HYDRODYNAMIK

Der Lärm der Ozeane

Faszinierende Unterwasserakustik – von Blasen und natürlichem wie auch zivilisatorischem Lärm in unseren Meeren.

Detlef Lohse

Der Ozean wird oft mit Stille assoziiert. Doch das ist alles andere als wahr: Der Lärm in den Ozeanen nimmt immer mehr zu. Was sind die (physikalischen) Ursachen dafür und was können wir dagegen tun?

Der Stille Ozean – der Pazifik – kam angeblich zu seinem Namen, als Ferdinand Magellan im November 1520 vom Atlantik kommend durch die stürmische, heute nach ihm benannte Magellanstraße segelte und vor sich eine riesige, völlig ruhige Wasseroberfläche sah. Aber so still ist der Stille Ozean gar nicht – genauso wenig wie andere Ozeane. Hier sind nicht Sturm und Wellen gemeint, sondern der Lärm *unter* der Wasseroberfläche. Zum einen gibt es natürliche Lärmquellen, etwa das Brechen der Wellen, Regentropfen, die auf die Wasseroberfläche fallen, Wale, Fische, Krebse oder seismische Aktivität. Zum anderen verursachen Menschen Lärm unter Wasser, und zwar immer mehr. Zu den Ursachen gehören vor allem die Schifffahrt, militärische Aktivitäten, Sonar, Bauaktivitäten im Ozean oder seismische Erkundungen. Die Unterwassertierwelt nimmt diese Geräusche als sehr störend wahr, insbesondere Delfine und Wale [1].

In diesem Artikel geht es um beide Lärmquellen – die natürlichen und die menschengemachten – mit Fokus auf der Physik hinter der Lärmentstehung und -ausbreitung. Beides ist eng verbunden mit der Physik oder genauer der Dynamik der Blasen. Weiterhin geht es um Maßnahmen gegen die zunehmende Lärmverschmutzung im Ozean.

© 2024 Wiley-VCH GmbH

Lärm durch Blasen

Im Jahr 1989 demonstrierten Andrea Prosperetti, Larry Crum und ihr Team den Zusammenhang von Luftblasen, ihren Oszillationen und der Schallemission [2]. Sie beobachteten mit Hochgeschwindigkeitskameras den Aufprall von Tropfen auf einer Wasseroberfläche und korrelierten die Bilder mit Unterwasserschallmessungen mit einem Hydrophon (**Abb. 1**). Der Laie erwartet wohl die maximale Schallemission direkt beim Tropfenaufschlag. Aber das ist nicht der Fall. Hingegen formt sich durch den Aufprall des Tropfens ein nach oben hin offener Hohlraum, der sich wegen des hydrostatischen Drucks wieder schließt. Hierbei entsteht eine Blase. Unter Wasser ist die Schallemission zu hören, die durch die Eigenschwingung dieser Blase entsteht.

Mathematisch beschreibt eine gewöhnliche Differentialgleichung für den Blasenradius $R(t)$ die Blasendynamik, nämlich die Rayleigh-Plesset-Gleichung (RP-Gleichung). Sie folgt unter Annahme sphärischer Geometrie aus der Navier-Stokes-Gleichung in Potentialströmungstheorie [3, 4]:

$$\rho\left(R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2\right)=p_\mathrm{g}\left(R(t)\right)-P_0-P(t)-4\eta\frac{\dot{R}}{R}-\frac{2\sigma}{R}\,. \qquad (1)$$

Dabei sind $p_\mathrm{g}(R(t))$ der Gasdruck in der Blase (beschrieben durch eine Zustandsgleichung), $P(t)$ die Druckvariation im Wasser, P_0 der Umgebungsdruck (meistens 1 atm), ρ die Dichte des Wassers, η dessen dynamische Viskosität und σ die Oberflächenspannung. Die Rayleigh-Plesset-Gleichung ist eine Art Druckbilanz, wobei auf der linken Seite der Gleichung der inertiale Teil steht und rechts der Antriebsdruck $P(t)$, der Gegendruck des Gases p_g sowie ein viskoser Dämpfungsterm; der letzte Term ist der Laplace-Druck.

Aus der Linearisierung der RP-Gleichung (1) folgt, dass die Eigenfrequenz der Volumenoszillation einer Blase mit dem Gleichgewichtsradius R_0 unter isothermischen Bedingungen näherungsweise

$$\omega_0=\sqrt{\frac{3P_0}{\rho\,R_0^2}} \qquad (2)$$

ist [3, 4]. Diese Minnaert-Frequenz ist nach dem flämischen Naturforscher Marcel Minnaert benannt [5]. Mit den Materialeigenschaften von Wasser unter Gleichgewichtsbedingungen ergibt sich die Faustformel

$$f_0\,R_0\approx 3\ \mathrm{MHz\ \mu m}=3\ \mathrm{kHz\ mm}=3\ \mathrm{Hz\ m} \qquad (3)$$

für die Resonanzfrequenz $f_0=\omega_0/(2\pi)$. Genau diese Frequenz ist beim Tropfenaufprall auf die Wasseroberfläche zu hören.

