im Frequenzbereich kommt. Gleichzeitig liegt es nahe, die Träger so zu wählen, dass die verfügbare Bandbreite effektiv ausgenutzt wird.

Die Bandbreite eines Trägers steht in direktem Zusammenhang mit der Samplingrate, also der Rate mit der die Daten des erzeugten Signals verschickt werden. Mit verschiedenen Samplingraten treten auch die Effekte der Mehrwegeausbreitung unterschiedlich in Erscheinung. Neben der Anpassung von Modulation und der Codierung kann also auch durch eine Adaption der Samplingrate auf eine Veränderung des Kanals reagiert werden.

Nominiert für den DHyG Student Excellence Award 2015

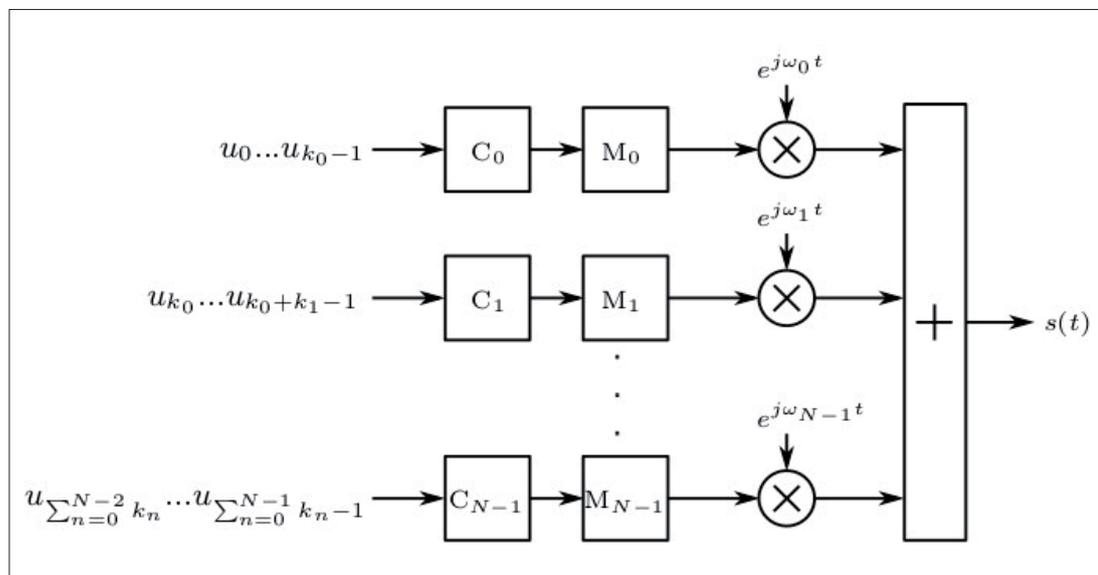


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Senders mit N Trägern. C bezeichnet einen Codierer, M einen Modulator, u_i beschreibt das i -te Datenbit, $\omega_n = 2\pi f_n$ die Kreisfrequenz des n -ten Trägers. Der n -te Träger kann k_n Bits aufnehmen

Wie bereits in der Beschreibung des Kanals erwähnt, weist der Unterwasserkanal eine Frequenzabhängigkeit auf. Zudem können Störungen manche Träger mehr betreffen als andere. Diese Umstände motivieren dazu, die Adaption von Modulation und Codierung für jeden Träger separat vorzunehmen.

5 Realisierung

In der Arbeit wurde ein Modem nach dem Konzept des *Software Defined Radio* entwickelt. Das bedeutet, dass die Signalverarbeitung, beispielsweise Codierung und Modulation, sowohl sende- als auch empfangsseitig von einem Computerprogramm durchgeführt wird. Die Software des Modems wurde in C++ entwickelt und ist modular aufgebaut. Sie ermöglicht die Simulation (sowohl im Basisband als auch im Bandpassbereich) sowie die praktische Übertragung von Daten durch das Wasser.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt blockweise. Jeder Block (üblicherweise *Frame* genannt) ist in acht Unterblöcke, *Bursts* genannt, unterteilt. Die zeitliche Länge der Blöcke ist ausschließlich von der verwendeten Samplerate und nicht von der Codierung oder der Modulation abhängig. Auch die Anzahl der Datensymbole, die pro Block übertragen werden, ist stets gleich. Dennoch kann die Datenrate erhöht werden, indem mehrere Bits einem Datensymbol zugewiesen werden. Diese Zuweisung erfolgt im Rahmen der Modulation und ist daher vom verwendeten Modulationssystem abhängig. Betrachtet man das ursprüngliche GSM-Netz, so kommt hier *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um eine robuste Modulation, die allerdings nur ein Bit pro Datensymbol übertragen kann. Weitere im Modem verfügbare Modulationen sind 8-PSK (Phase Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) und 32-QAM, die drei, vier bzw. fünf Bits pro Datensymbol übertragen können. Diese kommen alle in den eingangs erwähnten Erweiterungen des GSM-Standards zum Einsatz. Ein Datensymbol stellt

