



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Offshore-Windparks
Messvorschrift für
Unterwasserschallmessungen

Aktuelle Vorgehensweise
mit Anmerkungen

Anwendungshinweise



Auftraggeber: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

Bearbeitet von: **MÜLLER-BBM**

Müller-BBM GmbH
Niederlassung Hamburg

Dr. Andreas Müller

Dr. Carsten Zerbs

Bramfelder Str. 110b
22305 Hamburg

Berichtsumfang: 35 Seiten insgesamt, davon
20 Seiten Textteil,
15 Seiten Anlage

Stand: Oktober 2011

Die vorliegende Messvorschrift wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben „alpha ventus“ zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH“ (StUKplus) erstellt.

Das StUKplus-Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327689A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	5
2	Definitionen und Symbole	7
2.1	Begriffe	7
2.1.1	Einzelschallereignisse	7
2.2	Pegelgrößen	7
2.3	Sonstige Messgrößen und Begleitparameter	9
3	Messgeräte	10
4	Kalibrierung	11
5	Messungen in den Projektphasen	12
5.1	Allgemeines	12
5.1.1	Messpositionen	12
5.1.2	Messgrößen und Begleitparameter	13
5.1.3	Analysen	13
5.1.4	Messwerte und Messbedingungen	14
5.2	Basisaufnahme (Voruntersuchungen vor Baubeginn)	14
5.2.1	Prüfumfang	14
5.2.2	Messorte	14
5.2.3	Auswertung und Darstellung	15
5.2.4	Beurteilung	15
5.3	Bauphase	15
5.3.1	Prüfumfang	16
5.3.2	Messorte	16
5.3.3	Auswertung und Darstellung	16
5.3.4	Bewertung	17
5.4	Betriebsphase	18
5.4.1	Prüfumfang	18
5.4.2	Messorte	18
5.4.3	Auswertung und Darstellung	18
5.4.4	Ergebnisdarstellung	19
5.5	Rückbauphase	19
6	Datenspeicherung	20



7	Berichtserstellung	20
7.1	Formale Angaben in Berichten	20
7.1.1	Titelseite	20
7.1.2	Gleichbleibende Angaben auf den nachfolgenden Seiten	20
7.1.3	Unterschriften	21
7.2	Inhalte von Berichten	21
7.2.1	Inhaltliche Aufteilung	21
7.2.2	Anforderung zur Beschreibung der Messungen	21
7.2.3	Anforderung zur Darstellung der Ergebnisse	22
8	Dokumente und normative Referenzen	23
9	Mitwirkung	24
10	Fortschreibung	24
Anlage: Glossar		



1 Vorbemerkung

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist nach SeeAnIV zuständig für die Genehmigung von Offshore-Windparks in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). Im Rahmen von Genehmigungsverfahren für Offshore-Windenergieanlagen ist zu prüfen, inwiefern Schalleinwirkungen durch Bau, Betrieb und Rückbau der Anlagen eine mögliche Gefährdung für die Meeresumwelt darstellen.

Nach dem Umweltverträglichkeitsgesetz (UVPG) besteht für Offshore-Windparks die Pflicht, eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen. Im Rahmen der Beantragung wird hierzu vom Antragsteller eine Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) erarbeitet, in der u. a. die möglichen Auswirkungen des Schalleintrags auf die Meeresumwelt beschrieben und bewertet werden.

Die Nebenbestimmung 14 der Genehmigungen des BSH, sieht regelmäßig Maßnahmen zur Erfassung und Minimierung des Unterwasserschalls vor. So sind Messungen des Unterwasserschalls während der schallintensiven Arbeiten in vorgegebenen Entfernungen durchzuführen und zu dokumentieren. Schadensschützende und schallminimierende Maßnahmen sind während der Durchführung auf ihre Effizienz hin durch Messungen zu überprüfen. Die Messungen sind zu dokumentieren und die Ergebnisse der Genehmigungsbehörde zu berichten.

Derzeit fehlen jedoch weltweit validierte Erfahrungswerte hinsichtlich des Unterwasserschalleintrags aus der Errichtung und dem Betrieb von Offshore-Windparks. Dies hängt nicht zuletzt mit dem Fehlen von standardisierten Messverfahren und validierten Ausbreitungsmodellen zusammen.

Der zeitliche und räumliche Umfang der Schalluntersuchungen wird in dem Standard zur Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windparks auf die Meeresumwelt (StUK, 2007, [1]) beschrieben. Hierzu sind im Vorfeld der Bauphase, während der Bauphase und in der Betriebsphase Unterwasserschallmessungen durchzuführen. Die ersten Erkenntnisse aus den Schalluntersuchungen im Testfeld „alpha ventus“ (itap 2011, [20]) und aus Schallmessungen an Offshore Forschungsplattformen sowie Messmasten lieferten die Grundlage, das bisherige Messverfahren nach StUK zu überarbeiten und in einer detaillierten Messvorschrift zusammenzufassen. Die Messvorschrift ist Bestandteil des StUK und wird als Anlage geführt.

Die nachstehende Vorschrift beschreibt die generelle Vorgehensweise für Messungen des Unterwasserschalls in Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Offshore-Windparks. Die hier beschriebenen messtechnischen Untersuchungen decken alle vier Phasen der Genehmigungs- und Vollzugsverfahren von Offshore-Windparks in der deutschen AWZ ab:

- a) Basisaufnahme – Voruntersuchungen,
- b) Bauphase,
- c) Betriebsphase,
- d) Rückbauphase.



Begründete projektspezifische oder standortbedingte Abweichungen zur nachstehend beschriebenen Vorgehensweise können mit der Genehmigungsbehörde abgestimmt werden. Die messenden Institutionen müssen zur Durchführung von Schall- und Schwingungsmessungen über eine entsprechende Qualifikation verfügen. Diese kann über eine Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 oder eine vergleichbare Qualifikation nachgewiesen werden. Von den Institutionen ist ein entsprechender Eignungsnachweis zu erbringen.



2 Definitionen und Symbole

2.1 Begriffe

Die in dieser Messvorschrift verwendeten physikalischen Größen sind in Tabelle 1 zusammen mit ihrem Formelzeichen und der SI-Einheit aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Größen und Symbole

Größe	Formelzeichen	SI-Einheit	Bemerkung
Schalldruck	p	Pa	
Schallgeschwindigkeit	c	m/s	
Schallleistung	P	W	
Schallintensität	I	W/m ²	
Schalldruckpegel	L_p		wird in dB angegeben
Schallleistungspegel	L_P, L_W		wird in dB angegeben

Eine umfangreiche Übersicht weiterer Pegelgrößen einschließlich ihrer Definition wird in Abschnitt 2.2 beschrieben.

2.1.1 Einzelschallereignisse

Ein Schallereignis ist ein physikalischer Vorgang, der durch akustische Parameter (Schallfeldgrößen) bestimmt ist. Der Begriff weist auf die physikalische Seite der Schallentstehung hin. Die Schallwahrnehmung wird üblicherweise mit dem Begriff Hörereignis gekennzeichnet.

In der Bauphase von Offshore-Windparks sind die Einzelschallereignisse, insbesondere beim Einsatz von Schlagrammen von Interesse.

2.2 Pegelgrößen

Für diese Messvorschrift gelten die nachstehend definierten Pegelgrößen:

- äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} für kontinuierliche Schallsignale
- Einzelereignispegel L_E für impulshaltige Schallsignale
- Spitzenpegel L_{peak} für impulshaltige Schallsignale

Die verwendeten Pegelgrößen lehnen sich an die Definitionen der ISO 1996-1(2003) an, sind aber nicht identisch mit diesen. So wird die Definition des L_{eq} ohne Frequenzbewertung vorgenommen. Nach ISO 1996-1 soll die Bestimmung des Spitzenpegels (peak sound pressure level) mit einem Detektor gemäß IEC 61 672 erfolgen, die Definition in dieser Messvorschrift basiert auf der Signalamplitude.



Die Anwendung dieser Pegelgrößen wurde in einer Studie von Elmer, Betke, Neumann (2007), [19] untersucht.

Derzeit sind für die Bewertung keine Frequenz- und Zeitbewertungen für stationäre und impulshaltige Signale vorgegeben.

Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} (oder Mittelungspegel) ist definiert durch

$$L_{\text{eq}} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0^2},$$

wobei $p(t)$ den Schalldruck, p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa und T die Mittelungszeit darstellt¹.

Einzelereignispegel (auch: sound exposure level, SEL)

Zur Charakterisierung von impulshaltigen Geräuschen wird der Einzelereignispegel L_E ² verwendet:

$$L_E = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0}$$

mit der Schallexposition E

$$E = \int_0^T p(t)^2 dt$$

und der Bezugsgröße

$$E_0 = p_0^2 \cdot T_0$$

wobei p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa , T_0 die Bezugszeitdauer 1s und T die Mittelungszeit darstellt. Bei der Bewertung von Einzelereignissen entspricht die Mittelungszeit der Dauer T_E des Ereignisses.