Ein anderer wichtiger Grenzfall der RP-Gleichung (1) ist $R\ddot{R}+3/2\,\dot{R}^2=0$. Im Jahr 1917 leitete Lord Rayleigh diesen inertialen Teil der Gleichung und dessen Lösung im Kontext seiner Analyse des damals beobachteten Kavitationsschadens von Schiffsschrauben an U-Booten her [6]. Lord Rayleigh erkannte, dass dieser Schaden durch kollabierende Kavitationsblasen entsteht, die vorher wegen der hohen Geschwindigkeiten an der Schiffsschraube nukleieren und explosiv wachsen (**Abb. 2**). Dieses Verhalten ist quantitativ mit der Bernoulli-Gleichung zu verstehen, also mit der Fluiddynamik des 19. Jahrhunderts:

$$\frac{1}{2}\rho\,U^2(t)+p(t)=\mathrm{const.} \qquad (4)$$

Demnach implizieren hohe Geschwindigkeiten $U(t)$ geringen Druck $p(t)$, wodurch kleine Nukleationskeime im Wasser zu großen Blasen wachsen können. Die Lösung des inertialen Teils (linke Seite) der RP-Gleichung (1) ist das Potenzgesetz

$$R(t)\propto(t_\mathrm{s}-t)^{2/5}, \qquad (5)$$

mit einer divergierenden Singularität in der Geschwindigkeit $\dot{R}(t)\propto-(t_\mathrm{s}-t)^{-3/5}$ zum Zeitpunkt t_s. Die Singularität

© 2024 Wiley-VCH GmbH

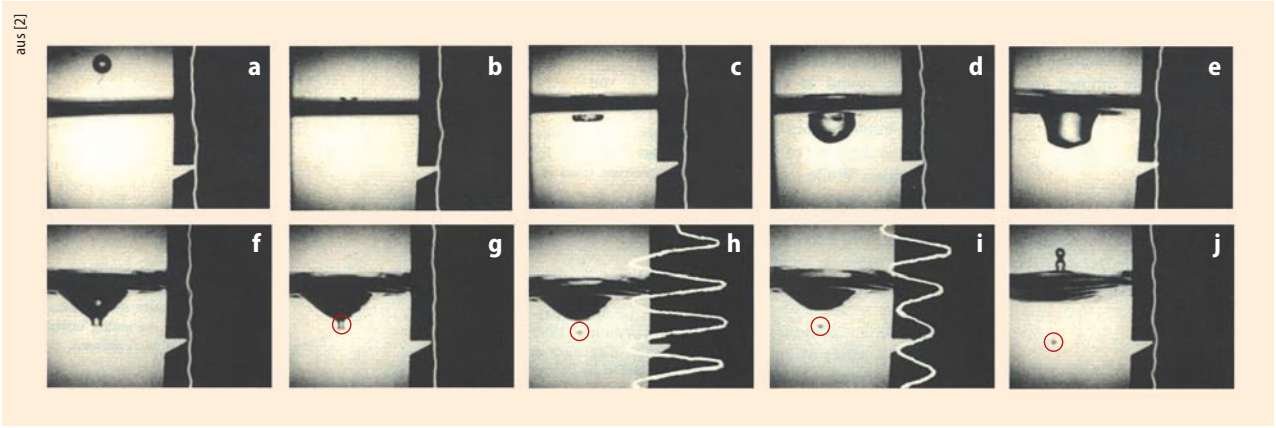


Abb. 1 Ein Tropfen, der auf eine Wasseroberfläche fällt, kann eine Blase erzeugen, deren Schwingungen als das Geräusch von Regen hörbar sind. Die Bilder (a) bis (j) zeigen die Dynamik der Blase; der emittierte Schall ist jeweils rechts neben dem Bild dargestellt. Der Tropfen besitzt einen Durchmesser von 3 mm und trifft mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s auf die Wasseroberfläche. Beim Aufprall (b) ist es noch völlig still. Die Blase erscheint erst in Bild (g) als kleiner Punkt unter dem Hohlraum – und genau hier setzt die Schallemission ein.

beschreibt die große Intensität des Blasenkollaps, der letztendlich zum Kavitationsschaden an den Schiffsschrauben führt. Genau dieser Prozess beschränkt die Geschwindigkeit von U-Booten. Heute ist bekannt, dass die Schallemissionen der kollabierenden Kavitationsblasen im Abstand r Hauptursache des Unterwasserlärms durch die Schifffahrt sind:

$$P_s(r,t) = \frac{\rho R}{r}\,(2\dot{R}^2 + R\ddot{R}). \qquad (6)$$

In der Tat spiegelt sich die Singularität in der RP-Blasendynamik (5) in der Singularität $P_s(t) \sim (t_s - t)^{-6/5}$ in der Schallemission wider.

