

# Akustische Vermessung der Luftpulser Quellen des Forschungseisbrechers *Polarstern* im Herdlefjord, Norwegen

M. Breitzke<sup>1)</sup>, O. Boebel<sup>1)</sup>, S. El Naggar<sup>1)</sup>, W. Jokat<sup>1)</sup>, B. Werner<sup>2)</sup>, J. Diebold<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

<sup>2)</sup> Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen (WTD 71), Eckernförde

<sup>3)</sup> Lamont Doherty Earth Observatory, Palisades (NY), USA

e-mail: [Monika.Breitzke@awi.de](mailto:Monika.Breitzke@awi.de)

## Kurzfassung

Im Rahmen von wissenschaftlichen Programmen zur Untersuchung der geodynamischen, plattentektonischen und paläozeanographischen Entwicklungsgeschichte des Antarktischen Ozeans werden von dem FS *Polarstern* marine seismische Messungen mit unterschiedlichen Luftpulsern (Air Guns) und Luftpulser Arrays durchgeführt. Um in Diskussionen über einen möglichen Einfluss anthropogener Schallquellen auf marine Säuger die Lautstärken dieser Quellen quantifizieren zu können, wurden im Oktober 2003 die räumlichen Verteilungen ihrer Schallfelder in Zusammenarbeit mit der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen (WTD 71), Eckernförde im Herdlefjord (Heggernes Messstation), Norwegen entlang von 2 bis 3 km langen Profilen mit zwei fest verankerten, kalibrierten Hydrophonketten in Tiefen von 35, 100, 198 und 263 m unter der Meeresoberfläche breitbandig (0 - 80 kHz) vermessen. Dabei kamen eine GI- (2.4 l), eine G- (8.5 l) und eine Bolt-Gun (32.8 l) als Einzelquellen und ein 3 GI- (7.4 l), ein 3 G- (25.5 l) und ein 8 VLF-Gun Array (24 l) zum Einsatz. Ergänzt wurden diese Vermessungen durch Modellrechnungen für die zur Zeit ebenfalls auf marin-seismischen Expeditionen verwendeten 8 G- (68.2 l) und 8 G + 1 Bolt-Gun Arrays (100.1 l). Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Vermessungen und Modellierungen exemplarisch vorgestellt und diskutiert.

