

## Schallemissionen der Binnenschifffahrt

Svenja Sommer, Patrick Wagner

Bundesanstalt für Gewässerkunde, 56068 Koblenz, Deutschland, Email: svenja.sommer@bafg.de

### Einleitung

Für die Modellierung von Lärmimmissionen an Wasserstraßen im Rahmen von Neu- und Ausbauprojekten kann die „Anleitung zur Berechnung der Luftschallausbreitung an Wasserstraßen“ (ABSAW) [3], die an der Bundesanstalt für Gewässerkunde entwickelt wurde, genutzt werden. Die Datengrundlage der ABSAW, die Schallemissionswerte, soll an die derzeitige Schiffsflotte angepasst und auch zukünftig aktuell gehalten werden.

Da in Deutschland mehrere an die Fahrgewässer angepasste Teilflotten fahren, wären manuelle Messungen zeit- und personalintensiv. Daher wurde im Rahmen des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur eine Messeinrichtung für die Erfassung aller notwendigen Parameter entwickelt [6], um den Schalldruckpegel vorbeifahrender Schiffe zu erfassen. Er wird ein erster Auswertungsansatz gezeigt, um die Schallemission eines Schiffs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit herzuleiten. Anschließend werden erste, vorläufige Ergebnisse aus Testmessungen präsentiert.

### Automatisierte Messeinrichtung zur Erfassung des Schalldruckpegels vorbeifahrender Schiffe

Für die Erfassung des Schiffsschalls wurde eine mobile Messeinrichtung entwickelt, die es ermöglicht, dauerhaft und automatisiert den Schalldruckpegel vorbeifahrender Schiffe zu erfassen. Die Messeinrichtung, gezeigt in Abb. 1, besteht aus einer Mikrofoneinheit mit Wetterstation und einer mobilen Schutzkiste für die Messtechnik. Zur Steuerung der Messeinrichtung wird auf das



**Abbildung 1:** Mobile Messeinrichtung zur Erfassung von Schiffsschall.

Automatic Identification System (AIS) zurückgegriffen, das vor einigen Jahren verpflichtend für die Berufsschifffahrt auf Bundeswasserstraßen eingeführt wurde. Ursprünglich ist dieses System zur Verbesserung der Sicherung und Lenkung des Verkehrs ausgelegt worden, wird hier aber zur Steuerung der Messung sowie zur Erfassung weiterer, für die Auswertung notwendige Parameter verwendet. In diesem System übermittelt jedes Schiff ca. alle 10 s u.a. seine Position, Geschwindigkeit über Grund und Kurs. Ebenfalls werden, in größeren zeitlichen Abständen, Informationen über Typ, Länge und Breite, Tiefgang und Beladungszustand (beladen/unbeladen) des Schiffes übermittelt.

Die Messeinrichtung empfängt kontinuierlich die AIS-Signale der Schifffahrt und wertet aus, ob sich ein Schiff im Empfangsbereich des Mikrofons (Radius von 700 m) befindet. Ist dies der Fall, findet die Messung des Schalldruckpegels und der meteorologischen Parameter statt. Gleichzeitig wird die Schiffsposition für die anschließende Abstandsbestimmung, der Kurs, die Geschwindigkeit über Grund, der Schiffstyp sowie die Länge und Breite aufgezeichnet. Während der Messung wird der äquivalente Dauerschalldruckpegel (A- und C-bewertet) sowie die das Frequenzspektrum (Terz-Bänder) mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s gemessen und gespeichert. Der minimale Abstand des Schiffes zum Mikrofon wird aus den über das AIS-Signal empfangenden GPS-Koordinaten des Schiffes berechnet. Dabei werden alle empfangenen Positionen während des Aufenthalts des Schiffes im Empfangsbereich mittels einer linearen Regression approximiert und der senkrechte Abstand zum Mikrofon bestimmt. Als Geschwindigkeit über Grund werden die übermittelten Geschwindigkeitswerte über die gesamte Passage gemittelt. Während der Messung wird zudem überwacht, ob sich mehr als ein Schiff im Empfangsbereich aufhält. Ist dies der Fall, wird die Messung als nicht auswertbar deklariert. Nach [2] werden die Messungen automatisch als nicht auswertbar deklariert, wenn

- die Windgeschwindigkeit über 5 m/s liegt,
- die Temperatur unter 0°C fällt,
- Niederschlag fällt,
- Fremdgeräusche die Schwelle 10 dB unter dem maximalen Vorbeifahrtspegel überschreiten.

