

# Empirische Modellierung zur Prädiktion von Hydroschallimmissionen bei Impulsrammung von Fundamentstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen

Siegfried Gündert<sup>a,b</sup>, Steven van de Par<sup>b</sup>, Michael Bellmann<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Itap GmbH, Institut für technische und Angewandte Physik

<sup>b</sup> Institut für Physik Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

## Einleitung

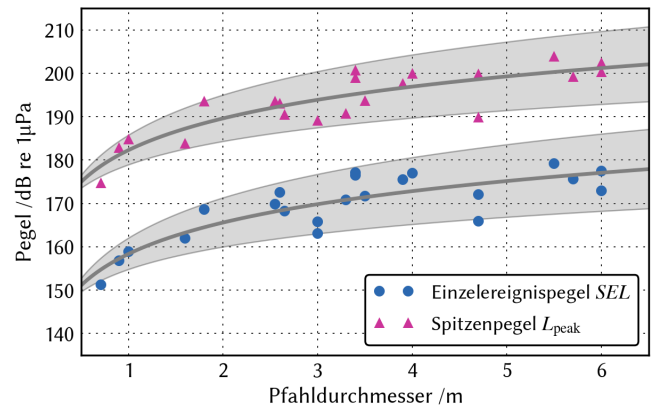
Bei der Rammung von Fundamentstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen können die verursachten Hydroschallimmissionen für die Meeresfauna störende bis lebensbedrohliche Auswirkungen haben. Angemessene Schallminderungsmaßnahmen sind von Prognosen der zu erwartenden Schallimmissionen abhängig und als Teilanforderungen des Genehmigungsverfahrens für Offshore-Windparks (OWPs) notwendig [1].

Ziele sind die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Einzelereignispegel (SEL oder  $L_E$ ) und Einflussvariablen sowie die Entwicklung eines praxistauglichen Modells mit geringer Komplexität. Als Vorhersagegröße wird der Einzelereignispegel in einer Entfernung von 750 m zur Rammbaustelle, zwei Meter über Meeresgrund gewählt, da nach Maßgabe des Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) an dieser Position die Lärmschutzwerte von 160 dB (SEL) Einzelereignispegel und 190 dB (Peak) Spitzenpegel einzuhalten sind.

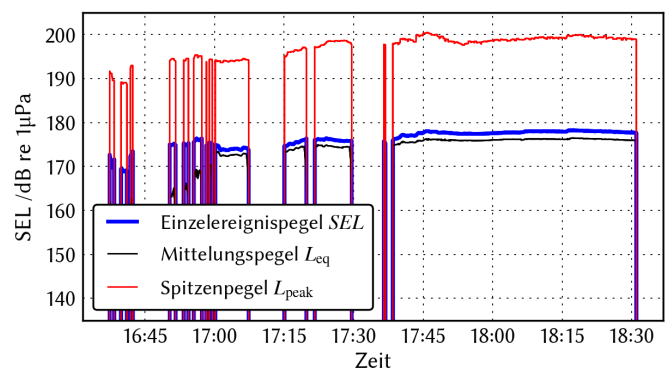
Für Prognosegutachten kommt derzeit ein Modell der Firma Itap GmbH zum Einsatz, das auf Messdaten 22 unterschiedlicher OWPs basiert und den Pfahldurchmesser als Einflussgröße besitzt. Durch Zuschläge für standortspezifische Randbedingungen können bereits Vorhersagen mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 5$  dB erreicht werden. Die Eingangsdaten und das Modell sind in Abbildung 1 dargestellt. Die recht hohe Varianz der Daten deutet auf mögliche versteckte Variablen hin. Mit der Erweiterung und Optimierung des Modells durch Einbeziehung weiterer einflussreicher Variablen soll die Genauigkeit von Vorhersagen verbessert werden.

## Beurteilungsgrößen und Einflussvariablen

In Abbildung 2 sind die Beurteilungsgrößen der Rammung eines Monopiles über der Zeit dargestellt. Da diese Größen für gleichbleibende Messentfernungen hoch korreliert sind, können Modelle auf die Vorhersage des Einzelereignispegels vereinfacht werden. Die Verteilung des Einzelereignispegels ist abhängig von zeitvarianten und konstanten Einflussvariablen. Rammenergie und Eindringtiefe stellen beispielsweise zeitvariante Variablen dar. Pfahldurchmesser und Wassertiefe bleiben während der Rammung meist konstant. Je nach Rammverfahren kann die schallabstrahlende Fläche zeitvariant sein (z.B. bei Tripods). Zur Vereinfachung werden in einem ersten Schritt schallabstrahlende Fläche, Pfahldurchmesser, Wassertiefe und Entfernung als konstant angenommen. Nicht betrachtet werden Bodenprofil, Bathymetrie, Hammertyp/Aufbau der Ramme, Strömung und alle weiteren nicht erwähnten Größen.