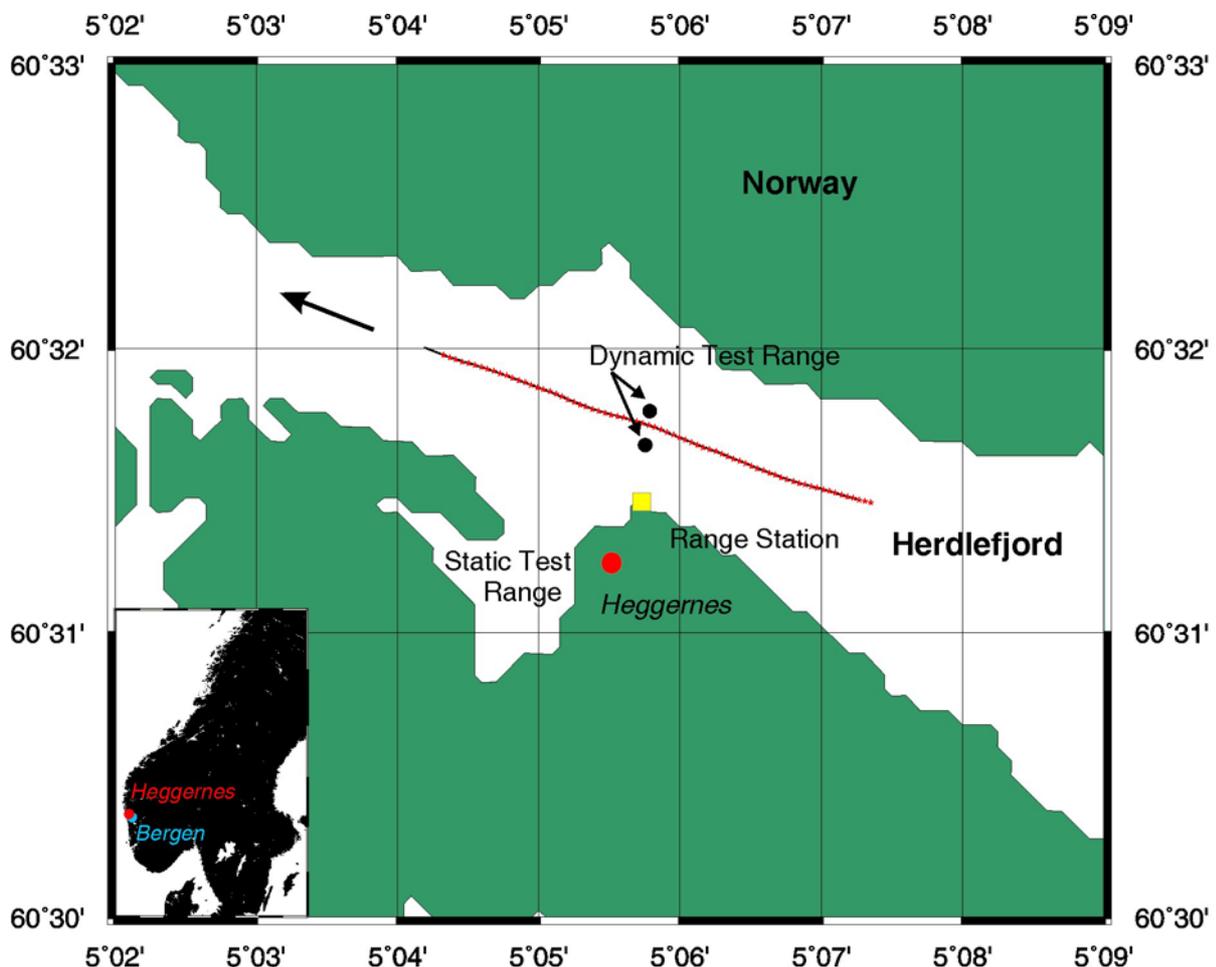
## Einleitung

Diskussionen über einen möglichen Einfluss anthropogener Schallquellen auf das Verhalten mariner Säuger und Auflagen des Umweltbundesamtes zur Durchführung marin-seismischer Messungen im Antarktischen Ozean südlich von 60°S erfordern die Bestimmung und Überwachung von Mitigationsradien um und unter dem FS *Polarstern*, innerhalb derer marine Säuger aufgrund des vorherrschenden Schalldruckpegels eventuell atypische Verhaltensmuster aufweisen oder durch temporäre Hörschwellenverschiebungen (TTS) geschädigt werden könnten. Die Grenzwerte des Schalldruckpegels, oberhalb derer solche Verhaltensänderungen oder temporären Hörschwellenverschiebungen potentiell bei marinen Säugern einsetzen, wurden in den letzten Jahren mehrfach geändert und herabgesetzt. Die momentan am häufigsten angewandten Grenzwerte wurden vom "National Marine Fisheries Service" (NMFS), USA definiert und liegen bei 160 dB<sub>RMS</sub> re 1 µPa für Verhaltensänderungen und 180 dB<sub>RMS</sub> für temporäre Hörschwellenverschiebungen für Wale und 10 dB<sub>RMS</sub> höher für Robben (NMFS, 2003). Darüber hinaus wurde von einer Expertengruppe ("Noise Exposure Criteria Group") des NMFS ein neues 2-Punkte Kriterium entwickelt, das den unterschiedlichen Signalcharakteristiken impulsartiger, breitbandiger seismischer Signale und zeitlich länger andauernder, quasi-monofrequenter Signale wissenschaftlicher und militärischer Sonare Rechnung trägt und möglicherweise in Kürze die 160 bzw. 180 dB<sub>RMS</sub> Grenzwerte ersetzt. Dieses 2-Punkte Kriterium berücksichtigt sowohl die maximale Schalldruckamplitude ("Zero-to-Peak") als auch die Signaldauer und -energie und definiert, dass akustische Signale, die entweder einen Schalldruckpegel von 224 dB re 1 µPa überschreiten oder eine Signalenergie ("sound exposure level") größer als 183 dB re 1 µPa<sup>2</sup>s für impulsartige, breitbandige Signale und 195 dB re 1 µPa<sup>2</sup>s für länger andauernde, quasi-