Von schließenden Scheren und singenden Walen

Eine der kuriosesten natürlichen Lärmquellen unter Wasser ist das Pistolenkrebschen. Das einige Zentimeter große Tierchen, das in tropischen Küstengewässern sehr häufig vorkommt, erzeugt einen breitbandigen Höllenlärm, der wie das Knacken von Popcorn in der Pfanne klingt. Das Tierchen ist bei der Marine äußerst unpopulär: Zum einen stört es die Kommunikation von U-Booten, zum anderen sollen japanische U-Boote angeblich Kolonien des Pistolenkrebschens genutzt haben, um sich im Dezember 1941 vor dem Angriff auf Pearl Harbor zu verstecken.

Abb. 2 Ein schneller Schiffspropeller kann kavitierende Blasen erzeugen, die diesen beschädigen können, wenn sie in seiner Nähe kollabieren.

Bis 1999 dachte man, dass die Ursache des Lärms die mechanische Vibration der sich schnell schließenden Schere ist. Als ich das Schallsignal des Tierchens bei einem Besuch im Labor der Zoologin Katharina Schmitz in München zum ersten Mal sah, war mir dank meiner Arbeit an der Einzelblasensonolumineszenz [7] klar, dass es von einer kavitierenden Blase stammen muss. Um das zu beweisen, folgten wir dem Vorbild von Prosperetti und Crum [2] und korrelierten Aufnahmen des Ereignisses von Hochgeschwindigkeitskameras mit Hydrophonmessungen der Schallemission [8]: Damit das Pistolenkrebschen seine Schere schließt, musste es gekitzelt werden. Das Schließen der Schere erfolgt so schnell, dass die Geschwindigkeit des Wasserjets, der durch das Herausdrücken des Wassers zwischen den zwei Teilen der Schere entsteht, so hoch ist, dass Kavitationsblasen entstehen (**Abb. 3**). Nach Gl. (4) reicht eine Geschwindigkeit von 25 m/s, um einen Unterdruck von 3 atm zu erzeugen, der die immer vorhandenen Kavitationskeime zum explosiven Wachsen bringt. Hat sich der Druck wieder normalisiert, kollabiert die Blase und emittiert dabei Schall (**Abb. 3a**).

Doch warum macht das Tierchen das? Die Antwort ist einfach: Es will fressen! Die kollabierende Blase sendet einen so starken Schallpuls aus, dass dieser kleine Fische oder Garnelen betäuben oder sogar töten kann. Anschließend frisst das Pistolenkrebschen diese Beute auf. Unsere Erklärung beantwortete auch die Frage, warum Pistolenkrebschen nur in einer Tiefe von bis zu 50 Metern vorkommen: Der hydrostatische Druck steigt mit zunehmender Tiefe, sodass das Krebschen irgendwann keine Kavitationsblasen mehr erzeugen kann. In tieferem Wasser würde es also verhungern.

In einem ganz anderen Frequenzbereich, nämlich bei tiefen Frequenzen, liegt der Walgesang. Akustische Signale sind für diese Meeressäuger die beste Methode, um über weite Abstände im Ozean zu kommunizieren, denn Sehen und Riechen ist im tiefen Ozean schwierig oder gar un-

© 2024 Wiley-VCH GmbH

angepasst aus [8]

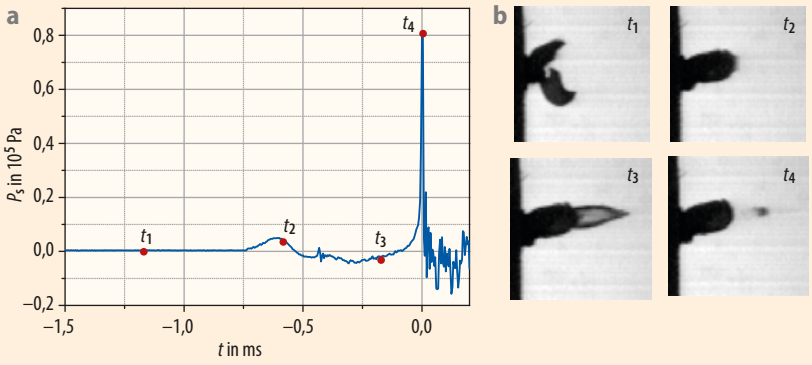


Abb. 3 Ein Pistolenkrebschen erzeugt Schall, wenn es seine Schere schnell schließt (a). Die Fotos (b) zeigen die sich schließende Schere zu den in (a) eingezeichneten Zeiten: Zum Zeitpunkt t_2 ist die Schere vollständig geschlossen, aber kein Schall zu detektieren. Bei t_3 ist die Kavitationsblase nahezu maximal ausgedehnt. Der Blasenkollaps bei t_4 verursacht die Schallemission.

möglich, und die tiefen Frequenzen sind besonders langreichweitig (**Infokasten**). Genau wie Vögel zur Paarungszeit am intensivsten singen, tun das auch die Wale, und zwar umso lauter, je kleiner die Waldichte in dem jeweiligen Gebiet und zur jeweiligen Zeit ist. Wie genau die Wale die Schallwellen erzeugen, hängt von der Walart ab und ist in vielen Fällen noch nicht gut verstanden. Auch Delfine kommunizieren akustisch: Sie stoßen Ströme von Luftblasen aus, damit ihre Artgenossen sie hören und sehen. Bei den Buckelwalen dienen solche „Luftgirlanden" dazu, Krill- und Fischschwärme zusammenzutreiben.