Spitzenpegel L_{peak}

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen ohne Zeit-, Frequenzbewertung oder Mittelwertbildung

$$L_{\text{peak}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{\text{peak}}}{p_0},$$

wobei p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa darstellt und p_{peak} den maximal festgestellten positiven oder negativen Schalldruck p_{peak}

¹ Laut ISO 1996-1 wird der äquivalente Dauerschallpegel auch mit dem Index T gekennzeichnet $L_{\text{eq}T}$

² Es ist auch gebräuchlich, den Einzelereignispegel L_E als SEL(sound exposure level) zu bezeichnen.



$$p_{\text{peak}} = \max(|p(t)|).$$

2.3 Sonstige Messgrößen und Begleitparameter

Der Seegang ist in der Seegangsskala nach Petersen anzugeben.

Windstärkeangaben beziehen sich auf die Beaufortskala. Angaben der Windgeschwindigkeit in m/s oder kn sind ebenfalls zulässig.



3 Messgeräte

Die Hydrofon-Messkette für die hydroakustischen Messungen besteht aus folgenden Komponenten:

- Hydrofon (mit Vorverstärker) mit einer Abweichung der Empfindlichkeit von < 2 dB bis zu einer Frequenz von 40 kHz, omnidirektionale Richtcharakteristik
- Analoges Hochpassfilter (der in den Messverstärker integriert sein kann) zur Begrenzung der tieffrequenten Dynamik der Messdaten
- Messfrontend bestehend aus Tiefpassfiltern (Anti-Aliasing Filter), Verstärkern, A/D-Wandler und der Möglichkeit der Zeitrohdatenspeicherung
- Kabel, Verbindungsglieder etc.

Für das Postprocessing (Datennachbearbeitung) wird eine Analysesoftware benötigt, die folgende Methoden umfasst:

- Terzanalyse
- Schmalbandanalyse
- Zeitbewertung, Mittelung.

Die Software sollte nach Möglichkeit auch Frequenzbewertungen erlauben.

Das Postprocessing kann auch Bestandteil des Messfrontends sein.

Sollten Frequenzbewertungen in die Messvorschrift eingefügt werden, so können diese sowohl im Verstärker bzw. Messfrontend als auch digital in der Auswertesoftware implementiert werden. Dies gilt ebenfalls für die gesamte Nachauswertung wie Bandpassfilter (z. B. Terzfilter).

Folgende Prüfmittel, Geräte und Aufzeichnungsmöglichkeiten sind weiterhin erforderlich:

- Pistonfon für die Kalibrierung der Hydrofon-Messkette vor und nach jeder Messung.
- Entfernungsmesser (Laser, GPS).
- CTD-Sensoren, um die zur Bestimmung eines Schallgeschwindigkeitsprofils benötigten Daten zu erfassen.
- AIS-Daten (insbesondere für die Beurteilung des Hintergrundschalls vor Baubeginn sowie der Betriebsgeräusche).



4 Kalibrierung

Die messende Institution hat sicherzustellen, dass die Geräte der akustischen Messkette gemäß Herstellerangaben kalibriert sind. Das Kalibrierintervall beträgt maximal 24 Monate.

Die hierfür notwendigen Unterlagen in Form von Kalibrierscheinen sind dauerhaft verfügbar zu halten.



5 Messungen in den Projektphasen

Die Messungen decken alle Projektphasen ab:

- Basisaufnahme vor Baubeginn,
- Bauphase,
- Betriebsphase,
- Rückbauphase.

Für jedes Vorhabensgebiet müssen vor Baubeginn Hintergrundgeräuschmessungen durchgeführt werden.

In der Bauphase sind Überwachungsmessungen während geräuschintensiver Aktivitäten (z. B. Pfahleinbringung durch Vibration oder Rammungen) durchzuführen.

Zusätzlich sind alle durchgeführten Maßnahmen, die dem Schutz der belebten Meeresumwelt dienen (z. B. Vergrämung, Soft-Start, Vibration, etwaige Schallminderung) durch Schallmessungen zu dokumentieren.

Nach Abschluss sämtlicher Bauarbeiten sind nach Inbetriebnahme der Anlagen in der Umgebung des Windparks Kontrollmessungen in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde durchzuführen.

5.1 Allgemeines

Die Ausbringung von stationären Messgeräten ist nach § 2 der Seeanlagenverordnung vom 23. Januar 1997 (BGBl. I. S. 57), die zuletzt durch Artikel 26 der Verordnung vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542) geändert worden ist, genehmigungspflichtig. Die Genehmigungspflicht besteht für die Basisaufnahme sowie für die Bau- und Betriebsphase außerhalb der Sicherheitszone und der Betonung der Baustelle. Die Ausbringung von stationären Geräten innerhalb der Sicherheitszone ist mit dem Windparkbetreiber abzustimmen und der Genehmigungsbehörde anzuzeigen.

5.1.1 Messpositionen

- Die Hydrofone sind 2 bis 3 m über dem Meeresboden mit Hilfe von abgesetzten Systemen zu positionieren. Während der Messungen in den verschiedenen Projektphasen ist sicherzustellen, dass die gewählte Hydrofontiefe beibehalten wird.
- Bei der Aufstellung der Hydrofone ist sicherzustellen, dass störende Körperschallübertragung weitestgehend vermieden wird.
- Alternative Messaufbauten sind projekt- und standortspezifisch mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen, z. B. Installation der Hydrofone auf halber Wassertiefe oder Verwendung mehrerer Hydrofone über die Tiefe.

Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen von Messergebnissen, z. B. aufgrund von starker Schichtung des Wassers und daraus resultierenden, unterschiedlichen Schallgeschwindigkeitsprofilen, können alternative Ausbringungskonzepte notwendig sein.



5.1.2 Messgrößen und Begleitparameter

Akustische Messgrößen:

- Linearer (unbewerteter) Schalldruck (Zeitrohdaten).

Die Messung und Aufzeichnung des Schalldrucks hat mindestens in einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 kHz zu erfolgen.

Dokumentation und Begleitparameter:

- GPS-Koordinaten.
- Bodenbeschaffenheit.
- Wassertiefe.
- Bei Bauarbeiten: Rammprotokoll mit Rammschlaganzahl, Schlagfrequenz, Pfahldurchmesser, Pfahleindringtiefe und Rammenergie, Vergrämungsprotokoll, Schallminderungsprotokoll.
- Bei Betriebsmessungen: Leistungsdaten, Drehzahl, Anzahl und Entfernung der Anlagen in Abstimmung mit dem Betreiber.

Die Begleitparameter sind projekt- und standortspezifisch mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Die folgenden Begleitparameter können in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde auch von in der Nähe befindlichen Messstationen übernommen werden:

- Windgeschwindigkeit und Windrichtung (s. a. Abschnitt 5.2.1)
- Wassertiefe
- Seegang
- Schallgeschwindigkeitsprofil
- Strömungsgeschwindigkeit und -richtung

Alle Faktoren, welche die Schallmessungen beeinflussen können, sind zu dokumentieren und gegebenenfalls in den Messberichten zu bewerten. Dazu gehören beispielsweise:

- Schiffsverkehr
- Niederschlagsgeräusche (insbesondere Regen)
- Gewitter
- Fische (Fischschulen, insbesondere bei akustisch aktiver Schwimmblase)
- Akustisch aktive Säugetiere
- Sonstige Schallquellen

5.1.3 Analysen

Folgende Analysen des gemessenen Schalldruckverlaufs sind erforderlich

- Linearer (unbewerteter) Schalldruckpegel



- Frequenzanalyse in Terzbändern von 10 Hz bis 20 kHz. Eine Reduzierung des auszuwertenden Frequenzbereichs ist ggf. nach Absprache möglich.
- Schmalband-Frequenzanalyse, Bandbreite (Frequenzauflösung) $\Delta f \leq 2$ Hz

5.1.4 Messwerte und Messbedingungen

- Die Funktion der Hydrofon-Messkette ist vor und nach den Messungen mit einem geeigneten Pistonfon zu überprüfen. Über die Prüfung ist ein entsprechendes Protokoll anzufertigen.
- Die Messgrößen sind für die in den jeweiligen Abschnitten 5.2.1, 5.3.1 und 5.4.1 angegebenen Prüfumfänge und an den in den jeweiligen Abschnitten 5.2.2, 5.3.2, 5.4.2 angegebenen Messorten zu ermitteln.
- Soweit parallel zur Messung lärmintensive Arbeiten oder Ereignisse stattfinden (beispielsweise Arbeiten an anderem Windpark), die nicht durch das aktuelle Vorhaben verursacht werden, sind die hierdurch verursachten Störgeräusche zu erfassen und zu dokumentieren.
- Störgeräusche wie z. B. Kettenklirren (Ankerketten), Kettengeräusche von Seezeichen und Bojen sind in unmittelbarer Entfernung der Messeinrichtung zu vermeiden. Es ist auszuschließen, dass die Messungen durch Störgeräusche (Stampfgeräusche im Seegang, Schiffsaggregate, Bewegung der Besatzung etc.) verfälscht werden.