Wird die Messung als auswertbar eingeschätzt, wird anschließend eine manuelle Überprüfung hinsichtlich Fremdgeräuschen vorgenommen und der Schalleistungspegel berechnet.

### Berechnung des Schalleistungspegels

Die Berechnung des Schalleistungspegels soll zum einen über die Messung des A-bewerteten Einzelereignispegels (analog zu [2]), zum anderen über den maximalen Vorbeifahrtspegel erfolgen. Der Schalleistungspegel kann auch direkt aus dem Mittelungspegel der Messung be-

stimmt werden, der Einzelereignispegel soll aber für einen späteren Vergleich mit Literaturwerten genutzt werden. Der maximale Vorbeifahrtspegel wird hier als Maximalwert des gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegels angenommen.

## Berechnung des Schalleistungspegels aus dem Einzelereignispegel

Der Einzelereignispegel lässt sich nach [1] aus

$$L_{T_0} = L_{eq} + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad (1)$$

berechnen, wobei  $L_{eq}$  der äquivalente Dauerschallpegel über den gesamten Messzeitraum ist, wobei nach [2] diese Zeit mindestens den Zeitraum umfassen muss, bei dem der Schalldruckpegel den maximalen Vorbeifahrtspegel um weniger als 10 dB unterschreitet,  $T$  ist die Gesamtmesszeit und  $T_0$  eine normierende Zeitdauer. Da in diesem Messaufbau der äquivalente Dauerschallpegel alle 1 s gemessen wird, muss der äquivalente Dauerschallpegel der gesamten Messung aus den Teilzeiträumen berechnet werden [1]:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N T_i 10^{0,1 L_{eq,i}} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

mit  $T_i = 1 \text{ s}$ ,  $L_{eq,i}$  sind die gemessene äquivalente Dauerschallpegel für den Zeitraum von 1 s.

Der senkrechte Abstand  $s$  zwischen Mikrofon und Schiff variiert zwischen einzelnen Vorbeifahrten, daher wird eine Normierung des Einzelereignispegels auf eine senkrechte Entfernung  $s_{\perp}$  zur Emissionsquelle vorgenommen [2]:

$$L_{T_0, s_{\perp}} = L_{T_0} + 10 \log \frac{s}{s_{\perp}} \text{ dB} \quad (3)$$

Der Einzelereignispegel hängt nicht nur vom Schalleistungspegel, sondern auch durch die Einwirkzeit von der Vorbeifahrtsgeschwindigkeit ab. In [2] wird nicht berücksichtigt, dass Schiffe in fließenden Gewässern bei gleicher Fahrt durchs Wasser unterschiedliche Geschwindigkeiten über Grund fahren, je nachdem, ob sie gegen oder mit der Strömung fahren. Die Auswirkung auf den Einzelereignispegel soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden: Bei einer Fließgeschwindigkeit von 5 km/h (typische Fließgeschwindigkeit des Rheins in der Fahrinne) und einer Geschwindigkeit im Wasser von 12 km/h beträgt die Geschwindigkeit eines Schiffes, das gegen die Strömung fährt, 7 km/h über Grund, ein Schiff, das mit der Strömung fährt, hat eine Geschwindigkeit über Grund von 17 km/h. Die Differenz der Einzelereignispegel beträgt bei ansonsten gleichbleibenden Parametern 3,8 dB. Zusätzlich fahren nicht alle Schiffe mit der gleichen Geschwindigkeit durchs Wasser, die Geschwindigkeiten variieren je nach Schiffstyp, Gewässer, Beladung und Wassertiefe. Für die Normierung des Einzelereignispegels ist die Geschwindigkeit über Grund  $v_{üG}$  relevant. Der normierte Einzelereignispegel lässt sich damit wie folgt berechnen:

$$L_{T_0, s_{\perp}, v_0} = L_{T_0} + 10 \log \frac{s}{s_{\perp}} \text{ dB} + 10 \log \frac{v_{üG}}{v_0} \text{ dB} \quad (4)$$

Als Normierungswerte werden hier  $T_0 = 1 \text{ s}$  und  $s_{\perp} = 25 \text{ m}$ , analog zu [2] sowie  $v_0 = 12 \text{ km/h}$  gewählt.