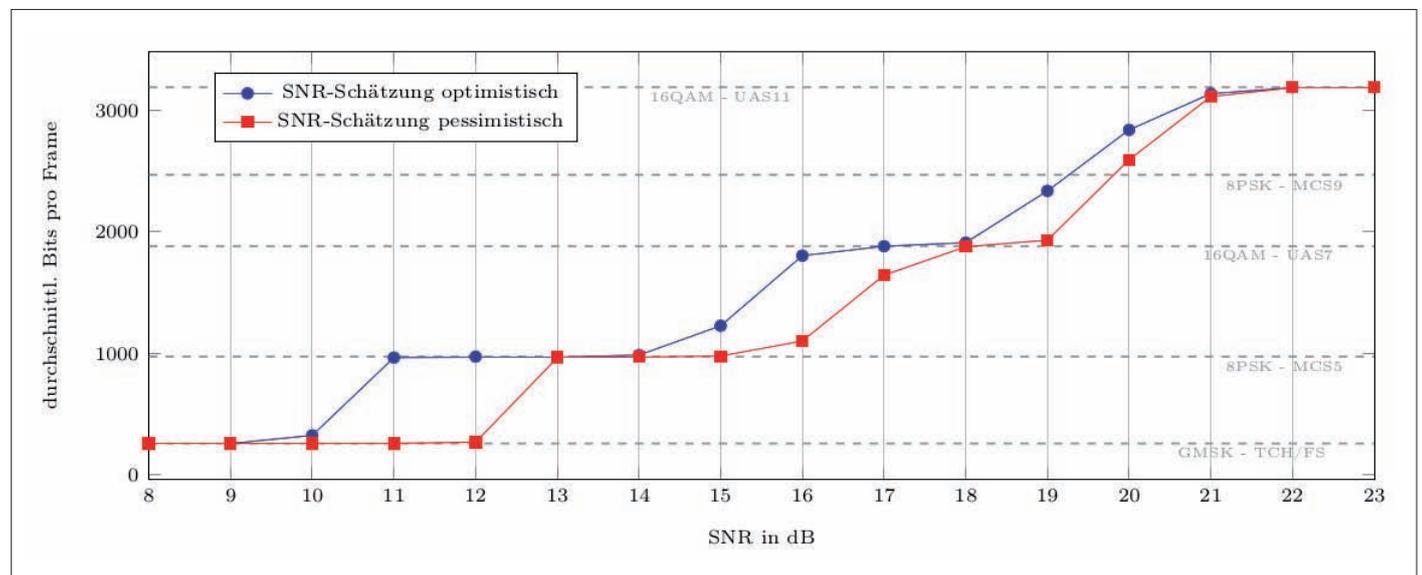
dabei einen eindeutigen Punkt in der Gaußschen Zahlenebene dar, dessen genaue Position von der Bitkombination, welche auf das Symbol gemappt werden soll, bestimmt wird. Die Auswertung von Real- und Imaginärteil dieses Punktes in Verbindung mit einer Pulsformung führen zu einem komplexen Basisbandsignal. Die Komponenten dieses Signals können nun auf einen Träger (fast) beliebiger Frequenz gemischt werden. Welche Modulation zum Einsatz kommt, ist von der Qualität des Kanals abhängig. Für einen schlechten Kanal, das heißt mit niedrigem SNR, bietet sich das langsame, aber robuste GMSK an. Ein höherratiges Modulationsschema wie 16-QAM oder gar 32-QAM erfordert ein deutlich besseres SNR.

In Abb. 2 befindet sich ein Diagramm, welches die durchschnittliche Bitanzahl pro Frame bei einer Simulation über verschiedene SNR-Werte angibt. Die Adaption der Datenrate wurde über eine empfängerseitige Schätzung des SNR durchgeführt.