5.2 Basisaufnahme (Voruntersuchungen vor Baubeginn)

5.2.1 Prüfumfang

Es sind Messungen für drei Windklassen (auf der Beaufortskala) durchzuführen, die der Seegangsstärke 1 (ohne Niederschlag) sowie den Leistungsbereichen der Windenergieanlagen Mittel- und Nennleistung entsprechen und dabei eine ausreichende statistische Absicherung der Ergebnisse zulassen. Pro Windklasse sind mindestens drei Stunden auswertbare Messzeit erforderlich. Jahreszeitlich und tageszeitlich bedingte Besonderheiten sind zu dokumentieren.

Der Beginn und die Dauer der Voruntersuchungen werden vor Baubeginn in Absprache mit der Genehmigungsbehörde festgelegt.

5.2.2 Messorte

- Die hydroakustischen Hintergrundbelastungen sind an mindestens drei Hydrofonpositionen zeitgleich zu erfassen, wobei mindestens eine Messstation im Vorhabensgebiet liegt. Eine weitere Messstation ist im nächstgelegenen Naturschutzgebiet zu positionieren. Die dritte Messstation ist in 5.000 m Entfernung zu positionieren.
- Die genauen Messorte sind projekt- und standortspezifisch zwölf Wochen vorab mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.



- Die Genehmigungs- oder Anzeigepflicht der Ausbringung von Messgeräten ist zu überprüfen. Bei Feststellung der Genehmigungspflicht ist ein entsprechender Antrag mindestens acht Wochen vor dem geplanten Ausbringungstermin dem BSH einzureichen.

5.2.3 Auswertung und Darstellung

Zur Auswertung der Messungen werden die Mittelungspegel $L_{eq,5s}$ (in dB re 1 μ Pa) mit 5 Sekunden Mittelungszeit frequenz aufgelöst in 1/3 Oktavbändern gebildet. Die Dokumentation soll für jede Windklasse folgende Angaben (Kenngrößen) enthalten:

- a) L_{eq} = energetischer Mittelwert über die gesamte Messdauer der jeweiligen Windklasse.
- b) $L_{90,5s}$ = 5-Sekunden Perzentilpegel, der bei 90 % der Messungen über die gesamte Messdauer der jeweiligen Windklasse überschritten wird (90 %-Überschreitungspegel).
- c) $L_{50,5s}$ = 5-Sekunden Perzentilpegel, der bei 50 % der Messungen über die gesamte Messdauer der jeweiligen Windklasse überschritten wird (50 %-Überschreitungspegel).
- d) $L_{5,5s}$ = 5-Sekunden Perzentilpegel, der bei 5 % der Messungen über die gesamte Messdauer der jeweiligen Windklasse überschritten wird (5 %-Überschreitungspegel).

Es sind Pegelzeitschriebe des breitbandigen $L_{eq,5s}$ für die gesamte Messdauer darzustellen und die jeweiligen Windklassen im Diagramm zu kennzeichnen.

Für jede Windklasse sind die Parameter a) bis d) spektral in Terzbändern darzustellen.

Die beschreibenden Kennwerte a) sind gemäß DIN 45 641 zu bilden, die Kennwerte b) bis d) analog zur in VDI 3723, Blatt 1 beschriebenen Vorgehensweise.

5.2.4 Beurteilung

Die Beurteilung der Hintergrundschallmessungen erfolgt nicht separat. Die Ergebnisse werden für die Beurteilung der Messergebnisse aus Bau- und Betriebsphase sowie für die Prognosen verwendet. Hier sind insbesondere kumulative Effekte (weitere zeitgleich stattfindende Baumaßnahmen, Schiffsverkehr, sonstige Aktivitäten mit Schalleintrag) zu berücksichtigen.

5.3 Bauphase

Für die Überwachungsmessung in der Bauphase, insbesondere in der näheren Umgebung der Baustelle, ist frühzeitig Kontakt mit der Bauleitung aufzunehmen, um u. a. Arbeitssicherheitsaspekte zu klären.



5.3.1 Prüfumfang

- Während der geräuschintensiven Bauarbeiten sind Unterwasserschallmessungen in der Umgebung der Baustelle durchzuführen. Die Überwachung des Schalleintrags ist Auflage der Genehmigung des BSH (Nebenbestimmung 14) und fester Bestandteil des StUK. Für jeden Fundamenttyp und jede Errichtungsmethode, die in einem Windpark zum Einsatz kommen, ist mindestens einmal eine vollständige Erfassung der Schallimmission der Gründungsarbeiten einer Anlage durchzuführen. Messungen sind grundsätzlich während der Errichtung des ersten Anlagenfundaments durchzuführen.
- Wenn die Bauarbeiten nicht homogen ablaufen, z. B. an den einzelnen Anlagenstandorten stark unterschiedliche Bodenverhältnisse vorliegen oder eine veränderte Errichtungsmethode zum Einsatz kommt, sind weitere Messungen durchzuführen.
- Alle Maßnahmen, die im Rahmen der Erfüllung von Nebenbestimmungen der Genehmigung durchgeführt werden und die dem Schutz der belebten Meeresumwelt dienen (z. B. Vergrämung, Softstart, Vibration) sind durch Schallmessungen zu dokumentieren. Die Effizienz von schallmindernden Maßnahmen (z.B. Kofferdamm, Schalldämpfer, Blasenschleier) ist durch Schallmessungen zu überprüfen. Hierzu sind Messungen mit und ohne Minderungsmaßnahme durchzuführen. Die Effizienzkontrollen der Vergrämung und der Schallminderung sind Auflage der Genehmigung und werden von der Genehmigungsbehörde angeordnet.

5.3.2 Messorte

- Die Messorte sind grundsätzlich in 750 m und 5 000 m Entfernung von der Gründungsstruktur sowie im nächstgelegenen Naturschutzgebiet festzulegen, sofern dieses weiter als 5 km vom Vorhabensgebiet entfernt ist.
- Die genauen Positionen sind projekt- und standortbezogen mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

5.3.3 Auswertung und Darstellung

Es sollen typische Sequenzen des Schalldruckverlaufs durch den äquivalenten Dauerschalldruckpegel L_{eq} zu Beginn, in der Mitte und am Ende der jeweiligen Baumaßnahme und bei impulsartigen Einbringmethoden (Rammen) der Einzelereignis-Schalldruckpegel L_E und der Spitzenschalldruckpegel L_{peak} dargestellt werden.

Es ist gestattet, bei impulshaltigen Geräuschen den Einzelereignis-Schalldruckpegel L_E durch

$$L_E \approx L_{eqT} - 10 \log \frac{nT_0}{T}$$

zu bestimmen, wobei n die Anzahl der Impulse pro Zeitspanne T angibt. Diese Auswertung gilt nur dann näherungsweise, wenn das Umgebungsgeräusch deutlich geringer als das Impulsgeräusch ist und die Impulse gleichartigen Charakter haben. Bei



Messungen in weiter Entfernung bleibt dieses Verfahren zu überprüfen. Die Zeitspanne T beträgt 30 s.

Der $L_{\text{eq}30\text{s}}$ setzt sich aus dem Umgebungsgeräusch $L_{\text{eq,bgn}}$ (äquivalenter Dauerschallpegel des Umgebungsgeräusches, „background“) und dem Nutzsignal $L_{\text{eq,impulse}}$ (äquivalenter Dauerschallpegel bei Bauarbeiten) zusammen. Zur Bestimmung des Einzelereignispegels muss die Forderung $L_{\text{eq,impulse}} - L_{\text{eq,bgn}} > 10$ dB erfüllt sein.

Zur Darstellung der Ergebnisse sind Pegelzeitschriebe der Pegelgrößen $L_{\text{eq}30\text{s}}$, L_E und L_{peak} über die gesamte Messzeit in einem Diagramm darzustellen.

Es ist der unbewertete Schalldruck $p(t)$ über die gesamte Messzeit darzustellen.

Es sind die Breitbandpegel (L_{eq} , L_E , L_{peak}) gemäß nachstehender Statistik zu bestimmen.

- $L_{90,30\text{s}}$ = 30 Sekunden Perzentilpegel, der bei 90 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.
- $L_{50,30\text{s}}$ = 30 Sekunden Perzentilpegel, der bei 50 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.
- $L_{5,30\text{s}}$ = 30 Sekunden Perzentilpegel, der bei 5 % der Messungen über die gesamte Messdauer überschritten wird.

Wird die Berechnung der Breitbandpegel L_E und L_{peak} für Einzelereignisse (Rammschläge) durchgeführt, so ist die Berechnung der Perzentilpegel auch für die Gesamtheit der Einzelereignispegel während der Rammung zulässig.

Die Auswertung soll für Rammarbeiten mit und ohne Schallminderungsmaßnahmen durchgeführt werden. Im Fall der Schallminderung durch offene Blaseschleier ist zusätzlich anhand der Messungen der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung auf die Wirkung des Blaseschleiers zu prüfen und darzustellen.

