



LOLA

LOLA

Lärmoptimierte Logistik im Binnenhafen

Schlussbericht

Müller-BBM Industry Solutions GmbH

23.12.2025

Autor: Oliver Heuss



LOLA

Lärmoptimierte Logistik im Binnenhafen

Müller-BBM Industry Solutions GmbH

Helmut-A.-Müller Str.1-5

82152 Planegg / München

Förderkennzeichen: 19H21007C



Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Projektvoraussetzungen (Stand 2022)	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2.1 Projektergebnisse.....	10
2.1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse.....	10
2.1.2 Arbeitspaket 2: Konzeptionierung der Anwendungsdemonstratoren	12
2.1.3 Arbeitspaket 3: Umsetzung der Anwendungsdemonstratoren.....	19
2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung logistischer Handlungsempfehlungen	20
2.1.5 Arbeitspaket 5: Evaluation der Anwendungsdemonstratoren	20
2.1.6 Arbeitspaket 6: Übertragbarkeit der Ergebnisse.....	21
2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	22
2.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit	22
2.4 Nutzen der Arbeiten und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	22
2.4.1 Kosten-Nutzen-Analyse.....	23
2.4.2 Nutzen für die deutsche Hafenwirtschaft	23
2.4.3 Nutzen für Umwelt und Allgemeinheit.....	23
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet	24
2.6 Veröffentlichungen.....	24

Abbildungsverzeichnis

Abb. 01.	Abbildung 1: Arbeitsplan LOLA.....	5
Abb. 02.	Abbildung 2: Arbeitsplan.....	6
Abb. 03.	Abbildung 3: Messergebnisse zur Schalleistungsbestimmung aus Schalldruckpegelmessungen am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.....	11
Abb. 04.	Abbildung 4: Messergebnisse der akustischen Kamera am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.	11
Abb. 05.	Abbildung 5. Datenanalysen zur Charakterisierung der akustischen Quelle am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.	12
Abb. 06.	Abbildung 6. Versuchsaufbau zur Messung der akustischen Eigenschaften einer Platte mit VAMM bei Luftschallanregung.	14
Abb. 07.	Abbildung 7. Ergebnisse der Schallintensitätsmessungen zur Bestimmung des Schalldämmmaßes mit und ohne VAMM.....	14
Abb. 08.	Abbildung 8. SEA-Modellierung der ebenen Platte mit VAMM (links: Empfänger und Senderaum mit Platte, rechts: Einheitszelle der Platte).....	15
Abb. 09.	Abbildung 9. Berechnetes Schalldämmmaß mit VAMM (grau), ohne VAMM (gelb) verglichen mit experimentellen Ergebnissen mit VAMM (orange) und ohne VAMM (blau).....	15
Abb. 10.	Abbildung 10. Teilmodell des Silos mit VAMM-Barriere und Anregungskraft innerhalb der Barriere.	16
Abb. 11.	Abbildung 11. Wellenzahldiagramm einer VAMM Einheitszelle mit zwei verschiedenen Resonanzmassen.....	17
Abb. 12.	Abbildung 12. Vereinfachtes SEA-Modell des Silos mit Unwuchtanregung in der Mitte und zwei Schichten VAMM sowie einer Empfängerplatte außen.	17
Abb. 13.	Abbildung 13. FE-Modell einer einfachen Plattenstruktur mit 3 Reihen Resonatoren als VAMM (links) und Energieverteilung der Komponenten (rechts).	18
Abb. 14.	Abbildung 15. Berechnete Schallabstrahlung am Silo in der 2. Ordnung des Unwuchterregers mit und ohne VAMM.	19

1 Projektzusammenfassung

1.1 Aufgabenstellung

Lärm rückt aktuell als eine Ausprägung von „Umweltverschmutzung“ mit potenziell schwerwiegenden Folgen auf die Gesundheit des Menschen gesellschaftlich und wissenschaftlich immer mehr in den Fokus. „Hohe Lärmbelastungen verursachen nicht nur Störungen und Belästigungen, sie können auch zu relevanten Gesundheitsrisiken, vor allem für das Herz-Kreislauf-System, führen.“ . Lange schon ist bekannt, dass Lärm nicht nur Gehörschäden verursacht, sondern eine allgemeine Gefährdung für die physische und psychische Gesundheit und das Befinden der Menschen bedeutet. Die WHO beziffert in einer Studie die in Westeuropa jährlich durch Lärm verlorene Lebenszeit auf mindestens eine Million Lebensjahre. Die im Rahmen des BMBF-Foresight Zyklus II betrachteten gesellschaftlichen Veränderungen bis 2030 führen Beeinträchtigungen durch Lärm als eines der 60 ermittelten Trendprofile auf. Insbesondere der Industrielärm weist einem Bericht im Rahmen des BMBF-Foresight Zyklus II zufolge einen großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf, diesen durch innovative Lösungen zu reduzieren.