monofrequente Töne überschreiten, gegebenenfalls eine temporäre Hörschwellenverschiebung bei Walen hervorrufen. Für Robben liegen die entsprechenden Grenzwerte 20 dB<sub>RMS</sub> niedriger (Noise Exposure Criteria Group, 2004).

## Messanordnung

Um diese Grenzwerte und die zugehörigen Sicherheitsradien für die von dem FS *Polarstern* eingesetzten marin-seismischen Quellen bestimmen und bei zukünftigen Schiffsexpeditionen einhalten zu können, wurden die räumlichen Verteilungen ihrer Schallfelder in Zusammenarbeit mit der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen (WTD 71), Eckernförde im Herdle Fjord, Norwegen entlang von 2 bis 3 km langen Profilen mit zwei fest verankerten, kalibrierten Hydrophonketten in Tiefen von 35, 100, 198 und 263 m unterhalb der Meeresoberfläche vermessen. Dabei kamen eine 2.4 l GI-Gun, eine 8.5 l G-Gun und eine 32.8 l Bolt-Gun als Einzelquellen und ein 3-GI-Gun (7.4 l), ein 3-G-Gun (25.5 l) und ein



**Abbildung 1.** Karte der akustischen Vermessungsstrecke ("Heggernes Acoustic Range") im Herdle-fjord, nahe Bergen, Norwegen (s. kleine Karte unten links). Die schwarzen Punkte markieren die Positionen der Hydrophonketten. Diese sind über Kabel mit der landseitigen Messstation (gelbes Quadrat) bei Heggernes, in der die Daten digital aufgezeichnet werden, verbunden. Der Pfeil zeigt die Fahrtrichtung des Schiffes und die schwarze Linie den Schiffskurs eines Überlaufs zur Vermessungen einer Quellkonfiguration - hier der einzelnen G-Gun (8.5 l) - an. Die roten Sterne auf der Schiffskurslinie kennzeichnen die Schusspositionen.