Für typische Sequenzen ist der äquivalente Dauerschallpegel und Einzelereignispegel spektral in 1/3-Oktavbändern in Abhängigkeit z. B. von der Rammenergie darzustellen.

5.3.4 Bewertung

Die Genehmigungen des BSH für Offshore-Windparks haben seit 2003 Richtwerte bzw. seit 2008 Grenzwerte hinsichtlich des Schalleintrags durch Rammarbeiten eingeführt.

Die gültigen Grenzwerte finden sich beispielsweise in der „Genehmigung Offshore-Windpark ‚Borkum West II‘“, Nebenbestimmung 14, Seite 15:

„Bei der Gründung und Installation der Anlagen ist diejenige Arbeitsmethode nach dem Stand der Technik zu verwenden, die nach den vorgefundenen Umständen so geräuscharm wie möglich ist. Dabei ist durch ein geeignetes Schallschutzkonzept sicherzustellen, dass die Schallemission (Schalldruck SEL) in einer Entfernung von 750 m den Wert von 160 dB (re 1 μ Pa) nicht überschreitet.“

Sollte es nicht möglich sein, den dort genannten Messabstand (750 m) einzuhalten, sind die Bewertungspegel zu korrigieren. Der maximale Messabstand R beträgt



1100 m. Geringere Messabstände als 750 m sind nicht zulässig. Die Korrektur wird mit der Korrekturformel

$$L = L_{750\text{m}} - X \cdot \log_{10}(R / 750 \text{ m})$$

mit $X = 15$ bestimmt.

Die Perzentilpegel $L_{5,30s}$ sind der Bewertungsgrundlage gegenüberzustellen. Die Anzahl und Höhe der Überschreitungen ist in geeigneter Weise zu dokumentieren.

Überschreitungen der Bewertungspegel sind nicht zulässig.

5.4 Betriebsphase

Spätestens zwölf Monate nach Inbetriebnahme des Windparks werden in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde Unterwasserschallmessungen der Geräuschimmissionen durchgeführt.

5.4.1 Prüfumfang

- Die drei Leistungsbereiche „niedrig“, „mittel“ und „Nennleistung“ sind zu erfassen. Pro Leistungsbereich sind jeweils mindestens drei Stunden auswertbare Messzeit erforderlich. Die saisonal veränderten Umgebungsparameter sind dabei zu berücksichtigen.
- Messungen bei abgeschalteter Windenergieanlage bzw. Windstille.
- Die genaue Festlegung der Leistungsbereiche erfolgt in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde.
- Der genaue Prüfumfang und die Auswahl der zu messenden Anlagen ist projekt- und anlagenspezifisch mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

5.4.2 Messorte

- Die Daten sind stichprobenartig an einzelnen WEA im Bereich des Windparks zu erheben, wobei die Schallmessungen in einer Entfernung von ca. 100 m zur Anlage sowie in der Mitte des Windparks vorzunehmen sind.
- Zusätzlich sind Messungen außerhalb des Windparks in 1.000 m Entfernung und im nächstgelegenen Naturschutzgebiet durchzuführen, soweit dieses nicht weiter als 5 km vom Vorhabensgebiet entfernt ist.
- Sind keine Naturschutzgebiete in der Nähe, ist ersatzweise eine Schallmessung in einer Entfernung von 5 km vom Windpark durchzuführen.
- Die genauen Messorte sind projekt- und anlagenspezifisch mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

5.4.3 Auswertung und Darstellung

Die Auswertung der Messungen soll frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern und schmalbandig mit einer Auflösung < 2 Hz erfolgen.



Es ist der L_{eq5s} (in dB re 1 μ Pa) mit 5 s Mittlungszeit frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern zu bestimmen. Es sind die

- $L_{5,5s}$ = 5 Sekunden Perzentilpegel, der bei 5 % der Messungen über der Messdauer bei der jeweiligen Windklasse überschritten wird.

zu bestimmen und den Ergebnissen aus den Vorbelastungsuntersuchungen der jeweiligen Windklasse entgegenzustellen.

Repräsentative äquivalente Dauerschallpegel L_{eq5s} sind frequenz aufgelöst in 1/3-Oktavbändern und schmalbandig für jede Windklasse darzustellen.

5.4.4 Ergebnisdarstellung

Die Messergebnisse sind dem Hintergrundschallpegel gegenüberzustellen.

5.5 Rückbauphase

Zu dieser Projektphase liegen noch keine Erfahrungen zum Verlauf und den schall-erzeugenden Aktivitäten vor.

Das Messkonzept wird sich nach der Schallprognose bzw. dem Schallschutzkonzept zur Vermeidung und Verminderung von Schalleinträgen im Wasser während der Rückbauarbeiten richten, die zwölf Monate vor dem geplanten Rückbau der Genehmigungsbehörde vorgelegt werden. Die Genehmigungsbehörde wird das Messkonzept auf der Grundlage des erreichten Kenntnisstandes festlegen.



6 Datenspeicherung

Alle Messdaten (Zeitrohdaten) sowie die aufbereiteten und ausgewerteten Daten sind für weitere Auswertungen für einen Zeitraum von zehn Jahren verfügbar zu halten und bei Anforderung der Genehmigungsbehörde zu übergeben. Das Datenformat ist mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Die Datenübermittlung an die Genehmigungsbehörde ist in Windows PCM WAV mit 24-bit Auflösung einschließlich der Begleitparameter vorzunehmen.

7 Berichtserstellung

7.1 Formale Angaben in Berichten

7.1.1 Titelseite

Die Titelseite soll mindestens folgende Angaben enthalten:

- Titel (mit Nennung des Projektes),
- Berichtsnummer,
- Name der Firma,
- Datum des Berichtes, ggf. mit Revisionsstatus,
- Name und Anschrift des Auftraggebers,
- Datum der Messungen,
- Ort der Messungen,
- Namen der Mitarbeiter,
- Angabe der Gesamtseitenzahl des Berichtes, einschließlich Anhang,
- Wenn im Anhang eine eigene Nummerierung der Seiten durchgeführt wird, soll zusätzlich auch die Anzahl der Seiten des Anhangs auf dem Titelblatt angegeben werden.

7.1.2 Gleichbleibende Angaben auf den nachfolgenden Seiten

Alle nachfolgenden Seiten müssen folgende Angaben enthalten:

- Name der Firma,
- Berichtsnummer,
- Datum,
- Seitennummerierung.

Die Angabe der Gesamtseitenzahl auf den Folgeseiten ist nicht erforderlich.



7.1.3 Unterschriften

Der Bericht wird in der Regel vom Verfasser unterschrieben.

7.2 Inhalte von Berichten

7.2.1 Inhaltliche Aufteilung

Der Bericht sollte nachfolgende Gliederung beinhalten:

- Angaben zur Durchführung der Untersuchungen,
- Angaben zu den Ergebnissen,
- Beurteilungen.

7.2.2 Anforderung zur Beschreibung der Messungen

Wenn Prüfungen nach festgelegten Verfahren vorgenommen wurden, müssen im Text *mindestens* die folgenden Angaben enthalten sein:

- Bezeichnung und Beschreibung des Messaufbaus.
- Beschreibung des Messobjektes wie Fundamenttypen, Rammverfahren und Rammzeiten.
- Bezeichnung der Prüfspezifikation oder Beschreibung des verwendeten Prüfverfahrens.
- Wenn „in Anlehnung“ an eine Norm geprüft wird, ist zu beschreiben, wo das Prüfverfahren von der Norm abweicht.
- Informationen, die für die Prüfung bzw. Wiederholbarkeit der Prüfung von Bedeutung sind.
- Angaben zu den durchgeführten Messungen und Untersuchung sowie über die daraus abgeleiteten Ergebnisse. Diese Angaben werden in der Regel ergänzt durch Tabellen, Grafiken, Skizzen und Fotos. Dabei ist insbesondere zu dokumentieren, inwieweit das Schallgeschwindigkeitsprofil Auswirkungen auf die Messergebnisse haben kann.
- Angaben über die verwendeten Prüfmittel (Bezeichnung, Hersteller, Typ, Seriennummer) und die eingesetzte Software (Bezeichnung, Hersteller, Typ, Revision/Änderungsstatus).
- Um die Auswirkungen von nachträglich als fehlerhaft erkannten Prüfmitteln auf Prüfergebnisse zurückverfolgen zu können, muss die Seriennummer von Messgeräten bzw. die Revision von Berechnungsprogrammen angegeben werden.
- Die Verwendung geeichter Messgeräte ist zu vermerken, ebenso der Vermerk über die Überprüfung der Funktion der Hydrofonmesskette vor und nach jeder Messung.
- Angaben zur Messunsicherheit.