**Abbildung 1:** Gemessener Einzelereignispegel (SEL) und Spitzenpegel ( $L_{peak}$ ) über dem Pfahldurchmesser (Punkte und Dreiecke). Als durchgezogene graue Linien sind die logarithmischen Regressionsfunktionen der beiden Beurteilungsgrößen dargestellt (kleinste Quadrate-Schätzer). Die grau hinterlegten Flächen kennzeichnen die 95% Konfidenzintervalle des Modells.

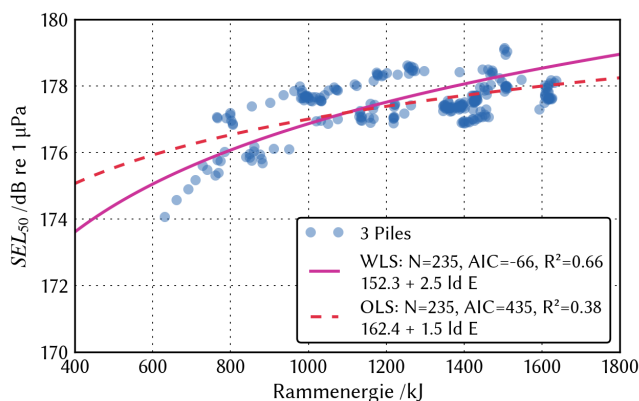


**Abbildung 2:** Dargestellt sind die Beurteilungsgrößen Einzelereignispegel (SEL), Mittelungspegel ( $L_{eq}$ ) und Spitzenpegel ( $L_{peak}$ ) der Rammung eines Monopiles über der Zeit.

Neben der bereits in der Einleitung betrachteten Abhängigkeit des Einzelereignispegels vom Pfahldurchmesser ist die Abhängigkeit von der Rammenergie (Abbildung 3) ebenso logarithmisch. Bei Verdopplung der Rammenergie steigt der Einzelereignispegel um etwa zwei bis drei Dezibel an. Für die Daten in Abbildung 1 ist jedoch zu beachten, dass die Rammenergie mit dem Pfahldurchmesser höchstwahrscheinlich ansteigt. Die Rammenergie ist in diesem Datensatz nicht exakt bekannt und kann außerdem wegen der geringen Stichprobengröße nicht mit einbezogen werden.

## Eingangsdaten und Modelle

Im Zuge der Effizienzkontrolle von Schallminderungssystemen konnten in den letzten zwei Jahren große Datenmengen mit Referenzmessungen ohne Schallminderungsmaßnahmen



**Abbildung 3:** Median der nach Rammenergie gruppierten Einzelereignispegel über der eingesetzten Rammenergie (aus Rammprotokoll). Die durchgezogene Linie stellt eine abhängig von der Datendichte gewichtete Regressionsfunktion dar (WLS). Zum Vergleich ist die nach Methode der kleinsten Quadrate (OLS) geschätzte Regressionsfunktion dargestellt.

und zugehörige Rammprotokolle akkumuliert werden [2]. Dies ermöglichte die Erstellung einer Datenbasis von über 25.000 statistischen Einheiten (Einzelereignisse mit allen erhältlichen Einflussvariablen). Dennoch ist die Varianz der Pfahldurchmesser und Wassertiefen bisher zu gering, sodass ein gestaffeltes Modell als Ansatz gewählt wird. Die Abhängigkeit des Pfahldurchmessers wird durch das bestehende Modell der itap (Abbildung 1) unterstützt, das nunmehr als Vormodell verwendet werden kann. Die Residuen des Vormodells werden in einem weiteren multiplen linearen Regressionsmodell zur Verbesserung der erklärten Varianz verwendet. In der folgenden Liste sind vier von insgesamt über acht evaluierten Modellvarianten beschrieben:

Bezeichnung	Modell
M1	$SEL \sim \ln(RE)$
M1pr	$SEL_{resid} \sim \ln(RE)$
M2pr	$SEL_{resid} \sim \ln(RE) + ET$
M3	$SEL \sim \ln(RE) + \ln(S) + ET$