8-VLF-Gun Array (24 l) zum Einsatz. Abbildung 1 zeigt die Position dieser Hydrophonketten im Herdlefjord, die landseitige Messstation in Heggernes, die mit den Hydrophonketten durch Kabel verbunden ist, sowie als Beispiel den Schiffskurs des FS *Polarstern* zur akustischen Vermessungen der einzelnen G-Gun.

## Ergänzende Modellrechnungen

Ergänzt wurden diese Vermessungen durch Modellrechnungen für die zur Zeit ebenfalls auf marin-seismischen Expeditionen verwendeten 8-G-Gun (68.2 l) und 8-G + 1-Bolt-Gun Arrays (100.1 l). Diese Modellrechnungen wurden mit dem Modul MASOMO des kommerziell bei der Firma PGS verfügbaren Software Paketes NUCLEUS sowie einer von J. Diebold (Lamont Doherty Earth Observatory) entwickelten Software am Lamont Doherty Earth Observatory, Palisades (NY), USA durchgeführt.

## Messdaten, Auswertung und Ergebnisse

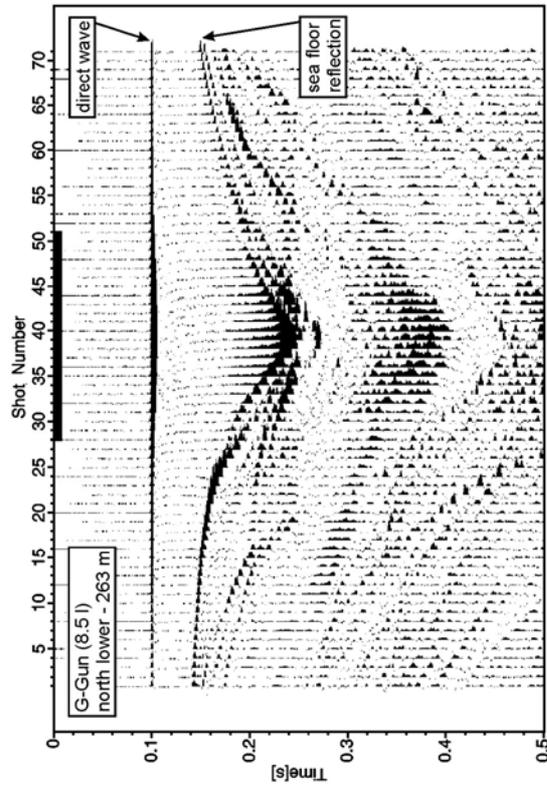
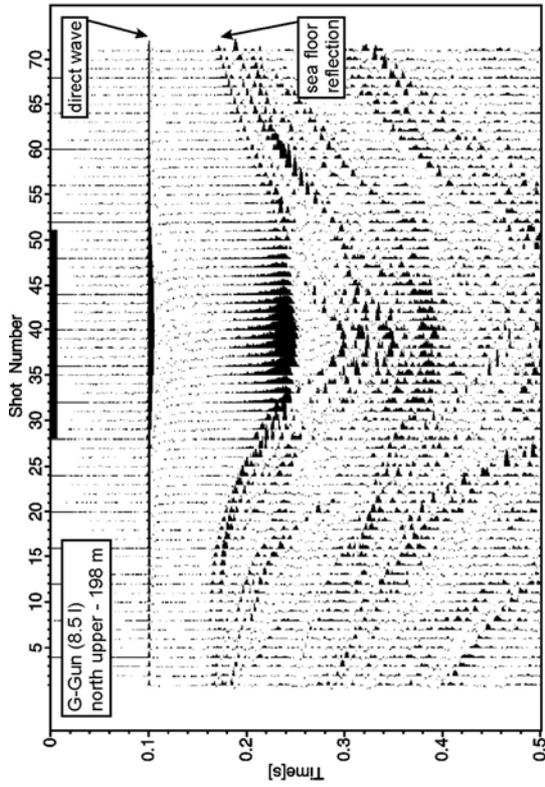
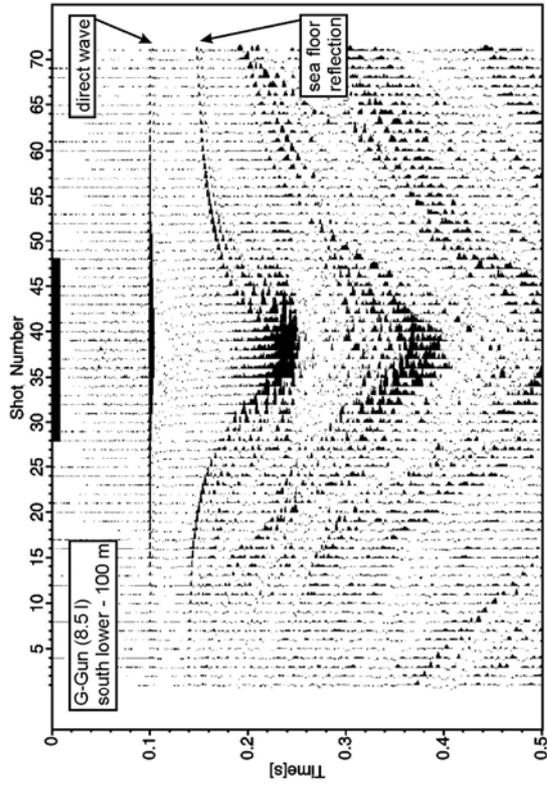
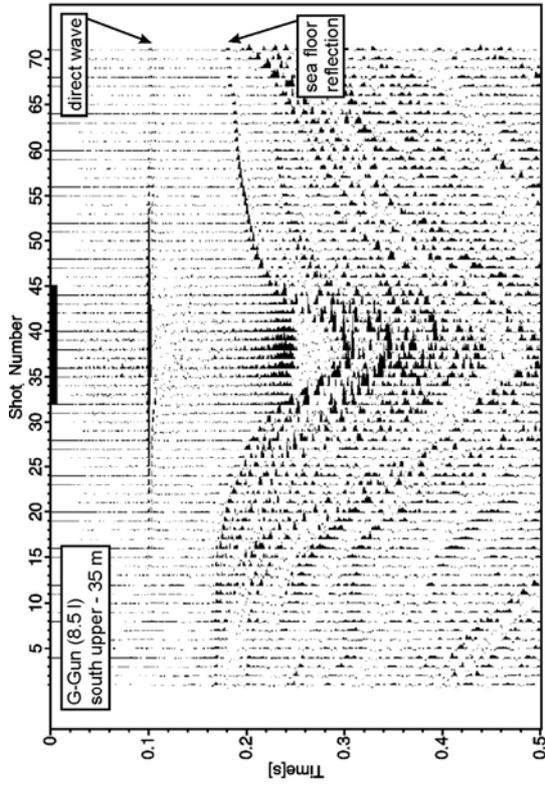
Als Beispiel für die Messdaten zeigt Abbildung 2 die an den 4 Hydrophonen während des Überlaufs mit der einzelnen G-Gun aufgezeichneten und in VA- (variable area) Schraffur dargestellten "Common Receiver Gather".