7.2.3 Anforderung zur Darstellung der Ergebnisse

Auf den Diagrammen sind nachfolgende Informationen zu benennen:

- Messobjekt, Messposition
- Bezugsgrößen
- Analyseinformationen, Terz/Schmalband mit Angabe der Bandbreite, ggf. Information zu Bandbreitenumrechnung etc.
- Mittelungszeitraum
- Seegangsverhältnisse, Strömungseigenschaften, Windgeschwindigkeit
- Bei Messungen während der Bauphase: Zeit und Dauer der Rammung sowie Rammenergie aus dem Rammprotokoll, Zeit und Dauer des Soft-Starts, Zeit und Dauer der Vergrämungsmaßnahmen sowie Art der Vergrämung aus dem Vergrämungsprotokoll, Zeit, Dauer und Art der Schallminderungsmaßnahmen
- Bei Messungen während der Betriebsphase zusätzlich in Absprache mit dem Betreiber: Drehzahlstufe, Leistung
- Bezugsgrößen (Pegeldarstellung)
- Bei Frequenzdarstellungen ist ein standardisiertes Format zu verwenden:
10 dB = 20 mm; 1 Oktave = 15 mm



8 Dokumente und normative Referenzen

- [1] BSH, Standard „Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 3), Stand Februar 2007.
- [2] DIN 1304-1:1994-03, Formelzeichen – allgemeine Formelzeichen.
- [3] DIN EN ISO/IEC 17025 – Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien.
- [4] DIN EN ISO 14001:2009-11 – Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung.
- [5] ISO 80000-8: Quantities and units. Part 8: Acoustics.
- [6] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedure.
- [7] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels.
- [8] ISO 18431-2: Mechanical vibration and shock – Signal processing. Part 2: Time domain windows for Fourier Transform analysis.
- [9] IEC 60050-801: International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics.
- [10] IEC 60565: Underwater acoustics – Hydrophones. Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz.
- [11] IEC 61672-1: Electroacoustics – Sound level meters. Part 1: Specifications.
- [12] DIN 45 641: Mittelung von Schallpegeln. Juni 1990.
- [13] VDI 3723, Blatt 1: Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschmissionen. 1993.
- [14] DIN 13320: Spektren und Übertragungskurve, Begriffe, Darstellung.
- [15] IEC 60263: Scales and sizes for plotting frequency characteristics and polar diagrams.
- [16] ISO/WD 16554: „Measurement and reporting of underwater sound radiated from merchant ships“.
- [17] EG-MSRL 2008/56/EG – Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie.
- [18] IEC 61400-11: Wind turbine generator systems –Part 11:Acoustic noise measurement techniques.
- [19] Elmer, Betke, Neumann (2007): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmissionen von Offshore-Windenergieanlagen, Mitteilungen des Instituts für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover 08/2007
- [20] Betke, Matuschek (2011): Messungen von Unterwasserschall beim Bau der Windenergieanlagen im Offshore-Testfeld „alpha ventus“. itap, 2011.



9 Mitwirkung

Bei der Erstellung dieser Messvorschrift haben mitgewirkt:

- Herr M. Ainslie (TNO)
- Herr Dr. Betke (ITAP)
- Herr Benesch (FH Flensburg)
- Frau Blasche (BSH)
- Herr Brensing (WDCS)
- Frau Dr. Boethling (BSH)
- Frau Eickmeier (BSH)
- Herr Fischer (BSH)
- Herr Fricke (ISD)
- Herr Gabriel (DEWI)
- Frau Grießmann (ISD)
- Herr Herklotz (BSH)
- Herr de Jong (TNO)
- Herr Kock (GL Garrad Hassan)
- Herr Matuschek (ITAP)
- Herr Dr. Nejedl (FWG)
- Herr Dr. Nissen (FWG)
- Herr van Radecke (FH Flensburg)
- Herr Verfuß (PtJ)
- u. a.

10 Fortschreibung

Diese Messvorschrift ist Bestandteil des Standards zur Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK3) und wird nach Bedarf - jedoch spätestens nach zwei Jahren - auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen und den Erkenntnissen, die sich bei der Anwendung ergeben haben, abgeglichen und ggf. fortgeschrieben werden.



Anlage

Glossar



11 Glossar

Dieses Dokument beschreibt glossarartig die wichtigsten Begriffe aus dem Umfeld von Schallemissionen bzw. Offshore-Schallmessungen, bezogen auf den Bau und Betrieb von Offshore-Windparks. Es werden grundlegende Begriffe zur Akustik, zu Pegelgrößen, Unterwasserschallmessungen und Prognosen sowie zur Schallwirkung beschrieben.

11.1 Physikalische Grundbegriffe und Größen

Schallfeldgrößen

<u>Deutsch</u>	<u>Englisch</u>
<i>Schall</i>	<i>sound</i>
<i>Schallwelle</i>	<i>sound wave</i>
<i>Schallfeld</i>	<i>sound field</i>
<i>Luftschall</i>	<i>air borne sound</i>
<i>Unterwasserschall</i>	<i>water borne sound</i>
<i>Druckschwankungen</i>	<i>pressure fluctuations</i>
<i>Dichteschwankungen</i>	<i>density fluctuations</i>
<i>Fluidschall</i>	<i>fluid borne sound</i>
<i>Körperschall</i>	<i>structure borne sound</i>
<i>Schalldruck</i>	<i>sound pressure</i>
<i>Schallschnelle</i>	<i>sound particle velocity</i>
<i>Schallbeschleunigung</i>	<i>sound particle acceleration</i>
<i>Schallgeschwindigkeit</i>	<i>sound velocity</i>
<i>Schallaus Schlag</i>	<i>sound particle displacement</i>
<i>Wechseldichte</i>	<i>fluctuating density</i>
<i>Schallereignis</i>	<i>sound event</i>
<i>Hörereignis</i>	<i>auditory event</i>

Schall ist das Ereignis der Ausbreitung von *Druckschwankungen* und *Dichteschwankungen* in einem elastischen Medium. Schall ist eine mechanische Welle in einem Medium. Das Gebiet, in dem sich *Schallwellen* ausbreiten, heißt *Schallfeld*.

Zur Beschreibung des akustischen Zustands eines Feldes werden Schallfeldgrößen (und die zugehörigen Pegel) verwendet. Dazu gehören (mit typischerweise verwendetem Formelzeichen):

Schalldruck p , *Schallschnelle* v , *Schallauslenkung* ξ (auch: x , s), *Wechseldichte* ρ (beschreibt die Dichteschwankungen). Verwendete Einheiten von Schallfeldgrößen sind in Tabelle 2 im folgenden Abschnitt zusammengestellt.

Der Druck im Wasser ist die Summe aus statischem Druck und akustischem Wechseldruck (Schalldruck):

$$p_{\text{gesamt}}(t) = p_{\text{statisch}} + p(t)$$

Körperschall ist der Begriff für Schall in Festkörpern. Er wird durch die Oberflächenbewegung meist in Form der (*Schall*-) *Beschleunigung*, seltener auch der *Schnelle* oder der *Auslenkung* mit Hilfe von geeigneten Sensoren erfasst. Körper-



Schall kann durch Kopplung mit dem Fluid als Unterwasserschall von einer Struktur abgestrahlt werden.

Die *Schallgeschwindigkeit* ist die Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen in einem betrachteten Medium ausbreiten. Dagegen ist die *Schallschnelle* die Wechsellängengeschwindigkeit, mit der die Teilchen des Fluids, in dem sich die Schallwelle ausbreitet, um ihre Ruhelage schwingen (Momentangeschwindigkeit).

Die Schallfeldgrößen sind orts- und zeitabhängige Größen. Ein Schallfeld ist dann vollständig beschrieben, wenn die Größen an jedem Ort zu jeder Zeit bekannt sind. Mit Messungen werden Schallfeldgrößen lokal an einem Messort erfasst.

Messtechnisch am bedeutsamsten sind der Schalldruck für Schall in einem Fluid und die Beschleunigung für den Körperschall.

Anmerkung: Wahrnehmung und Schall

Physikalische Vorgänge, bei denen Schall entsteht, werden mit *Schallereignis* bezeichnet. Das akustisch Wahrgenommene wird beim Menschen als *Hörereignis* bezeichnet.

Schalleistungsgrößen

Deutsch

Schallenergie
Schallintensität
Schalleistung

Englisch

sound energy
sound intensity
sound power

Mit der Schallausbreitung ist auch der Transport von Energie verknüpft. Schallenergie- bzw. Schalleistungsgrößen charakterisieren dieses Phänomen:

Schallenergie, *Schallenergiedichte* (Energie pro Volumen), *Schalleistung* (Schallenergie, die pro Zeiteinheit von einer Schallquelle abgestrahlt wird), *Schallintensität* (Energie pro Zeit pro Fläche). Schalleistungsgrößen werden im Allgemeinen nicht direkt erfasst, sondern aus anderen Messgrößen (Schalldruck, Schallschnelle) berechnet.

Beispielsweise ist die Schallintensität gegeben als Multiplikation von Schalldruck und Schallschnelle,

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)},$$

wobei die Überstreichung die zeitliche Mittelwertbildung bedeutet.