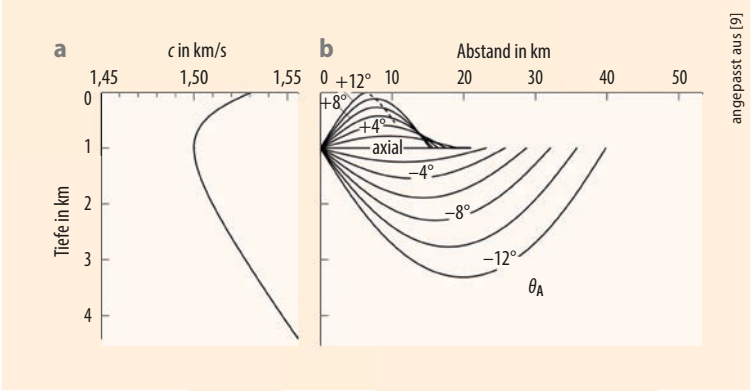
Bei der stürmischen See, die Magellan während seiner Passage in Richtung des Stillen Ozeans erlebte, dürften aber Regentropfen, Kavitationsblasen des Pistolenkrebschens oder der Gesang der Wale kaum eine Rolle gespielt haben. Hauptursache des Lärms dürften die Wellen gewesen sein (**Abb. 4**), die neben oder selbst über seinem Schiff zusammenschlugen. Aber wie erzeugt dies Lärm? Auch hier sind Blasen essenziell, nämlich diejenigen, die beim Überschlagen der Welle entstehen. Bei großen Wellenlängen im Bereich vieler Meter und großer Blasen entspricht das nach Gleichung (3) extrem tiefen Frequenzen von unter einem Hertz. Dieser Infraschall liegt unterhalb der typischen Hörschwelle von etwa 20 Hz.

Die vielen Blasen aller Größen, die beim Brechen von Wellen entstehen, ermöglichen übrigens auch den Austausch von Gasen wie Kohlendioxid aus der Atmosphäre mit dem Ozean. Schätzungsweise ist etwa ein Drittel des zivilisatorischen Kohlendioxids inzwischen im Ozean gelöst. Dies ist nur möglich, weil sich die Kontaktfläche zwischen Ozean und Atmosphäre durch die Blasenbildung extrem vergrößert. Doch durch diesen Vorgang ist der pH-Wert der Ozeane gesunken, was die Schallausbreitung beeinflusst (**Infokasten**). Umgekehrt führen Blasen, die an die Wasseroberfläche steigen und dort kollabieren, zu einer Injektion kleiner Tropfen und damit Aerosolen in die At-

Adobe Stock / irabel8

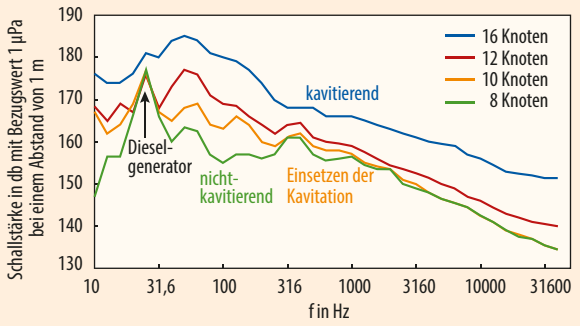
Abb. 4 Das Zusammenschlagen von Wellen in stürmischer See kann extrem laut sein. Auch hier spielen Blasen eine zentrale Rolle.

© 2024 Wiley-VCH GmbH



angepasst aus [9]

Abb. 5 Die kombinierte Abhängigkeit von Temperatur und Druck führt zu einem interessanten Schallgeschwindigkeitsprofil (in km/s) in tropischen Gewässern mit einem Minimum in einer Tiefe von 1 km (a). Abbildung (b) zeigt die korrespondierende Schallausbreitung für verschiedene Winkel: Das Minimum in der Schallgeschwindigkeit impliziert den Wellenleitercharakter des Ozeans.



angepasst aus [20], basierend auf [13], Creative Commons Attribution License (CC BY).

Abb. 6 Das Schallspektrum kommerzieller Schiffe hängt stark von der Geschwindigkeit ab: Bei 8 Knoten ist die Schallemission durch den Lärm der Maschine dominiert, bei 16 Knoten hingegen durch die Schallemission der kavitierenden Blasen, die am Propeller entstehen.

mosphäre, die für die Wolkenbildung wichtig sind. All das sind wichtige Prozesse für Klimamodelle. Vieles davon ist noch nicht verstanden.

Eine weitere Schallquelle im Ozean sind seismische Aktivitäten wie Erdbeben und Erdrutsche, die – zeitlich beschränkt – zu einer erheblichen Schallemission führen.