Mess- und Modelldaten wurden entsprechend des von der "Society of Exploration Geophysicists" (SEG) festgelegten Standards zur Spezifizierung mariner seismischer Energiequellen (Johnston et al., 1988) bezüglich ihrer Maximal- ("Peak-to-Peak", "Zero-to-Peak") und RMS Amplituden, ihrer Signaldauer sowie ihrer Frequenz- und Energiegehalte ("Sound Exposure Level" (SEL)) als Funktion der Quelle-Empfänger Distanz analysiert, so dass sowohl das derzeit gültige RMS-Amplituden Kriterium als auch das möglicherweise zukünftig geltende druck- und energie-basierte 2-Punkte Kriterium berücksichtigt werden kann.

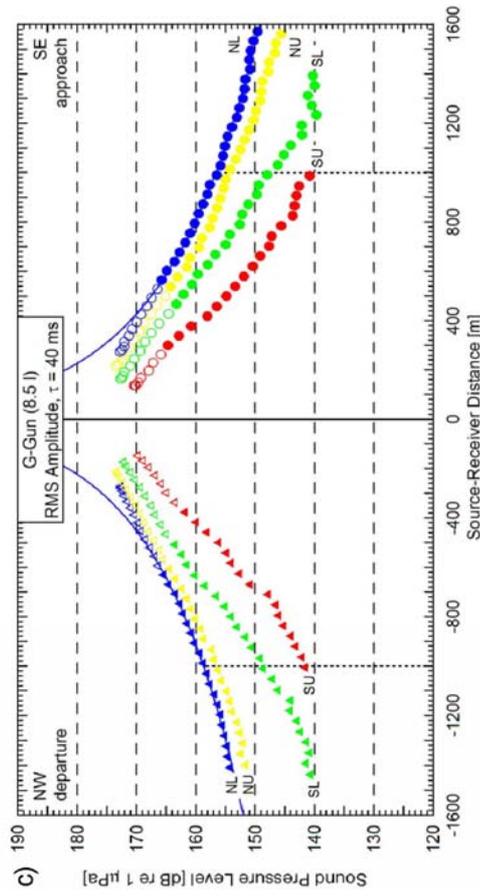
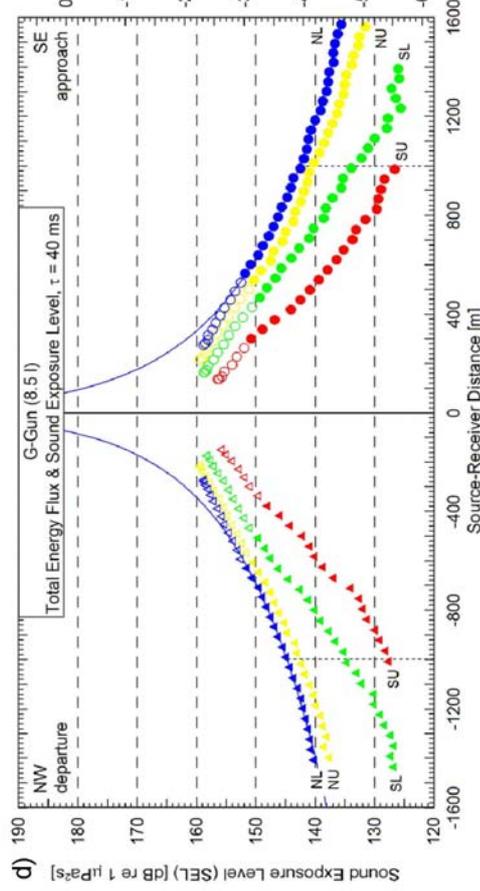
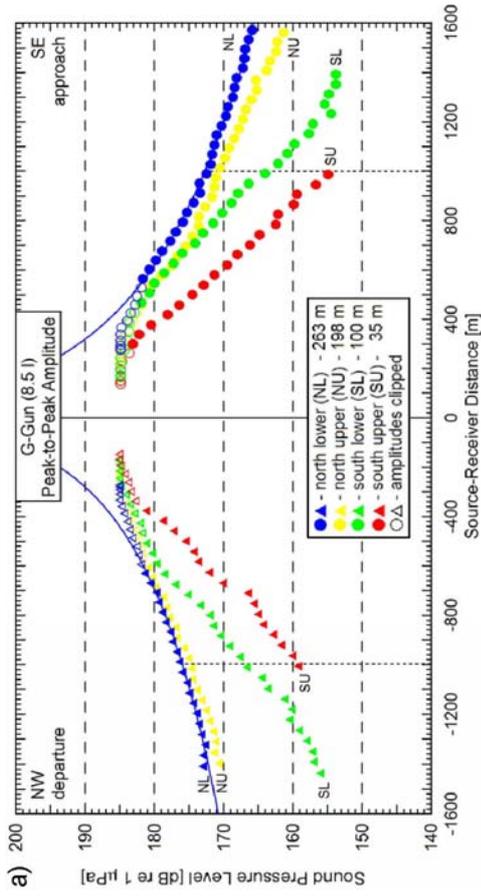
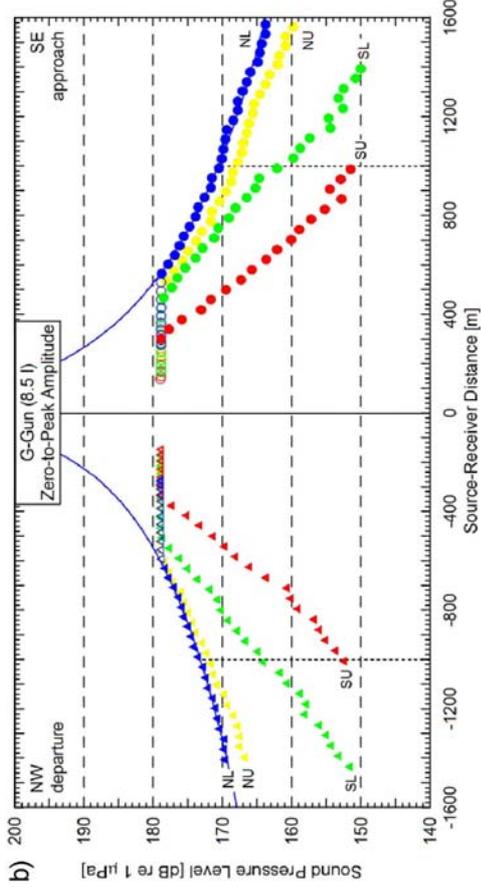
Abbildung 3 zeigt als Beispiel die "Peak-to-Peak"-, "Zero-to-Peak"- und RMS-Amplituden sowie die "Sound Exposure Levels" (SEL), die für die einzelne G-Gun aus den Amplituden der Ersteinsätze als Funktion der Quelle-Empfänger Distanz ausgewertet wurden. Diese, sowie auch die entsprechenden Kurven der aller anderen Quellkonfigurationen spiegeln im wesentlichen die durch die destruktive Interferenz von primärem Signal und Ghost-Reflexion bedingte Signalauslöschung nahe der Meeresoberfläche und die damit verbundene dipolartige Richtcharakteristik mariner seismischer (Einzel-) Quellen wider ("Lloyd Mirror Effekt") (Parkes und Hatton, 1986). Darüber hinaus zeigt ein Vergleich der Amplituden und Energien beim An- und Ablaufen auf die Hydrophonstationen, dass insbesondere bei flach und schiffsnah geschleppten Quellen der Rumpf des FS *Polarstern* die Wellenausbreitung abschattet, so dass beim Anlaufen beispielsweise in 1000 m Quell-Empfänger Distanz niedrigere Amplituden und Energien aufgezeichnet wurden als in gleicher Entfernung beim Ablaufen in -1000 m Quell-Empfänger Distanz.