In Tabelle 2 sind die Formelzeichen und Einheiten für die wichtigsten Schallfeldgrößen zusammengefasst.

Tabelle 2. Formelzeichen und Einheiten für in der Akustik verwendet Schallfeldgrößen.

Messgröße	Formelzeichen	Einheit	Bemerkung
Schalldruck	p	Pa	
Schallschnelle	v	m/s	
Beschleunigung	a	m/s ²	
Schallauslenkung	s, x, ξ	m, mm	
Schallenergie		J	kein Formelzeichen üblich
Schallenergiedichte	E	J/m ³	
Schallintensität	I	W/m ²	
Schallleistung	P	W	

Pegel

Deutsch

Pegel

Schalldruckpegel

Schallintensitätspegel

Schallleistungspegel

Englisch

level

sound pressure level

sound intensity level

sound power level

Der Logarithmus des Verhältnisses einer leistungs- oder energieproportionalen Größe zu einer festgelegten Bezugsgröße wird *Pegel* genannt. Beispiel: *Schallleistungspegel*.

Pegelgrößen, die sich aus dem Zehnerlogarithmus des Quotienten aus zwei leistungsproportionalen Größen ergeben, werden in der Pseudoeinheit Bel (Einheitenzeichen B) angegeben. Es ist praktisch ausschließlich üblich, den zehnfachen Wert in Dezibel (Einheitenzeichen dB) anzugeben

$$L_P = \log_{10} \frac{P}{P_0} \text{ B} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0} \text{ dB} .$$

Bei Pegeln ist die Bezugsgröße stets anzugeben. Beispiel:

$$L_P = 118 \text{ dB re } 10^{-12} \text{ W}$$



Da sich leistungsproportionale Größen im Allgemeinen (zumindest näherungsweise) als proportional zum Quadrat einer linearen (Schall-) Feldgröße darstellen lassen, ist auch die Pegelangabe für diese Schallfeldgrößen üblich. Beispiel: die Schallleistung ist proportional zum Quadrat des Schalldruckes, $P \sim p^2$. Gebräuchlich ist der *Schalldruckpegel*.

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (1)$$

Zur Berechnung des Schalldruckpegels wird für p in der Gleichung (1) meist der Effektivwert des Schalldruckzeitverlaufs eingesetzt:

$$p^2 = p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt .$$

Der aus p_{eff}^2 berechnete Pegel wird auch als äquivalenter Dauerschallpegel bezeichnet (siehe folgender Abschnitt)

Die feldbeschreibenden Größen Schallschnelle v , Intensität I und Leistung P können ebenfalls durch Pegel dargestellt werden.

Die wichtigsten international genormten Bezugswerte (Referenzwerte) sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 3. Bezugswerte für Pegelgrößen

Messgröße	Formelzeichen	dB-Referenzfaktor	Weitere Bezugswerte
Schalldruck	p_0	$1 \mu\text{Pa} = 10^{-6} \text{ Pa}$	$20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (in Luft)
Schallschnelle	v_0	$5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$	
Beschleunigung	a_0	$\pi \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ (Akustik)	10^{-6} m/s^2 (ISO)
Schallauslenkung	s_0, x_0, ξ_0	10^{-6} m	
Schallintensität	I_0	10^{-12} W/m^2	
Schallleistung	P_0	10^{-12} W	

Gebräuchlich sind auch Pegel, die sich auf eine beschränkte Bandbreite beziehen. Die Bandbreite kann sich aus einem Filter, der dem Messgerät vorgeschaltet ist ergeben. Sehr gebräuchlich ist die Spektralanalyse, bei der der zeitliche Verlauf des Schalldrucks für eine Bank von Filtern berechnet wird (Beispiele: Oktavfilter, Terzfilter), so dass eine Reihe von Pegelwerten für jedes Band (jeden Filter) angegeben wird.



Nach den Standards der DIN, IEC, und ISO sind die beschriebenen physikalischen Größen bei Pegelangaben durch einen Index zu kennzeichnen. Weiterhin sind Informationen über die Bewertungen und andere Zusätze (etwa Zeit- und Frequenzbewertungen) als Indizes mit der Größe, die bewertet wurde, und nicht mit der Pseudo-Maßeinheit dB zu verknüpfen. Beispiele:

- Die nicht normgerechte Schreibweise dB(A) ist noch in Lehrbüchern oder Gesetzestexten anzutreffen.
- Eine korrekte Schreibweise wäre beispielsweise
 - $L_{pAS} = 75$ dB (spektral A-bewerteter und zeitlich mit der Zeitkonstanten „slow“, d. h. 1 Sekunde bewerteter Schalldruckpegel) oder
 - $L_{pME,T_0} = 110$ dB (spektral M-bewerteter und Schallereignispegel mit der Bezugszeit T_0 , s. u.)

Anmerkung: Vorteilhaft ist die Verwendung von Pegeln gegenüber der von Signalamplituden aus den folgenden Gründen:

- Die bessere Lesbarkeit durch reduzierten Wertebereich
- Übersichtlichere Darstellung, insbesondere bei spektraler Darstellung
- Vereinfachte Rechenweise, wenn Pegel mit Übertragungsgrößen beaufschlagt werden

Anmerkung: Abgrenzung von **Maßen**

Der Logarithmus des Verhältnisses zweier energie- oder leistungsproportionalen Größen wird *Maß* genannt (Beispiele: Schalldämmmaß, Übertragungsmaß). Im Gegensatz zum Maß ist die Bezugsgröße beim Pegel fest.

Beurteilung von Schall (Schallimmissionen)

Deutsch

Beurteilung
Einzelereignispegel
Spitzenpegel
Spitzenschalldruckpegel

Englisch

assessment
sound exposure level, SEL
peak level (zero-to-peak level)
(zero to peak) sound pressure level

Ziel der *Beurteilung* von Schallimmissionen ist es, das Ausmaß der Schallwirkung auf ein Schutzgut mit Hilfe geeigneter Verfahren zu schätzen und Aussagen zu treffen, ob angestrebte Schutzziele erreicht werden.

Zur Vorhersage der Wirkung von Lärm gibt es Mess- und Beurteilungsverfahren. Welche Verfahren im konkreten Fall verwendet werden, wird im Rahmen von Normungen oder durch den Gesetzgeber bzw. die genehmigenden Behörden vorgegeben.



Bei der Beurteilung von Schall ist zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen auf die Schutzgüter von den Eigenschaften der zu beurteilenden Schallereignisse abhängen. Grobe Einteilungen werden nach zeitlichen Eigenschaften vorgenommen, beispielsweise nach periodischen, stochastischen und transienten (kurzzeitig auftretenden) Schallen [31]. Spektrale Eigenschaften sind schmalbandige oder breitbandige Spektren, tonale oder harmonische Schallereignisse.

Zur Beurteilung von Unterwasserschallimmissionen werden zurzeit (Stand Juli 2011) folgende Beurteilungsgrößen betrachtet.

Einzelereignispegel L_E , (auch *sound exposure level SEL*):

$$L_E = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0},$$

wobei E die Schallexposition $E = \int_0^T p(t)^2 dt$ während der Messzeit T und

$E_0 = p_0^2 \cdot T_0$ die Bezugsgröße (dB-Referenzfaktor) ist (Bezugsschalldruck $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$, Bezugszeitdauer $T_0 = 1 \text{ s}$). Der Einzelereignispegel wird in Dezibel mit dem Bezugswert $1 \mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$ angegeben. Als Kürzel ist auch die Schreibweise L_{pE, T_0} üblich.

Der Einzelereignispegel eines Schallereignisses entspricht dem Pegel eines Rechteckimpulses von 1 Sekunde Dauer, der die gleiche Schallexposition enthält wie das Schallereignis.

Im Rahmen von Offshore-Schallmessungen wird der Einzelereignispegel nur zur Bewertung einzelner Schallereignisse verwendet. Im Prinzip kann er auch zur Bewertung des kumulativen Einflusses herangezogen werden.

Spitzenpegel L_{peak} :

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen (ohne Zeit-, Frequenzbewertung oder Mittelwertbildung):

$$L_{\text{peak}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{\text{peak}}}{p_0},$$

wobei p_0 der Bezugsschalldruck $1 \mu\text{Pa}$ und p_{peak} die maximale (positive oder negative Schalldruckamplitude) ist:

$$p_{\text{peak}} = \max(|p(t)|).$$

Der Spitzenpegel wird zur Bewertung transienter Geräusche verwendet.



Verwendung findet noch der **äquivalente Dauerschallpegel** L_{eq} (auch als Mittelungspegel mit den Formelzeichen L_T oder L_{eqT} bezeichnet):

$$L_{\text{eq}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0^2} \right),$$

(s. a. DIN EN 61672-1). In den L_{eq} gehen alle Schallanteile gemäß ihrer Stärke, Dauer und Häufigkeit ein.