Neben dem Modulationsverfahren hat auch die Kanalcodierung Einfluss auf die Datenrate. Aufgabe der Kanalcodierung ist es, den Bitstrom gegen Übertragungsfehler zu sichern; in der Regel geschieht dies durch Hinzufügen von Redundanz. Dies reduziert allerdings die Anzahl der Informationsbits, die pro Block übertragen werden können. Außer für GMSK stehen in der Software für jede Modulationsart je zwei unterschiedlich robuste Codierer zur Verfügung. Es handelt sich hierbei überwiegend um Faltungs- bzw. Turbocodes.

Es ergeben sich aus den aufgeführten Modulations- und Codierungsschemata sieben verschiedene Datenraten, zwischen denen je nach Kanalqualität gewechselt werden kann. Hierzu ist eine Abschätzung der Kanalqualität unabdingbar. Diese erfolgt beim Empfänger nach jedem übertragenen Block anhand verschiedener Parameter, von denen hier nur einige kurz erwähnt seien: Ist die gesendete Bitfolge bekannt, so kann aus der Anzahl der Bitfehler auf die Qualität des Kanals geschlossen werden. Dieser Umstand ist jedoch nur

Abb. 2: Simulation im Basisband mit Adaption auf Basis der SNR-Schätzung mit zwei verschiedenen Sprunggrenzen. Die Bitraten der verschiedenen Codierungs- und Modulationssysteme sind zur Orientierung ebenfalls gegeben. Die Simulation pro SNR-Wert wurde entweder nach 10 Bitfehlern oder nach 50 000 Frames abgebrochen



in Testumgebungen oder bei Trainingssequenzen gegeben. Weitere Möglichkeiten bestehen darin, Algorithmen zur SNR-Abschätzung zu verwenden oder die sogenannten *weichen Entscheidungen* des Codierers zu beobachten. Diese geben Aufschluss darüber, wie eindeutig eine Bitentscheidung war. Sind die Entscheidungen beispielsweise überwiegend nahe der Entscheidungsschwelle, ist die Wahrscheinlichkeit falscher Entscheidungen groß und das verwendete Schema nicht für den aktuellen Kanal geeignet.

Die oben aufgeführten Operationen lassen sich parallel und unabhängig voneinander auf alle Träger anwenden. Jeder Träger kann somit individuell angepasst oder im Falle einer sehr starken Störung ganz abgeschaltet werden.

Die Nutzung mehrerer Träger zur parallelen Übertragung von Daten sowie die jeweilige Anpassung an den Kanal stellen besondere Merkmale dar, die in dieser Form in keinem dem Autor bekannten Unterwassermodem derzeit Verwendung finden. Diese Eigenschaften führen zu höherer Zuverlässigkeit sowie Datenraten. Die höhere Zuverlässigkeit ist unter anderem dadurch begründet, dass nicht auf einer fixen Trägerfrequenz gearbeitet wird, sondern diese anpassbar ist oder auch mehrere Frequenzen gleichzeitig genutzt werden können. Zusätzlich ermöglichen die robuste Modulation und Codierung auch bei schwächeren Kanälen noch eine Datenübertragung. Doch auch gerade bei einer guten Verbindung zeigen sich die Vorteile dieses Ansatzes. Werden viele Träger (je nach Samplerate und verwendeter Hardware sind deutlich über 40 Träger realistisch) sowie jeweils hochratige Modulationsverfahren wie 32-QAM genutzt, sind Datenraten möglich, die über zehnmal so hoch sind wie die herkömmlicher Modems in diesem Bereich.

6 Praxistest

Neben Simulationen wurden auch einige Messungen in der Kieler Förde durchgeführt. Dabei kam folgender Aufbau zum Einsatz:

Die oben beschriebene Software verfügt über eine Schnittstelle zu einem USB-Interface (Diligent Analog Discovery). Das Signal aller Träger wird nach deren Erzeugung überlagert, sodass nur noch ein einziges digitales Audiosignal verbleibt. Dieses wird an das USB-Interface übertragen, welches einen Digital-Analog-Wandler (DAC) enthält. Das nun analoge Audiosignal wird jetzt von einem Hydrophon (Reson TC4033) ausgestrahlt. Die Empfängerseite hat einen vergleichbaren Aufbau: Ein Hydrophon gleichen Typs empfängt das Signal. Dieses wird verstärkt (Reson EC6061/VP1000) und an das USB-Interface übertragen. Der interne Analog-Digital-Wandler (ADC) erzeugt daraus das digitale Signal, welches von der Software ausgewertet wird. Hierzu wird das empfangene Signal nach einer Synchronisation in die einzelnen Träger zerlegt. Dann wird für jede Komponente einzeln die zum aktuellen Modulations- und Codierungsschema gehörige Demodulation und Decodierung durchgeführt. Anschließend wird anhand der Ergebnisse entschieden, ob die aktuelle Konfiguration zur geschätzten Kanalqualität passt.