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen entfernungsabhängigen Amplituden- und Energiekurven aller vermessenen Airgun- und Airgun-Array Konfigurationen sind in Abbildung 4 die "Peak-to-Peak"-, "Zero-to-Peak"- und RMS-Amplituden sowie die "Sound Exposure Levels" (SEL) dargestellt, die aus den Daten, die an dem Hydrophon in 263 m Tiefe ("North Lower" (NL)) ausgewertet wurden, dargestellt. Aus diesen Kurven wurden die Mitigationradien abgeleitet, innerhalb derer marine Säuger entsprechend dem RMS-Amplituden oder dem Maximalamplituden und Energie-basiertem 2-Punkte Kriterium möglicherweise eine temporäre Hörschwellenverschiebung (TTS) erfahren. Im Fall des RMS-Kriteriums liegen diese Radien zwischen 200 und 600 m für die Einzelquellen und zwischen 300 und 1300 m für die vermessenen und modellierten Arrays. Im Fall des Maximalamplituden- und Energie-basierten 2 Punkte Kriteriums variieren sie zwischen 50 und 300 m für die Einzelquellen und zwischen 100 und 300 m für die Arrays.

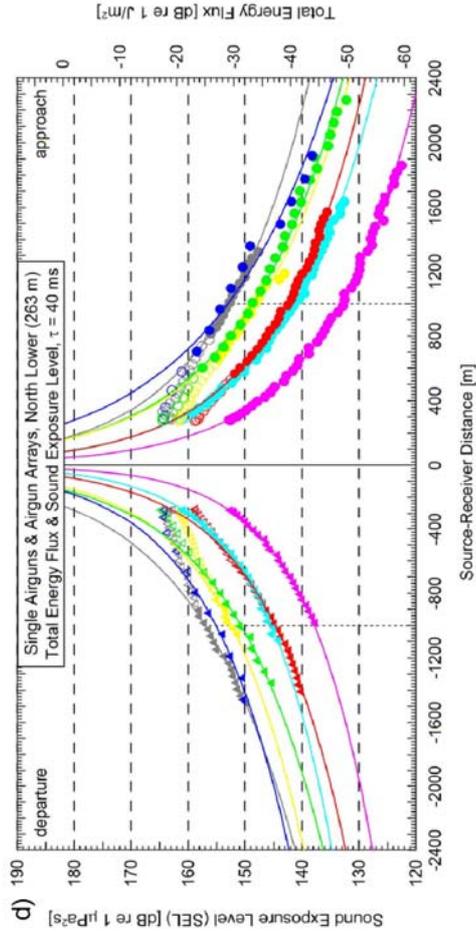
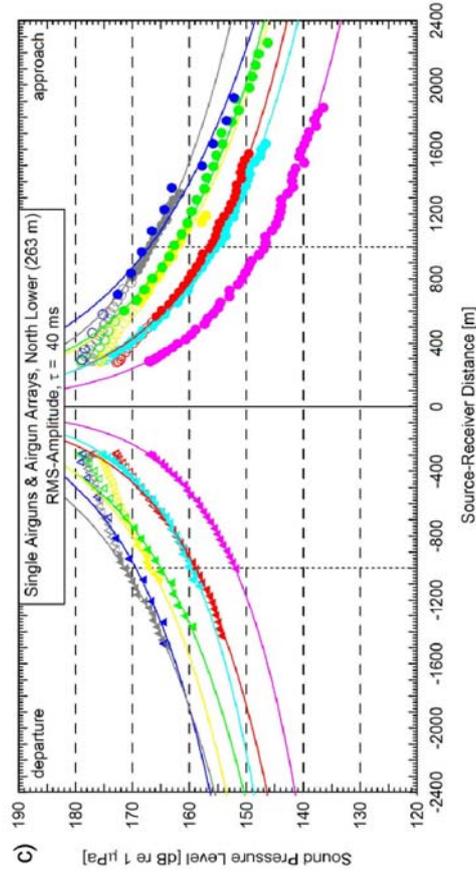
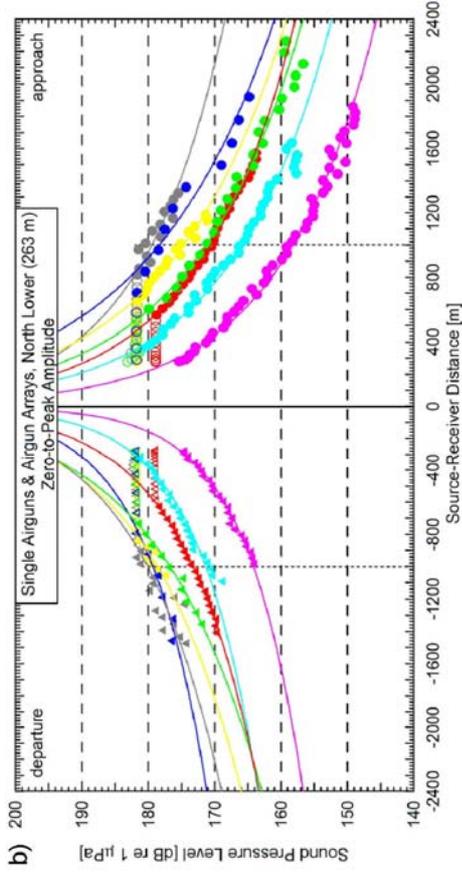
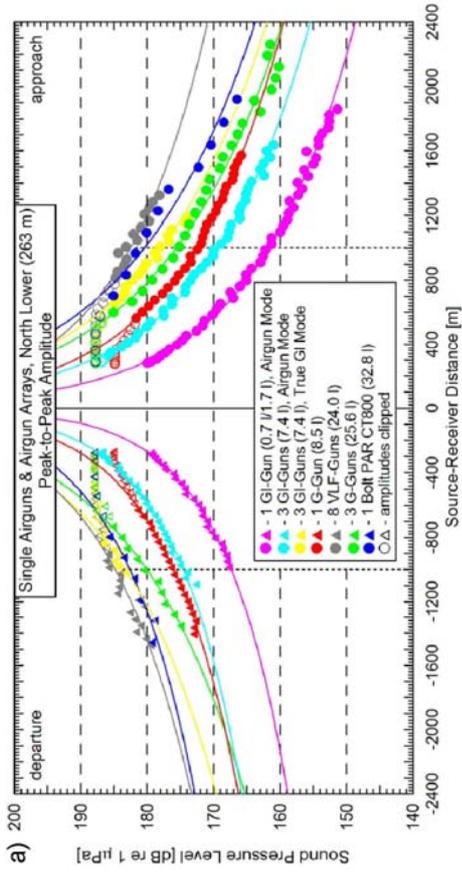