Zivilisatorischer Lärm im Ozean

Kavitierende Blasen, insbesondere an Schiffsschrauben, sorgen für Schallemission unter Wasser. Dieser Kavitationslärm von Schiffen hängt von deren Geschwindigkeit ab (**Abb. 6**). Bei den üblichen Geschwindigkeiten kommerzieller Schiffe dominiert Lärm durch Kavitation das Schallemissionsspektrum. Wie beim Auto reduziert langsames Fahren Lärm, aber bei der kommerziellen Schifffahrt ist Zeit Geld. Die meiste Schallemission erfolgt bei niedrigen Frequenzen. Gerade dort aber ist die Reichweite des Schalls gewaltig, da er bei der Ausbreitung im Ozean nur sehr schwach gedämpft wird (**Infokasten**).

Der Effekt von Kavitationsblasen ist hör- und auch sichtbar: Stefan und Szeri haben herausgefunden, wie aufstei-

Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung im Ozean

In Flüssigkeiten und Gasen ist die **Schallgeschwindigkeit** c, also die Ausbreitungsgeschwindigkeit der longitudinalen Schwingungen der Moleküle, durch das Kompressionsmodul K (die „Steifheit“) und die Dichte ρ bestimmt: $c = \sqrt{K/\rho}$. Beide Größen hängen von Temperatur und Druck ab; im Ozean besteht zudem eine schwache Abhängigkeit vom Salzgehalt. K wächst mit zunehmender Temperatur, da die Moleküle sich mehr bewegen und sich schlechter zusammenstauchen lassen. Die Dichte ρ dagegen sinkt mit zunehmender Temperatur, da sich das Wasser ausdehnt. Beide Effekte haben somit die gleiche Konsequenz: Bei 0 °C in Seewasser beträgt $c = 1449$ m/s, bei 40 °C ist $c = 1563$ m/s. Die kombinierte Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c von Temperatur und Druck führt zu einem interessanten Tiefenprofil von c (**Abb. 5**): Wegen der Temperaturabhängigkeit sinkt die Schallgeschwindigkeit c von etwa 1520 m/s an der Wasseroberfläche auf 1480 m/s in einem Kilometer Tiefe, um dann wegen der Druckabhängigkeit wieder anzusteigen. Das sorgt für ein ausgeprägtes Minimum in der Schallgeschwindigkeit. Da der akustische Brechungsindex mit der Schallgeschwindigkeit wächst, wird der Unterwasserschall in Richtung des Minimums gebrochen (Gesetz von Snellius), wodurch das Ozeanwasser in etwa 1 km Tiefe die Eigenschaften eines akustischen Wellenleiters hat (SOund Fixing And Ranging channel, SOFAR-Kanal).

Dadurch ist es möglich, die Schallemission unter Wasser von einem Ende der Welt am anderen wahrzunehmen. Erstmals gelang das 1960 mit der Schallübertragung eines Ereignisses nahe Perth in Australien bis nach Bermuda [9]. Dabei handelte es sich allerdings um eine so gigantische Unterwasserexplosion, dass die Druckwellen die Meerestiere wohl massiv geschädigt haben. Daher sieht man inzwischen von weiteren Experimenten dieser Art ab. Im Prinzip ist es mit Messungen der Schallgeschwindigkeit im Ozean sogar möglich, den Effekt der globalen Meereserwärmung zu messen [9]: Bei den höheren Wassertemperaturen heutzutage reist der Schall von Perth bis Bermuda etwa zehn Sekunden schneller als 1960.

Bei diesen gigantischen Abständen ist klar, dass die **Schalldämpfung** im Ozean sehr klein sein muss: Das gilt jedoch nur für tiefe Frequenzen. So beträgt die Schalldämpfung 10^{-3} dB/km bei einer Frequenz von 100 Hz [10]. Interessanterweise sind die Hauptursachen der Schallabsorption im niederfrequenten Bereich die Wechselwirkung des Schalls mit Spuren vorhandener Borsäure und das Gleichgewicht zwischen Carbonaten und Boraten [11]. Daher spielt der pH-Wert eine wichtige Rolle. Dieser verschiebt sich durch die Versäuerung des Meeres mit Kohlendioxid und verringert damit die Schalldämpfung: Die CO_2-Emissionen machen den Ozean noch lauter.

Die Schallgeschwindigkeit in Wasser hängt dramatisch von der Konzentration und Größe der Blasen ab [4]. Bei einer Blasenkonzentration von nur einem Prozent kann sie von rund 1500 m/s auf rund 100 m/s zurückgehen und ist damit kleiner als die Schallgeschwindigkeit in Luft (330 m/s)! Dieser starke Rückgang geht auf das sehr kleine Kompressionsmodul K einer Flüssigkeit mit Blasen zurück. Genauer lässt sich die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten mit Blasen aus der Kontinuitätsgleichung, kombiniert mit der Rayleigh-Plesset-Gleichung für die Blasen und einer Zustandsgleichung für das Gas, herleiten. Daraus resultiert letztlich eine Korteweg-de Vries-Wellengleichung für die Schallwellenausbreitung [12].