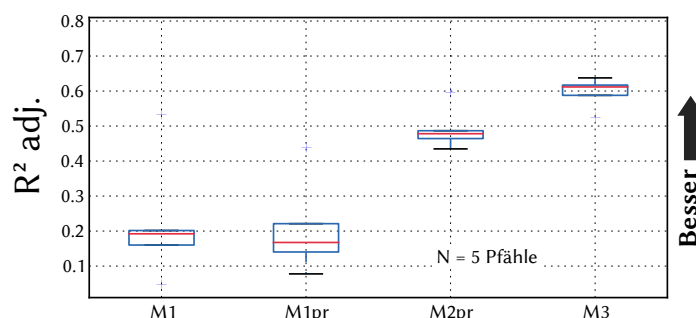
Mit der Rammenergie  $RE$ , der Eindringtiefe  $ET$  und der Pfahlhüllfläche  $S$ . Modellbezeichnungen mit "MXpr" stehen für den Einsatz des Vormodells. Die übrigen Modelle unterstützen bisher ausschließlich große Pfahldurchmesser.

## Kreuzvalidierung

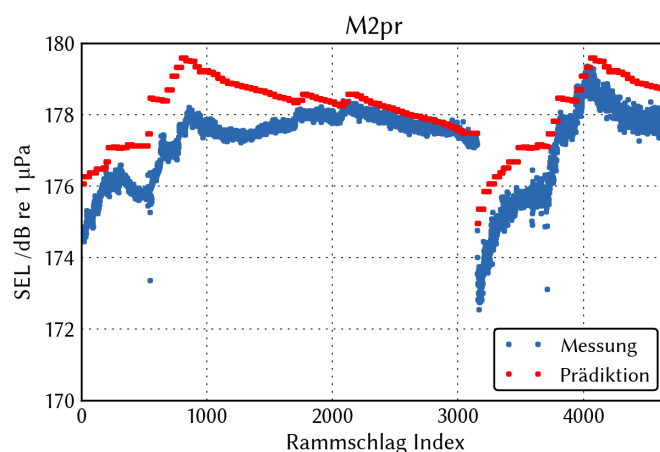
Eine pfehlweise Kreuzvalidierung über fünf Pfehle ergibt die in Abbildung 4 dargestellten Verteilungen des Bestimmtheitsmaßes ( $R^2$ ) für die vorgestellten Modellvarianten. Das Akaike Information Criterion (AIC) verhält sich entgegengesetzt zum  $R^2$ , sodass zunächst Modell M2pr gewählt werden kann. Nach Erweiterung des Datensatzes besteht die Möglichkeit Modellvariante M3 zu wählen.

## Ergebnisse

Als Beispiel ist die Vorhersage eines Testdatensatzes, der für das gelernte Modell unbekannt ist, in Abbildung 5 dargestellt. Das Modell weist in diesem Fall eine Tendenz zur Überschätzung auf. Die Abweichungen liegen unter zwei Dezibel. Die Residuen aus der Kreuzvalidierung liegen ebenfalls im Bereich von  $\pm 2$  dB.



**Abbildung 4:** Boxplot der korrigierten Bestimmtheitsmaße vier unterschiedlicher Modelle einer pfehlweisen Kreuzvalidierung mit  $N = 5$  Pfehlen.



**Abbildung 5:** Beispiel für die Prädiktion des Einzelereignispegels einer Rammung mit Modell M2pr.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein neuer Ansatz mit existierendem Modell als Vorstufe wurde zur Vorhersage von Hydroschallimmissionen entwickelt. Die Analyse der Messdaten ergab für den Einfluss der Rammenergie, dass eine Verdopplung zu einem Anstieg des Einzelereignispegels von  $SEL \leq +3$  dB führt. Die Modelloptimierung bewirkt eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von etwa  $\pm 5$  dB (SEL) auf  $\pm 2$  dB (SEL). Für die Zukunft wird eine kontinuierliche Erweiterung des Datensatzes angestrebt, insbesondere um die Varianz für den Pfahldurchmesser zu erhöhen. Nach Möglichkeit soll eine variable abstrahlende Fläche während der Rammung (z. B. Tripod Fundament) unterstützt werden. Die spektrale Vorhersage lässt sich durch Verwendung von Modellspektren und deren Anpassung an den prognostizierten Einzahlwert anhand eines Optimierungsverfahrens realisieren. Für Prognosen kann die Abschätzung der eingesetzten Rammenergien z. B. aus einer vorangegangenen Rammbarkeitsstudie erfolgen.

## Literatur

- [1] Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Oktober 2013
- [2] Diverse Messberichte von OWP-Baustellen der itap GmbH (nicht öffentlich)