Neben diesen Größen werden noch eine Reihe anderer Beurteilungsgrößen verwendet. Nachfolgende Auswahl ist nicht vollständig:

Der Spitze-Spitze-Pegel ($L_{\text{pk-pk}}$, $L_{\text{peak-peak}}$) ist wie der L_{peak} ein Maß für Schalldruckspitzen. Er ist definiert über die Differenz von größter und kleinster Schalldruckamplitude (also höchster und niedrigster Druckspitze, $p_{\text{max+}}$ bzw. $p_{\text{min-}}$):

$$L_{\text{pk-pk}} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{\text{max+}} - p_{\text{min-}}}{p_0} \right).$$

Der Spitze-Spitze-Pegel liegt maximal 6 dB höher als der Spitzenpegel.

Der Einzelereignispegel wird manchmal auch über die Signalenergie definiert:

$$L_{E90} = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_{90}}{E_0} \quad \text{mit} \quad E_{90} = \int_{t_5}^{t_{95}} p^2(t) dt,$$

E_0 wie oben. Die Integrationsgrenzen t_5 und t_{95} beschreiben die Zeitpunkte, bei denen 5 % bzw. 95 % der Signalenergie erreicht sind. Diese Definition ist zunächst nur für einzelne Schallereignisse geeignet.

Bewertete Pegel (siehe Abschnitt Pegel) werden verwendet, um zeitliche bzw. frequenzabhängige Eigenschaften des Gehörs unterschiedlicher Spezies nachzubilden. In der Beurteilung von Unterwasserschallimmissionen gibt es (noch) keine einheitlich eingeführten und verwendeten Zeit- oder Frequenzbewertungen.



11.2 Messtechnik, Analyseverfahren

Messung

<u>Deutsch</u>	<u>Englisch</u>
<i>Hydrofon</i>	<i>hydrophone</i>
<i>Elektroakustische (Schall-)wandler</i>	<i>electroacoustic transducers</i>
<i>Aufnehmer (Sensor)</i>	<i>sensor</i>
<i>Messsystem</i>	<i>measurement system (measuring system)</i>
<i>Messkette</i>	<i>measurement chain (measuring chain)</i>
<i>Messabweichung</i>	<i>observational error</i>

Bei der Messung von Unterwasserschall werden nahezu ausschließlich *Schalldrücke* p mit Hilfe von *Hydrofonen* erfasst. Hydrofone sind spezielle *elektroakustische Wandler*, d. h. Systeme, die zur Umwandlung von mechanischen Schwingungen in elektrische Energie geeignet sind.

Mit einem Hydrofon wird Unterwasserschall(-druck) in eine dem (lokalen) Schalldruck proportionale Spannung umgewandelt. Diese Spannungssignale können mit *Mess- und Analysesystemen* aufgezeichnet und analysiert werden (siehe Abschnitt 11.2).

Zur Aufzeichnung und Bewertung von Schalldruck muss die gesamte *Messkette* bzw. die Messeinrichtung (Gesamtheit aller Messgeräte und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses) berücksichtigt werden. Die Messkette wird durch alle Geräte auf dem Weg des Messsignals gebildet, typischerweise besteht sie aus *Sensor*, Vorverstärker, Messumformer, Analysegerät mit Anzeige, Speicherung von Daten bzw. Messwerten.

Korrekte Beschreibungen von Messungen beinhalten Aussagen über die prinzipiell immer vorhandenen Fehlergrenzen und *Messabweichungen*.

Weitere Schallfeldgrößen (*Schallschnelle*, *Schallintensität*, *Schalleistung*, siehe z. B. Abschnitt Schalleistungsgrößen) können indirekt (als rechnerische Größe, die sich aus Messungen des Schalldrucks ergeben) erfasst werden. Solche Verfahren sind für den Bereich des Unterwasserschalls nicht sehr gebräuchlich.

In seltenen Fällen werden Schwingungen des Meeresbodens mit Geophonen aufgezeichnet. Das sind elektromechanische Wandler, die eine schnelle proportionale Ausgangsspannung liefern.



Signalverarbeitung und Signalanalyse

Deutsch

periodisches Signal
stochastisches Signal
transientes Signal
Signalverarbeitung
Signalanalyse
A/D-Wandler
Spektralanalyse
Filterung
Terz
Oktave
Oktavspektrum
Fouriertransformation
Bandpassfilter
Frequenzbewertung
Zeitbewertung

Englisch

periodic signal
stochastic signal
transient signal
signal processing
signal analysis
A/D converter
spectral analysis
filtering
3rd octave band
octave
octave spectrum
Fourier transformation
band pass filter
frequency weighting
temporal weighting

Ein Signal ist eine veränderliche Größe im Zeitbereich³. Wie bei der Klassifizierung von Schall erfolgt die grobe Unterscheidung in die Signaltypen periodische, stochastische und transiente Signale.

Signalverarbeitung umfasst die Bearbeitungsschritte, die das Ziel haben, Informationen aus einem Messsignal zu extrahieren. Akustische Messsignale sind aufgezeichnete Schalldruckverläufe. Relevante Informationen sind z. B. Pegel von Schallereignissen oder die Frequenz von vorhandenen Tönen.

Die *Signalanalyse* untersucht die Eigenschaften von Signalen mit mathematischen Hilfsmitteln wie beispielsweise der *Spektralanalyse*, *Filterung*, Glättung. Die Begriffe *Signalverarbeitung* und *Signalanalyse* werden oft synonym verwendet.

Basis für moderne Analysensysteme sind meist digitale Messsignale, d. h. das Signal wurde vor der Speicherung oder Verarbeitung von einem analogen zu einem digitalen Messsignal gewandelt. Die softwaregestützten Analysensysteme enthalten dann die Möglichkeit, geeignete Analysen zu berechnen und die Ergebnisse grafisch darzustellen.

Wichtigster Baustein der Signalanalyse ist die Spektral- oder Frequenzanalyse. Jedes (Zeit-)Signal lässt sich in seine spektralen Bestandteile (Spektrum) zerlegen.

Es wird zwischen Bandpassspektren (z. B. *Terzspektren*, *Oktavspektren*) und Schmalbandspektren unterschieden.

Ein Terzfilter (der auch als 1/3-Oktavfilter bezeichnet wird) ist eine bestimmte Form eines *Bandpassfilters*. Zur Charakterisierung von Bandpassfiltern wird ihr Durchlassbereich (Frequenzbereich, in dem spektrale Anteile den Filter passieren kön-

³ Manchmal (in der Sonartechnik, der Signalentdeckungstheorie oder Informationstheorie) wird ein Signal nur dann als solches bezeichnet, wenn es nützliche Information enthält. Die Abgrenzung (veränderliche Größe ohne Information) wird dann als *Störung* oder *Störgeräusch* bezeichnet.



nen) verwendet, dieser wird meist durch Mittenfrequenz und Bandbreite beschrieben (weitere Filtereigenschaften sind beispielsweise Grenzfrequenzen, Mittenfrequenz und Güte). Wird eine Reihe von im Spektralbereich aufeinanderfolgenden Filtern zur Analyse von Signalen verwendet, so spricht man von einer Filterbank. Für Oktavfilter gilt für die Mittenfrequenz benachbarter Filter $f_{m,2} = 2 \cdot f_{m,1}$. Für Terzfilter gilt $f_{m,2} = \sqrt{2} \cdot f_{m,1}$, d. h. drei Terzfilter umfassen den Frequenzbereich einer Oktave. Terzfilter sind nach DIN 45652 genormt.

Mathematische Grundlage von Schmalbandanalysen ist die *Fouriertransformation*.

Die *Frequenzbewertung* bildet die Empfindlichkeit des Gehörs als Eigenschaft der Frequenz nach. Die Messgröße Schalldruckpegel wird hierbei durch einen Bewertungsfiter gewichtet. Die Frequenzbewertung kann damit als frequenzabhängiger Abzug des Pegels für jedes spektrale Band dargestellt werden.

Bei einer *Zeitbewertung* wird der gemessene Schalldruckverlauf mit einer bestimmten Zeitkonstanten beaufschlagt. Die eingestellte Zeitkonstante beeinflusst damit die „Trägheit“ des Pegelverlaufs über der Zeit. Die verwendeten Zeitkonstanten sollen Eigenschaften der zeitlichen Verarbeitung des Gehörs nachbilden.

Möglich und üblich sind Kombinationen von Zeit- und Frequenzbewertung.

Schallausbreitung

<u>Deutsch</u>	<u>Englisch</u>
<i>Schallquelle</i>	<i>sound source</i>
<i>Quellpegel</i>	<i>source level</i>
<i>Schallemission</i>	<i>sound emission</i>
<i>Schallimmission</i>	<i>sound immission</i>
<i>Schallausbreitung</i>	<i>sound propagation</i>
<i>Salzgehalt (Salinität)</i>	<i>salinity</i>
<i>Schichtung</i>	<i>stratification</i>
<i>Brechung</i>	<i>refraction</i>
<i>Reflexion</i>	<i>reflection</i>
<i>Streuung</i>	<i>scattering</i>
<i>Ausbreitungsverlust</i>	<i>transmission loss</i>
<i>geometrische Abnahme</i>	<i>geometrical spreading</i>
<i>Anomalie der Schallausbreitung</i>	<i>anomaly of sound propagation</i>
<i>Flachwasser</i>	<i>shallow water</i>

Schallemission bezeichnet das Aussenden von Schall von einer *Schallquelle*. Eine Schallquelle wird charakterisiert durch ihren *Quellpegel* (siehe auch Abschnitt *Pegel*).