© 2024 Wiley-VCH GmbH

gende Mikrobläschen, die an Schiffsschrauben entstehen, im Wasser vorhandene Tenside organischen Ursprungs an die Oberfläche transportieren, wo sie sehr lange verbleiben [14]. Der daraus resultierende Gradient in der Oberflächenspannung macht das Kielwasser eines Schiffs für viele Stunden und bis zu einer Längenskala von hundert Kilometern sichtbar. Solche Schiffsspuren sind sogar aus dem Weltraum zu sehen. Noch mehr Blasen stammen von Schiffen, bei denen unter der Schiffshülle injizierte Blasen und Luftschichten den Reibungswiderstand mindern sollen, um Schiffsdiesel zu sparen (**Abb. 7a**). Das ist ein aktives Forschungsgebiet der marinen Technologie mit interessanten Fragen der Grundlagenforschung [15].

In küstennahen Gewässern sorgt das Einrammen der Pfeiler für Windturbinen für Lärm (**Abb. 7a**). Bald wird der Unterwasserabbau von Bodenschätzen als weitere Lärmquelle hinzukommen [16]. Auch seismische Erkundungen, etwa bei der Suche nach Erdöl- oder Erdgasreserven unter dem Meeresgrund, machen einen riesigen Radau. Dieses Verfahren setzt niederfrequenten Schall ein, der am Meeresgrund reflektiert und danach mit Hydrophonen und Seismometern detektiert wird (**Abb. 7b**). Um die relevanten Informationen zu Erdgas- oder Erdölvorkommen zu gewinnen, sind niedrige Frequenzen von einigen Hertz entscheidend, denn das Erdreich dämpft hohe Frequenzen jenseits von 120 Hz.

Aber wie entsteht derart niederfrequenter Schall? Gleichung (3) eignet sich auch für Wellenlängen im Meterbereich zur Abschätzung. Demnach beträgt die Resonanzfrequenz einer Blase mit einem Radius von $R_0 = 1$ m etwa $f_0 = 3$ Hz. Sogenannte Airguns können als Schallquellen solche Riesenblasen verursachen. Hierzu wird während des Ladevorgangs in einem Hohlraum Luft unter sehr hohen Druck gesetzt. Diese Luft entweicht beim Entladevorgang, wodurch eine riesige Luftblase mit typischen Durchmessern von mindestens einem Meter entsteht. Die Schwingungen dieser Luftblase sorgen für die Schallerzeugung und -emission im gewünschten Bereich.

Blasen dieser Größe sind nicht mehr strikt sphärisch, was sich auf ihre Schallabstrahlung auswirkt – sowohl die Intensität als auch die Richtung betreffend. Randintegralmethoden ebnen den Weg, um die Dynamik solch großer Blasen aus der Navier-Stokes-Gleichung (oder genauer gesagt aus ihrer Potentialströmungsnäherung) numerisch zu berechnen. Andrea Prosperetti hat Methoden für die Strömungsdynamik entwickelt [17], mit denen sich die Schallemission riesiger nichtsphärischer Blasen aus den Airguns numerisch berechnen und mit Resultaten der RP-Gleichung vergleichen lässt [18]. Die Unterschiede sind erstaunlich klein. Die RP-Dynamik stellt also eine vorzügliche Näherung dar und eignet sich auch, die kollektive Schallemission eines Blasenclusters zu verstehen.

Schrecklicher – im wahrsten Sinne des Wortes – Unterwasserlärm entsteht bei militärischen „Anwendungen", beispielsweise bei Explosionen oder Torpedos. Superkavitationstorpedos erreichen dank einer Kavitationsblase, die sich bei hohen Geschwindigkeiten um ihre Hülle bildet, Geschwindigkeiten von über 400 km/h. Torpedos explodieren übrigens nicht *auf* feindlichen Schiffen, sondern *unter* ihnen. Dabei entsteht neben einer Schockwelle eine riesige Wasserdampf- und Gasblase, die das Schiff zunächst anhebt und die dann kollabiert. Dabei bildet sich ein gigantischer Wasserjet nach oben aus, der das Schiff in Stücke zerbrechen lässt.

Problematischer Radau

Mutmaßlich sind militärische Anwendungen von Schall (Sonar oder Explosionen) auch verantwortlich für das immer wieder auftretende Massensterben von Walen. Mehre-