Darüber hinaus wurden aus den "Zero-to-Peak" Amplitudenkurven durch Extrapolation und unter Annahme eines sphärischen  $1/r$  Amplitudenabfalls theoretische, nominelle Quellschallpegel für 1 m Entfernung berechnet. Diese zurückgerechneten nominellen Quellschallpegel betragen 224 bis 239  $\text{dB}_{0\text{-pk}}$  re  $1 \mu\text{Pa}$  @ 1 m für die Einzelquellen und 232 bis 250  $\text{dB}_{0\text{-pk}}$  re  $1 \mu\text{Pa}$  @ 1 m für die Arrays.



**Abbildung 2.** "Common-Receiver Gathers", die bei der Vermessung der einzelnen G-Gun mit den beiden Hydrophonketten aufgezeichnet wurden. Die 4 verschiedenen Hydrophontiefen und -positionen sind jeweils in der linken oberen Ecke der Seismogrammsektionen angegeben. Die Ersteinsätze der direkten Welle wurden auf eine beliebig gewählte, konstante Laufzeit von 0.1 s ausgerichtet, um eine spätere automatische Auswertung der Amplituden und Spektren der Ersteinsätze zu vereinfachen. Die Verstärkungsfaktoren und -funktionen aller Aufzeichnungsinstrumente wurden zurückgerechnet und alle Amplituden in Pascal konvertiert, so dass ein Amplitudenvergleich zwischen den 4 Sektionen möglich ist. Um schwache Amplituden besser sichtbar zu machen, wurden die Amplituden 5fach überhöht dargestellt. Der schwarze Balken oben in jeder Seismogrammsektion markiert den Entfernungsbereich, in dem die Amplituden übersteuert wurden.