Für die Ableitung des Schalleistungspegels wird angenommen, dass sich das Schiff als Punktquelle mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Linie bewegt und dabei im kugelförmigen Halbraum abstrahlt. Der Mittelungspegel (=äquivalente Dauerschallpegel) einer solchen Vorbeifahrt lässt sich näherungsweise herleiten als

$$L_m = L_{W'} - 10 \log s_{\perp} \text{ dB} - 3 \text{ dB} \quad (5)$$

mit dem längenbezogenen Schalleistungspegel

$$L_{W'} = L_W - 10 \log(v_{üG} T_B) \text{ dB}. \quad (6)$$

Dabei ist  $L_W$  der Schalleistungspegel des Schiffs und  $T_B$  die Bezugszeit. In dem hier vorgestellten Fall ist die Bezugszeit gleich der Messdauer.

Damit lässt sich der Schalleistungspegel aus dem normierten Einzelereignispegel berechnen:

$$L_W = L_{T_0, s_{\perp}, v_0} + 10 \log(T_0) \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{v_0 [\text{km/h}]}{3,6} \right) \text{ dB} + 3 \text{ dB} + 10 \log(s_{\perp}) \text{ dB} \quad (7)$$

## Berechnung des Schalleistungspegels aus dem maximalen Vorbeifahrtspegel

Alternativ zur Berechnung des Schalleistungspegels aus dem Einzelereignispegel kann der maximale Vorbeifahrtspegel herangezogen werden. Hier wird angenommen, dass bei der größten Annäherung der größte Schalldruckpegel gemessen wird. Der Zeitpunkt des höchsten Schalldruckpegels ist nicht unbedingt äquivalent mit dem Zeitpunkt der größten Annäherung aus dem GPS-Signal, da sich die GPS-Antenne nicht über der dominierenden Schallquelle am Schiff befinden muss.

Es wird vorausgesetzt, dass die Schallausbreitung im Moment der größten Annäherung idealisiert durch eine halbkugelförmige Ausbreitung beschrieben werden kann. Der Schalleistungspegel kann dann mit

$$L_W = L_{p, max} + 8 \text{ dB} + 20 \log(s) \text{ dB} \quad (8)$$

berechnet werden, wobei  $L_{p, max}$  der maximale Vorbeifahrtspegel und  $s$  der Abstand zwischen Schallquelle und Mikrofon ist.

## Testmessungen und erste, vorläufige Ergebnisse

Für erste Testmessungen im Zeitraum 8.6.-28.7.2021 wurde die mobile Messeinrichtung auf der Rheininsel Niederwerth bei Koblenz aufgebaut (s. Abb. 2). Der Standort ist für eine spätere Datenerhebung zur Ermittlung der Schalleistungspegel der Rheinschiffe nicht optimal geeignet, da er gegenüber einer Hafenanlage und in der Nähe von Bäumen liegt, andererseits sind wenig Störgeräusche anderer Art (Verkehrslärm, Gespräche) zu erwarten. Daher wurde dieser Standort, auch wegen der räumlichen Nähe, der Verfügbarkeit von Netzspannung sowie Zugang zum Rhein, ausgewählt. Messungen mit Störgeräuschen



**Abbildung 2:** Standort der Testmessungen auf der Rheininsel Niederwerth bei Koblenz. Luftaufnahme: ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP (2021), dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>.

wurden nach manueller Sichtung der Daten verworfen, sodass ein Datensatz von 62 verwertbaren Messungen verblieb. Aus diesen Daten wurde, wie oben beschrieben, die Schalleistungspegel der vorbeifahrenden Schiffe sowohl über den Einzelereignispegel als auch mithilfe des maximalen Vorbeifahrtspegels bestimmt.