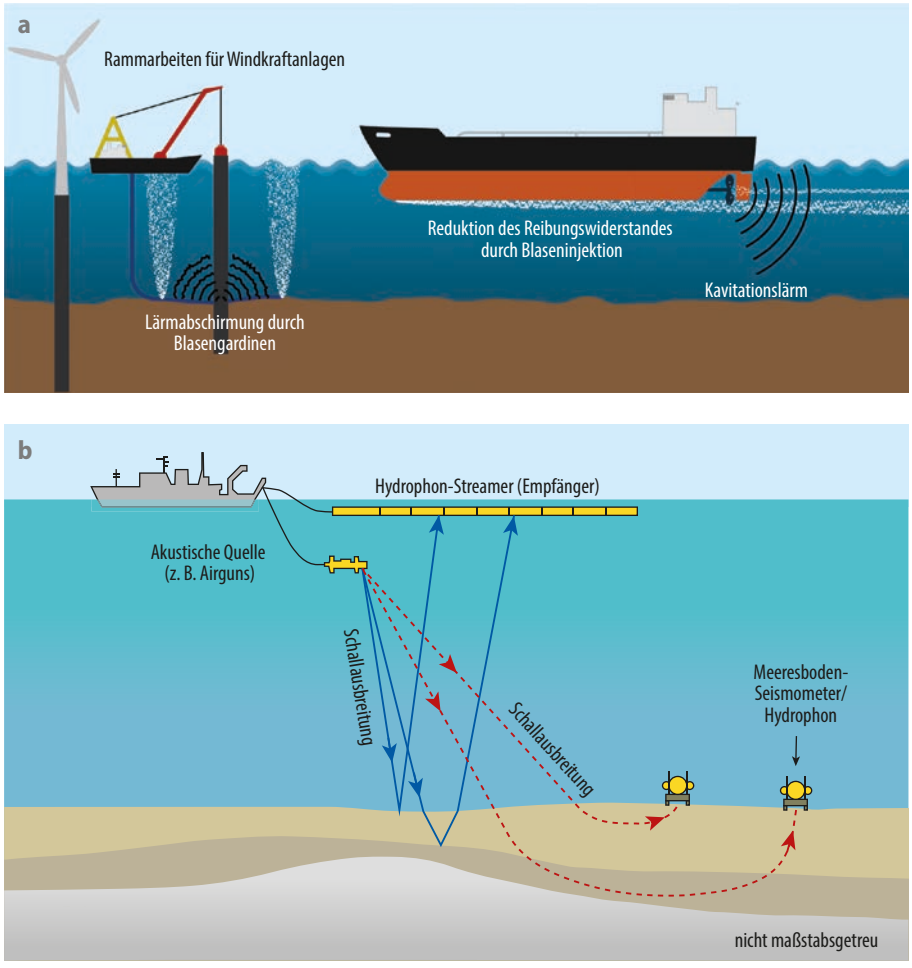


Abb. 7 In den Ozeanen gibt es viel Zilisationslärm, der etwa beim Einrammen der Pfeiler für Windturbinen entsteht (a) und sich durch Blasengardinen dämpfen lässt. Andere Lärmquellen sind das Einbringen von Blasen unterhalb von Schiffen, um den Widerstand zu reduzieren, sowie die Schallemission der Kavitationsblasen am Schiffspropeller. Darüber hinaus entsteht Lärm bei akustischen maritimen geophysikalischen Erkundungen (b).

© 2024 Wiley-VCH GmbH

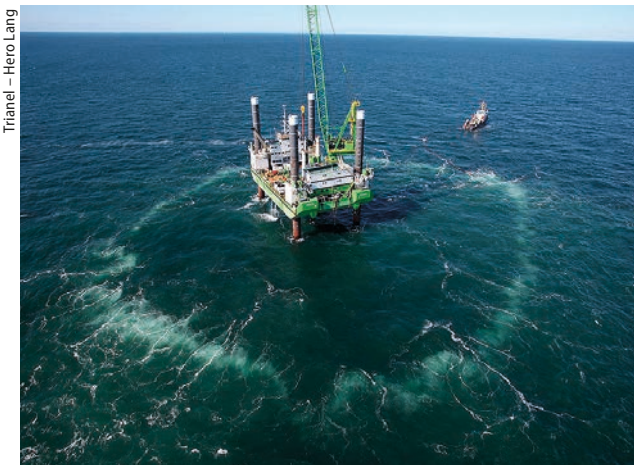

Trianel – Hero Lang

Abb. 8 Blasengardinen sind hier um eine Baustelle für eine Windturbine gut sichtbar: Die am Meeresgrund injizierten Blasen dämpfen den beim Einrammen des Pfeilers entstehenden Lärm und streuen ihn nach innen zurück.

re Effekte spielen dabei eine Rolle: Zum einen interferiert Sonar (SOund Navigation And Ranging) mit der akustischen Ortung und Kommunikation der Wale. Zudem gibt es Spekulationen darüber, dass sich die Meeressäuger durch den großen Lärm unter Wasser so sehr erschrecken, dass sie zu schnell ihre Tauchtiefe ändern und so an der Taucherkrankheit (Dekompressionskrankheit) sterben. Aber auch ohne Tiefenveränderung kann starker Schall, wie er bei militärischen Anwendungen auftritt, zum schnellen Wachstum von Mikroblasen in den Körpern der Meeressäuger führen („rectified diffusion"). Diese können katastrophale Auswirkungen haben [19].

Auch der „normale" menschengemachte Lärm unter Wasser ist problematisch: Dass die Fische und Meeressäuger ihn nicht mögen, zeigte sich spätestens 2020 deutlich, als wegen der Lockdowns während der COVID-19-Pandemie die internationale Schifffahrt um mehr als die Hälfte abnahm: In der Folge tummelten sich Fische und Meeressäuger sehr schnell wieder in denjenigen Regionen der vielbefahrenen Schifffahrtsstraßen, die sie normalerweise meiden [1]. Diese Freiheit ist für sie inzwischen wieder vorbei.