**Abbildung 3.** "Peak-to-Peak", "Zero-to-Peak", "Sound Exposure Levels" (SEL) der Vermessung der einzelnen G-Gun als Funktion der Quelle-Empfänger-Distanz, aufzeichnet mit beiden Hydrophonketten. Ein Fenster von  $\tau = 40$  ms Dauer ( $0,85 - 1,25$  ms) wurde zur Berechnung der RMS Amplituden und der "Sound Exposure Levels" verwendet. Die 4 Hydrophontiefen und -positionen sind durch Farben markiert (s. Legende). Offene Symbole zeigen übersteuerte Amplituden an. Positive Quelle-Empfänger Distanzen wurden für das Anlaufen des FS *Polarstern* auf die Hydrophonstationen, negative Quelle-Empfänger Distanzen für das Ablaufen von den Hydrophonstationen verwendet. Ein Vergleich der Amplituden bei  $\pm 1000$  m Quelle-Empfänger-Distanz (punktierter Linie) zeigt einen Abschattungs-effekt durch den Schiffsrumpl, derart, dass ein Anlaufen niedriger Amplituden als beim Ablaufen registriert wurden. An die auf dem "North Lower" (NL) Hydrophon aufgetzeichneten Amplituden und Energien (SELs) wurden logarithmische Ausgleichskurven ("logarithmic least square fits") angepasst und als durchgezogene Linien dargestellt. Diese wurden zur Bestimmung der Mitigationsradien verwendet, wenn die Grenzwerte für eine potentielle Hörschwellenverschiebung oder Verhaltensänderung ausserhalb des Messwertbereiches lag.



**Abbildung 4.** "Peak-to-Peak", "Zero-to-Peak", "Sound Exposure Levels" (SEL) aller Airgun Konfigurationen, aufzeichnet auf dem "North Lower" Hydrophon in 263 m Tiefe unterhalb der Meeresoberfläche. Ein Fenster von  $\tau = 40$  ms Dauer (0.85 - 1.25 ms) wurde zur Berechnung der RMS-Amplituden und der "Sound Exposure Levels" (SEL) verwendet. Die unterschiedlichen Airgun Konfigurationen sind durch Farben markiert (s. Legende). Offene Symbole zeigen übersteuerte Amplituden an. Positive Quelle-Empfänger Distanzen wurden für das Anlaufen des FS *Polarstern* auf die Hydrophonketten, negative Quelle-Empfänger Distanzen für das Ablaufen von den Hydrophonketten verwendet. Ein Vergleich der Amplituden bei  $\pm 1000$  m Quelle-Empfänger Distanz (punktierter Linie) zeigt einen Abschattungseffekt durch den Schiffsrumf, derart, dass beim Anlaufen niedrigere Amplituden als beim Ablaufen registriert wurden. An die Messdaten wurden logarithmische Ausgleichskurven ("logarithmic least square fits") angepasst und als durchgezogene Linien dargestellt. Diese wurden zur Bestimmung der Mitigationradialen verwendet, wenn die Grenzwerte für eine potentielle Hörschwellenverschiebung oder Verhaltensänderung ausserhalb des Messwertbereiches lag.

Eine Untersuchung der Amplitudenspektren aller aufgezeichneten Signale ergab, dass die maximalen spektralen Levels bei allen Airgun und Airgun Array Konfigurationen unterhalb von 100 Hz liegen und zwischen 182 bis 194 dB re 1  $\mu$ Pa/Hz @ 1m variieren. Die spektralen Levels nehmen mit zunehmender Frequenz kontinuierlich ab und weisen bei 1 kHz etwa 40 und bei 80 kHz etwa 60 dB re 1  $\mu$ Pa/Hz niedrigere Werte als das spektrale Maximum auf. Ein Vergleich mit den Amplitudenspektren der Schiffsgeräusche des FS *Polarstern* zeigt, dass oberhalb von 1 kHz die Amplitudenspektren der Airgun Signale durch das Eigenrauschen des FS *Polarstern* dominiert sind.

## Literatur

- Johnston, R. C., Reed, D. H., and Desler, J. F. (1988), Special Report of the SEG Technical Standards Committee. SEG standards for specifying marine seismic energy sources, *Geophysics*, 53, 566 - 575.
- NMFS (2003), Small takes of marine mammals incidental to specified activities; marine seismic testing in the northern Gulf of Mexico, *Federal Register*, 68, 17773- 17783.
- Noise Exposure Criteria Group (Bowles, A., Gentry, R., Ellison, W., Finneran, J., Greene, C., Kastak, D., Ketten, D., Miller, J., Nachtigall, P., Richardson, W. J., Southall, B., Thomas, J., and Tyack, P.) (2004), Noise Exposure Criteria, *Advisory Committee on Acoustic Impacts on Marine Mammals, Plenary Meeting Two, April 28-30, 2004, Arlington, Virginia*.
- Parkes, G., and Hatton, L. (1986), *The marine seismic source*, 114 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.