Die Arbeitshypothese ist, dass der Schalleistungspegel eines Schiffes hauptsächlich von der gefahrenen Geschwindigkeit im Wasser und seiner Größe abhängt. Die gefahrene Geschwindigkeit im Wasser wird über das AIS-System nicht übermittelt und muss mit Hilfe der Fließgeschwindigkeit berechnet werden. Die Fließgeschwindigkeit ist hauptsächlich abhängig vom Abfluss und dem Querprofil und daher räumlich und zeitlich nicht konstant. Da nicht ausreichend Messwerte der Fließgeschwindigkeit vorliegen, wird hier die modellierte 1D-Fließgeschwindigkeit  $v_f$  des SOBEK-Modells [4, 5], dass an der Bundesanstalt für Gewässerkunde vorliegt und eine zeitliche Auflösung von 1h und eine räumliche Auflösung von  $\sim 200$  m hat, herangezogen. Da es sich bei diesem Modell um ein über das gesamte Profil gemittelte 1D-Modell handelt, wird die Fließgeschwindigkeit  $v_{f,FR}$ , die in der Fahrrinne höher ist als in Ufernähe, mit  $v_{f,FR} = 1,2v_f$  (basierend auf dem logarithmischen Wandgesetz) abgeschätzt.

Die Abhängigkeit des Schalleistungspegels von der gefahrenen Geschwindigkeit im Wasser ist in Abb. 3 sowie Abb. 4 gezeigt, wobei die linke Abbildung die Herleitung des Schalldruckpegels aus dem Einzelereignispegel und die rechte Abbildung die Herleitung aus dem maximalen Vorbeifahrtspegel darstellt. Farblich codiert ist die Länge des Schiffes. Die Kreise zeigen Schiffe, die gegen die Strömung fahren (Bergfahrer), die Rechtecke stellen Schiffe, die mit der Strömung fahren (Talfahrer) dar. Wie erwartet ist erkennbar, dass Talfahrer mit einer niedrigeren Geschwindigkeit im Wasser fahren als Bergfahrer, obwohl sie über Grund durch die Strömung im Allgemeinen trotzdem schneller sind als Bergfahrer. Weiterhin ist eine leichte Abhängigkeit des Schalleistungspegels von der Geschwindigkeit im Wasser sichtbar. Dies muss aber noch mit einem größeren Datensatz bestätigt werden. Weiterhin ist keine direkte Abhängigkeit des Schalleistungspegels von der Schiffslänge sichtbar. Vergleicht

man die Ergebnisse beider Herleitungsansätze, so zeigt sich, dass die Werte aus den Einzelereignispegeln meist etwas niedriger liegen als die aus dem maximalen Vorbeifahrtspegeln. Die Tendenz zu höheren Schalleistungspegeln bei höheren Geschwindigkeiten zeigt sich aber bei beiden Herleitungsvarianten.

Eine weitere Arbeitshypothese ist, dass verschiedene Schiffstypen (Containerschiffe, Tankschiffe, Fahrgastschiffe, andere Typen) durch verschiedene Bauformen und Anforderungsprofile verschiedene Schalleistungspegel haben. Der Schalleistungspegel, sortiert nach Schiffstypen, ist in Abb. 5 und 6 gezeigt, wobei sich beide Abbildungen durch die Herleitung des Schalleistungspegels unterscheiden. Farblich codiert ist die Geschwindigkeit im Wasser. Innerhalb der Klassen ist tendenziell zu erkennen, dass Schiffe, die mit einer geringeren Geschwindigkeit im Wasser fahren, auch einen geringeren Schalleistungspegel aufweisen. Für verlässliche Aussagen zur Abhängigkeit des Schalleistungspegels vom Schiffstyp müssen aber innerhalb der einzelnen Typklassen mehr Daten vorliegen.

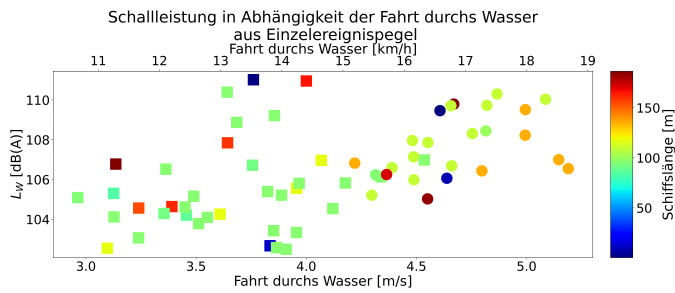
## Diskussion

Bei der Auswertung der Messungen hat sich gezeigt, dass die Gegebenheiten der Messstelle keine optimale Umgebung bietet. So sind zum einen Fremdgeräusche aus dem nahen Hafengebiet vorhanden, zum anderen schirmen die nahen Bäume den Schiffschall ab und verursachen bei Wind Störgeräusche. Daher muss für eine Langzeitmesskampagne ein geeigneter Standort gesucht werden.