Leider wird das Lärmproblem unter Wasser aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren weiter zunehmen [20]. Schätzungsweise hat sich der niederfrequente Kavitationslärm durch die Schifffahrt in den letzten 50 Jahren mehr als verdreißigfacht [1]. Bis 2030 ist eine weitere Verdopplung der internationalen Schifffahrt zu erwarten [1] – mit immer größeren, schnelleren und dadurch lauteren Schiffen. Weiterhin senkt die Versäuerung der Ozeane durch Kohlendioxid den pH-Wert ab, was mit verringerter Schallabsorption und damit mehr Unterwasserlärm einhergeht (**Infokasten**).

Wie im Straßenverkehr hilft gegen den Lärm nur eine gesetzliche Regulierung. Als einer der ersten Häfen hat Vancouver in Kanada vor einigen Jahren strikte Grenzen für die Unterwasserschallemission von Schiffen eingeführt. Diese Grenzen lassen sich durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung einhalten (**Abb. 6**). Ein anderer Ansatz besteht darin, lärmarme – also kavitationsarme – Schiffsschrauben zu entwickeln. In der Nordsee gelten strikte Obergrenzen für den Lärm, der durch das Einrammen der Pfeiler für Windturbinen entsteht. Hier helfen am Meeresgrund injizierte Blasengardinen rund um die Baustelle: Die aufsteigenden Blasen dämpfen den emittierten Schall und reflektieren ihn nach innen zurück (**Abb. 8**). Auch hier besteht erheblicher Forschungsbedarf: Wie lassen sich Blasengröße, Dichte und Ort der Injektion optimieren, um die Schallemission der Baustelle zu minimieren?

Das Gebiet der Unterwasserakustik ist ausgesprochen vielseitig und spannend und bringt viele aktuelle Herausforderungen mit sich, die Fachleute aus der Physik, dem Ingenieurwesen und aus anderen Wissenschaftsgebieten anpacken müssen – mit dem Ziel sauberer und ruhigerer Ozeane, zum Wohle der Fische, Meeressäuger und damit auch des Menschen.

Literatur

[1] *C. M. Duarte* et al., Science **371**, eaba4658 (2021)
[2] *A. Prosperetti, L. A. Crum* und *H. C. Pumphrey*, J. Geophys. Res. **94**, 3255 (1989)
[3] *M. S. Plesset* und *A. Prosperetti*, Ann. Rev. Fluid Mech. **9**, 145 (1977).
[4] *C. E. Brennen*, Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, Oxford (1995)
[5] *M. Minnaert*, The London, Edinburgh, and Dublin Phil. Mag. & J. Sci. **16**(104), 235 (1933)
[6] *Lord Rayleigh*, The London, Edinburgh, and Dublin Phil. Mag. & J. Sci. **34**(200), 94 (1917)
[7] *M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt* und *D. Lohse*, Rev. Mod. Phys. **74**, 425 (2002); *D. Lohse,* Phys. Blätter, November 1995, S. 1087
[8] *M. Versluis* et al., Science **289**, 2114 (2000)
[9] *W. Munk*, TELLUS A **63**, 190 (2011)
[10] *R. Francois* und *G. Garrison*, J. Acoust. Soc. Am. **72**, 1879 (1982)
[11] *P. G. Brewer* et al., Mar. Chem. **177**, 591 (2015)
[12] *L. Van Wijngaarden*, J. Fluid. Mech. **33**, 465 (1968); Ann. Rev. Fluid Mech. **4**, 369 (1972); *K. W. Commander* und *A. Prosperetti*, J. Acoust. Soc. Am. **85**, 732 (1989)
[13] *P. T. Arveson* und *D. J. Vendittis*, J. Acoust. Soc. Am. **107**, 118 (2000)
[14] *R. L. Stefan* und *A. J. Szeri*, J. Colloid Interface Sci. **212**, 1 (1999)
[15] *S. L. Ceccio*, Ann. Rev. Fluid Mech. **42**, 183 (2010)
[16] *T. Peacock* und *R. Ouillon*, Ann. Rev. Fluid Mech. **55**, 403 (2023)
[17] *A. Prosperetti* und *H. Oguz*, Ann. Rev. Fluid Mech. **25**, 577 (1993)
[18] *S. Li, D. van der Meer* et al., Int. J. Multiphase flow **122**, 103143 (2020)
[19] *L. A. Crum* und *Y. Mao*, J. Acoust. Soc. Am. **99**, 2898 (1996)
[20] *L. Possenti* et al., Front. Mar. Sci. **11**, 1252901 (2024)

Der Autor

Detlef Lohse (FV Dynamik und Statistische Physik) studierte Physik in Kiel und Bonn und promovierte1992 an der Universität Marburg, wo er sich 1997 habilitierte. Seit 1998 ist er Inhaber des Lehrstuhls für Physics of Fluids an der University of Twente, Enschede, Niederlande.

Prof. Dr. Detlef Lohse, Physics of Fluids Department und Max-Planck-Center Twente for Complex Fluid Dynamics, Faculty of Science and Technology, University of Twente, Niederlande, und Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Am Fassberg 17, 37077 Göttingen

© 2024 Wiley-VCH GmbH