Man beachte, dass der Übertragungskanal aus informationstheoretischer Sicht nicht erst nach dem Hydrophon beginnt bzw. davor endet, sondern dass die analogen Elemente wie Verstärker und Hydrophone auch zum Kanal gezählt werden können. Im konkreten Beispiel konnte eine Frequenzabhängigkeit der Hydrophone beobachtet werden, die zu unterschiedlichen Werten für das SNR der einzelnen Träger führte (Abb. 3).

In den Testläufen wurden Daten bei verschiedenen Sampleraten auf unterschiedlichen Trägern bzw. Kombinationen von Trägern übertragen. Dabei wurden Abstand sowie Winkel der Hydrophone verändert, um künstlich Einfluss auf den Kanal zu nehmen. Es konnte beobachtet werden, wie das System bei einer Verschlechterung des Kanals auf robustere Modulation/Codierung wechselte und bei einer Verbesserung auf höherratige Schemata auswich. [↕](#)

Literatur

- Nasri, Nejah; Laurent Andrieux; Abdennaceur Kachouri; Mounir Samet (2009): Behavioral Modeling and Simulation of Underwater Channel; WSEAS Transactions on Communications, Bd. 8, Februar 2009, S. 259–268
- Kotkamp, Meik (2008): EDGE Evolution Technology Introduction – Application Note 1MA129; Rohde & Schwarz, März 2008

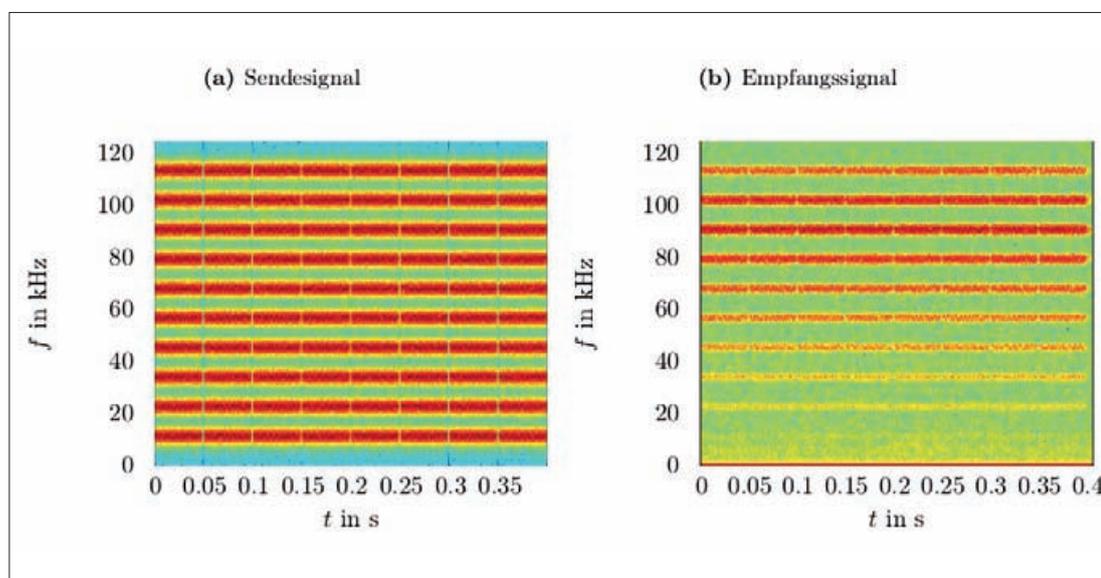


Abb. 3: Spektrogramme mit $I_{FFT} = 512$ einer Übertragung von acht Bursts, zehn Trägern mit 8-PSK-Modulation und MCS9-Codierung, Entfernung ca. 1 m, Samplerate: 250 kHz, 80 Samples pro Symbol. Gut zu erkennen sind die einzelnen Bursts und Träger, sowie deren unterschiedliche Dämpfung, verursacht durch die Charakteristik der Hydrophone