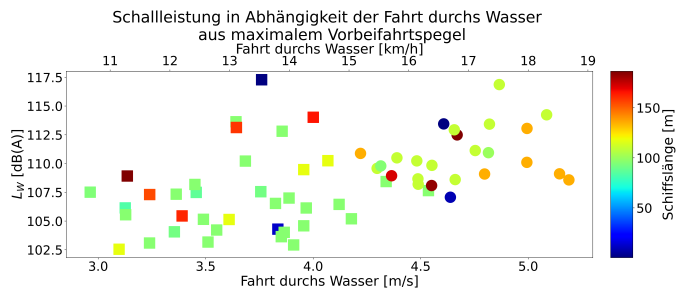
Weiterhin wird die Meteorologie zwar erfasst, fließt aber nur als Ausschlusskriterium in die Auswertung mit ein. Im zeitlichen Verlauf einiger Messungen weist der Schalldruckpegel eine Asymmetrie bezüglich des maximalen Vorbeifahrtspegels auf. Hier muss untersucht werden, ob dies auf die meteorologischen Bedingungen (Windrichtung und -stärke) zurückzuführen ist oder ob Schall zum Teil durch das Schiff selbst abgeschirmt wird.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Abstandbestimmung zwischen Mikrofon und Schiff. Die Positionsangaben des Schiffes beziehen sich auf die Standort der GPS-Antenne, der nicht notwendigerweise nahe der Hauptschallquelle sein muss. Weiterhin sind die Positionsangaben selbst mit einer Ungenauigkeit behaftet, die im Bereich einiger Meter liegen kann. Zudem stellt die Modellierung des Schiffes als Punktquelle eine Annahme dar, die sich aufgrund der Größe des Schiffes und mehrerer potentieller Schallquellen (Motor, Propeller, Welle, Wellen) gerade bei dichten Vorbeifahrten nicht immer rechtfertigen lässt.

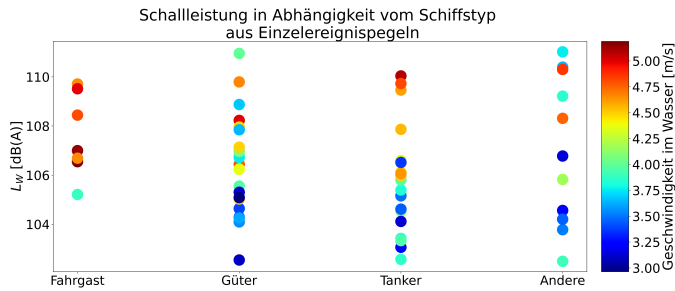
Die gewonnenen Daten konnten trotzdem dazu genutzt werden, weitere Algorithmen zur Analyse der berechneten Schalleistungspegel zu entwickeln. Beim Vergleich der beiden Herleitungsverfahren Einzelereignispegel und maximaler Vorbeifahrtspegel zeigen sich zum Teil Unterschiede in den berechneten Schalleistungspegeln. Beide Ansätze unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der Messdauer. Während beim maximalen Vorbeifahrtspegel lediglich ein Messwert berücksichtigt wird, werden beim Einzelereignispegel eine ganze Zeitreihe genutzt. Kurzzei-



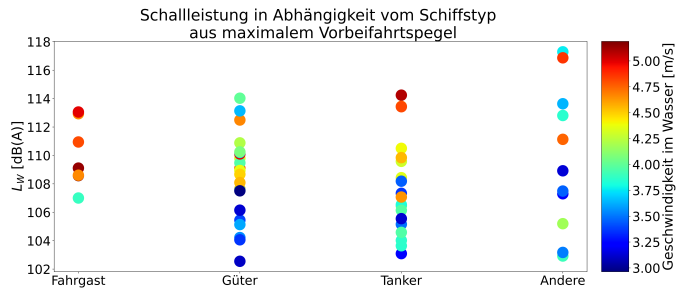
**Abbildung 3:** Schalleistungspegel hergeleitet aus Einzelergebnispegeln in Abhängigkeit der Geschwindigkeit im Wasser. Farblich dargestellt ist die Schiffslänge.