Der Begriff *Schallimmission* beschreibt die Einwirkung von Schall auf einen Ort. Die Schallimmission ist abhängig von der Schallemission und der Ausbreitung des Schalls.

Die Ausbreitung von akustischen Wellen im Meer (*Schallausbreitung*) hängt von einer Vielzahl äußerer Parameter ab und ist damit ein komplexer Vorgang.

- Die Schallgeschwindigkeit ist nicht gleichmäßig, sondern ändert sich mit der



Tiefe. Weiterhin beeinflussen *Salzgehalt* (Salinität) und Temperatur die Schallgeschwindigkeit. Vor allem die Temperatur selbst variiert wieder mit der Wassertiefe (*Schichtung*).

- Als Folge der variierenden Schallgeschwindigkeit wird der Schall zum Boden hin oder zur Oberfläche hin gebrochen (*Brechung*). Es entstehen Zonen hohen und niedrigen Schalldrucks.

Bei komplexen Ausbreitungsbedingungen muss keine monotone Abnahme des Schalldrucks bei zunehmender Entfernung von der Quelle vorliegen.

- Die Beschaffenheit von Oberfläche und Boden bewirkt *Reflexionen* und *Streuungen* von Schall.

Eine wichtige Größe zu Quantifizierung der Schallausbreitung im Meer ist der *Ausbreitungsverlust*. Dieser ist orts-, entfernungs- und frequenzabhängig. Er setzt sich zusammen aus *geometrischer Abnahme* der Schallintensität sowie frequenzabhängiger Dämpfung durch Absorption. Unter dem Begriff Anomalie werden Phänomene wie Brechung, Inhomogenitäten, Reflexionen und Streuungen zusammengefasst.

Insbesondere die Schallausbreitung im *Flachwasser* (Wassertiefe unter 200 m) oder extremen Flachwasser (Wassertiefe unter 50 m) ist durch häufige Reflexionen an Oberfläche und Boden gekennzeichnet. Die Ausbreitungsverluste werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Bodens bestimmt. Die Vorhersagbarkeit der Schallausbreitung ist geringer als im Tiefwasser. Die Verluste durch Reflexion oder Streuung an Grenzflächen werden unter dem Begriff *Anomalie der Schallausbreitung* zusammengefasst.

Hat das Schallgeschwindigkeitsprofil bei einer bestimmten Tiefe ein Minimum, so entsteht dort ein Schallkanal. Schall wird dort unter bestimmten Umständen immer wieder zur Kanalachse hin gebrochen und kann sich damit über große Entfernungen ausbreiten.

Schallwirkung (auf marine Lebewesen)

Deutsch

Englisch

Schallwirkung

impact of sound

Verhaltensreaktion

behavioural reaction

vorübergehende Hörschwellenverschiebung

temporary threshold shift

dauerhafte Hörschwellenverschiebung

permanent threshold shift

Schallemissionen können von Meeressäugern über große Entfernungen wahrgenommen werden. Die *Wirkung von Schall* auf Meeressäugetiere kann sich in *Verhaltensreaktionen* (Stressreaktionen wie Flucht) zeigen, aber auch physiologische Reaktionen wie eine Beeinflussung der Hörfähigkeit sind möglich.

Die erste Stufe einer physiologischen Reaktion ist ein *vorübergehender Hörverlust* bzw. eine vorübergehende Anhebung der Hörschwelle (TTS, temporary threshold shift). Diese Abnahme der Hörfähigkeit kann auch eine Beeinträchtigung des Orientierungssinns sowie der akustischen Kommunikation bewirken.



Erholt sich eine TTS nicht innerhalb eines bestimmten Zeitraums, spricht man von einem *dauerhaften Hörverlust* bzw. einer dauerhaften Hörschwellenanhebung (PTS, permanent threshold shift).

11.3 Prognosen für Unterwasserschall

<u>Deutsch</u>	<u>Englisch</u>
<i>Ausbreitungsmodell</i>	<i>propagation model</i>
<i>Prognose</i>	<i>prediction</i>
<i>Quellpegel</i>	<i>source level (SL)</i>
<i>entfernungsunabhängiges Modell</i>	<i>range independent acoustic model</i>
<i>entfernungsabhängiges Modell</i>	<i>range dependent acoustic model (RAM)</i>
<i>Nahfeld</i>	<i>near field</i>
<i>Fernfeld</i>	<i>far field</i>

Akustische *Ausbreitungsmodelle* sind numerische Verfahren, um die Schallausbreitung im Meer nachzubilden. Durch die Änderung von Modellparametern können verschiedene Situationen nachgebildet werden (beispielsweise jahreszeitliche Änderungen des Schallgeschwindigkeitsprofils durch Variation der Temperatur oder des Salzgehaltes).

Ein Modell wird als *entfernungsunabhängig* bezeichnet, wenn sich die beschreibenden ozeanografischen Parameter des Mediums nicht mit der Entfernung ändern. Es wird also ein lediglich horizontal geschichtetes Medium modelliert. *Entfernungsabhängig* heißt ein Modell, wenn die Parameter in ihrer räumlichen Verteilung berücksichtigt werden.

Es gibt eine Reihe verschiedener bekannter akustischer Modelle zur Beschreibung der Schallausbreitung im Meer, siehe z. B. [31].

Im Rahmen der Genehmigung von Offshore Windparks ist es das Ziel von numerischen Berechnungen und *Prognosen*, die zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen bei Bau und Betrieb vorab durch Berechnungen zu ermitteln und den Vorgaben der Genehmigungsbehörde gegenüberzustellen. Es ist sicherzustellen, dass die Berechnungen so durchgeführt werden, dass ein Vergleich von Prognose und Messung möglich ist.

Zur Modellierung des Schallfelds bei Bauarbeiten an Offshore-Windparks ist neben der Kenntnis der Ausbreitungsbedingungen auch eine Beschreibung der Schallquelle erforderlich. In der Praxis wird hierzu meist der *Quellpegel* verwendet. Dieser ist eine idealisierte Rechengröße (der Schalldruckpegel, der bei einem Kugelstrahler oder akustischen Monopol in 1 m Abstand gemessen werden würde).

Mit dem Quellpegel und den modellierten Ausbreitungsbedingungen (Schallgeschwindigkeitsprofil, Wassertiefe, Seegang und Bodeneigenschaften) ergeben sich aus dem Modell der prognostizierte Ausbreitungsverlust und damit der berechnete Schalldruckpegel am Immissionsort.

Gegenüber dem idealisierten Quellpegel sind bei der Charakterisierung reeller Schallquellen Unterschiede zu beachten, z. B. die Ausdehnung der Schallquelle und die Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls.

Im *Nahfeld*, d. h. in quellnahen Bereichen, sind Schalldruck und Schallschnelle



nicht gleichphasig, das bedeutet beispielsweise, dass eine Abschätzung der Schalleistung gemäß der Annahme $P \sim p^2$ (im Fernfeld) nicht zulässig ist. Der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld ist nicht scharf. Damit Fernfeldbedingungen vorliegen, sollte in der Praxis der Abstand zur Schallquelle deutlich größer sein als die Abmessungen der Schallquelle und als die größte interessierenden Wellenlänge.

12 Literatur

- [21] DEGA-Empfehlung 101, Akustische Wellen und Felder, März 2006.
- [22] DIN 1304-1:1994-03, Formelzeichen – allgemeine Formelzeichen.
- [23] DIN 1319-1:1995, Grundlagen der Messtechnik. Teil 1: Grundbegriffe.
- [24] DIN 1319-2:1995, Grundlagen der Messtechnik. Teil 2: Begriffe für Messmittel.
- [25] DIN 1320:2009-12, Akustik – Begriffe
- [26] DIN EN ISO 80000-8:2007, berichtigt 2007-08-15, Größen und Einheiten – Teil 8: Akustik
- [27] DIN 13320:1979-06, Akustik; Spektren und Übertragungskurven, Begriffe, Darstellung.
- [28] DIN EN 61672-1, Elektroakustik; Schallpegelmesser. Teil 1: Anforderungen. 2003. (IEC 61672-1:2002).
- [29] Hellbrück, J., Hören. Hogrefe, Göttingen, 1993.
- [30] Müller, G., Möser, M. (Hrsg.), Taschenbuch der Technischen Akustik. 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [31] Urban, Heinz. G., Handbuch der Wasserschalltechnik. STN Atlas Elektronik GmbH, Bremen, 2002.
- [32] Urick, Robert J., Principles of Underwater Sound. 3rd edition. McGraw-Hill Book Company. New York, 1983.