**Abbildung 4:** Schalleistungspegel hergeleitet aus den maximalen Vorbeifahrtspegeln in Abhängigkeit der Geschwindigkeit im Wasser. Farblich dargestellt ist die Schiffslänge.



**Abbildung 5:** Schalleistungspegel hergeleitet aus Einzelergebnispegeln und nach Schiffstyp kategorisiert. Farblich dargestellt ist die gefahrene Geschwindigkeit durchs Wasser. Kreise markieren Bergfahrer, Rechtecke Talfahrer.



**Abbildung 6:** Schalleistungspegel hergeleitet aus maximalen Vorbeifahrtspegeln und nach Schiffstyp kategorisiert. Farblich dargestellt ist die gefahrene Geschwindigkeit durchs Wasser. Kreise markieren Bergfahrer, Rechtecke Talfahrer.

tige Messungenauigkeiten haben daher beim maximalen Vorbeifahrtspegel eine größere Auswirkung als beim Einzelergebnispegel.

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit der hier gezeigten automatisierten Mess- und Auswertemethodik soll in Zukunft eine verbesserte, repräsentative Modellierung der Lärmbelastung an Wasserstraßen erfolgen können. Dazu wurde eine mobile Messeinrichtung entwickelt, die automatisiert den Schalldruckpegel vorbeifahrender Schiffe sowie meteorologische Parameter und Informationen über das Schiff erfasst und abspeichert. Diese Messeinrichtung wurde zu Testzwecken am Rhein bei Koblenz aufgebaut und über einen Zeitraum von etwa 1,5 Monaten betrieben. Obwohl der Standort aufgrund der örtlichen Gegebenheiten, insbesondere Störgeräusche, bedingt geeignet ist, konnten Messdaten zu Zeiten erhoben, in denen wenig Fremdgeräusche präsent waren. Diese Daten wurden hinsichtlich des Schalleistungspegels ausgewertet, wobei zwei Ansätze (Einzelergebnispegel und maximaler Vorbeifahrtspegel) verfolgt wurden. Die ermittelten Schalleistungspegel wurden dann mit weiteren Schiffsparametern und der Fließgeschwindigkeit verknüpft. Dabei zeigt sich in den Testdaten eine leichte Abhängigkeit des Schalleistungspegels von der gefahrenen Geschwindigkeit im Wasser. Weitere Abhängigkeiten, z. B. vom Beladungsgrad oder der Wassertiefe, sollen noch untersucht werden.

Durch die automatisierte Messung ist es nun möglich, umfangreiche Datensätze von Schiffsvorbeifahrten zu gewinnen. Ein geeigneter Standort wurde bereits bei

Emmerich am Rhein gefunden. Um den Aufwand bei der Auswertung von Langzeitmesskampagnen gering zu halten, soll in Zukunft auch eine automatisierte Erkennung von Fremdgeräuschen entwickelt werden.

## Literatur

- [1] DIN 45641. DIN 45641:1990-06 Mittelung von Schalleistungspegeln, 1990.
- [2] DIN 45642. DIN 45642:2004-06 Messung von Verkehrsgeräuschen, 2004.
- [3] BfG. Anleitung zur Berechnung der Luftschalldausbreitung an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2000.
- [4] HKV Hydrokontor. Erstellung eines SOBEK-River Modells für den Rhein von Iffezheim bis Pannderdsche Kop als Weiterentwicklung bestehender SOBEK-RE Modelle. *Projektbericht PR2278.10*, Juni 2014.
- [5] HKV Hydrokontor. Update des SOBEK-River Modells für den Rhein von Iffezheim bis Pannderdsche Kop und Erweiterung an Main und Mosel. *Projektbericht PR2858.10*, November 2014.
- [6] S. Sommer. Inbetriebnahme einer Schalleistungsmessbox für automatisiertes Erfassen von Schiffsschalleistungspegeln. Meilensteinbericht, doi:10.5675/expnbmvi2021.2021.01, 2021.