Die entstehende Problematik ist gerade auch im Bereich der Binnenhäfen sichtbar. Durch die urbane Lage vieler Binnenhäfen liegen Industrie- und Wohngebiete sehr nah beieinander, wodurch immer öfter Nutzungskonflikte entstehen. Binnenhäfen gelten als wichtige Umschlagstandorte für Industrie und Gewerbe und sind daher essenziell für die CO₂ freundlichere Versorgung der Bevölkerung sowie der Wirtschaft. Durch steigende Transport- und Umschlagmengen rückt das Thema „Geräuschemissionen“ weiter in den Vordergrund. Als besonders laute Prozesse im Hafen werden der Umschlag von Gütern und der Transport dieser vom und zum Hafen angesehen, wodurch der Einsatz von lärmvermindernden Maßnahmen im Binnenhafen immer wichtiger wird. Das Forschungsprojekt „LOLA“ setzt an diesem Punkt an. Im Rahmen des Projekts sollen lärm mindernde Maßnahmen im Hafen getestet und ihre Auswirkungen auf den Hafenbetrieb analysiert werden. Im Rahmen des Projekts werden fünf Use Cases mit unterschiedlichem Fokus auf Lärmprobleme im Hafen umgesetzt. Die Use Cases sind in den Bereichen Schüttgutverladung, Containerumschlag sowie Schrotturnschlag verortet und decken somit eine große Breite von Hafenprozessen ab. Für die Entwicklung der Lärm minderungsmaßnahmen werden die logistischen Prozesse aufgenommen und für die identifizierten Lärmquellen Maßnahmen entwickelt. Dies geschieht in einem ersten Schritt auf konzeptueller Ebene, im Projektverlauf werden für jeden Use Case auch Maßnahmen vor Ort umgesetzt und ihre lärm mindernde Wirkung evaluiert. Im Rahmen des Projekts wird zudem ein Tool erarbeitet, mit dem Lärm minderungsmaßnahmen mit verschiedenen logistischen Prozessen im Hafen übereinandergelegt werden können. Hierzu ist ein Konsortium bestehend aus Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und Häfen zusammengestellt worden.

Müller-BBM ist eines der führenden deutschen Akustikberatungsbüros, das seine starke Position am Markt nicht zuletzt durch seine Beteiligungen in Forschungsprojekten und Kooperationen mit akademischen Einrichtungen behauptet. Als Beratungsbüro hat Müller-BBM stets hohes Interesse die Entwicklung innovativer und aussichtsreicher Methoden im Bereich der Akustik und Schwingungstechnik zu verfolgen und deren Weiterentwicklung und Etablierung mitzugestalten. Gleichzeitig sieht sich Müller-BBM stets in der Pflicht gesellschaftliche Verantwortung zu übernehmen und beteiligt sich bspw. an einer Vielzahl von Normengremien, um das erlangte akustische Know-how gesellschaftlich sinnvoll zu verwerten. Die im Projekt verfolgten Ansätze sind als innovativ zu bewerten, da sie zum Großteil noch nicht als auf dem Markt erhältliche Lösungen gelten. Somit möchte Müller-BBM im Projektverlauf das vorhandene allgemeine akustische und das hafenspezifische Wissen einbringen und erweitern. Weiterhin sollen die Erkenntnisse über die verfolgten Innovationen in die allgemeine Beratung einfließen, so dass die Etablierungschancen der Methoden erhöht werden.

1.2 Projektvoraussetzungen (Stand 2022)

Die Projektvoraussetzungen für LOLA sind ausführlich in Kapitel 1 des Gesamtberichts (einsehbar bei der TIB) beschrieben.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt LOLA ist über drei Jahre (03/2022-02/2025) durchgeführt worden. Bedingt durch Verzögerungen in den Use Cases durch Wett ereignisse, wurde das Projekt um vier Monate bis Ende Juni 2025 verlängert

Arbeitspaket	2022				2023				2024				2025	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
AP 1: Anforderungsanalyse					1									
AP 2: Konzeption der Anwendungsdemonstratoren							2							
AP 3: Umsetzung der Anwendungsdemonstratoren														3
AP 4: Entwicklung logistischer Handlungsempfehlungen														
AP 5: Evaluation der Anwendungsdemonstratoren														4
AP 6: Übertragbarkeit der Ergebnisse														5
AP7: Projektmanagement														


 Meilensteine

Abbildung 1: Arbeitsplan LOLA

Innerhalb des Projekts wurden 7 Arbeitspakete bearbeitet, welche in der folgenden Graphik dargestellt sind:

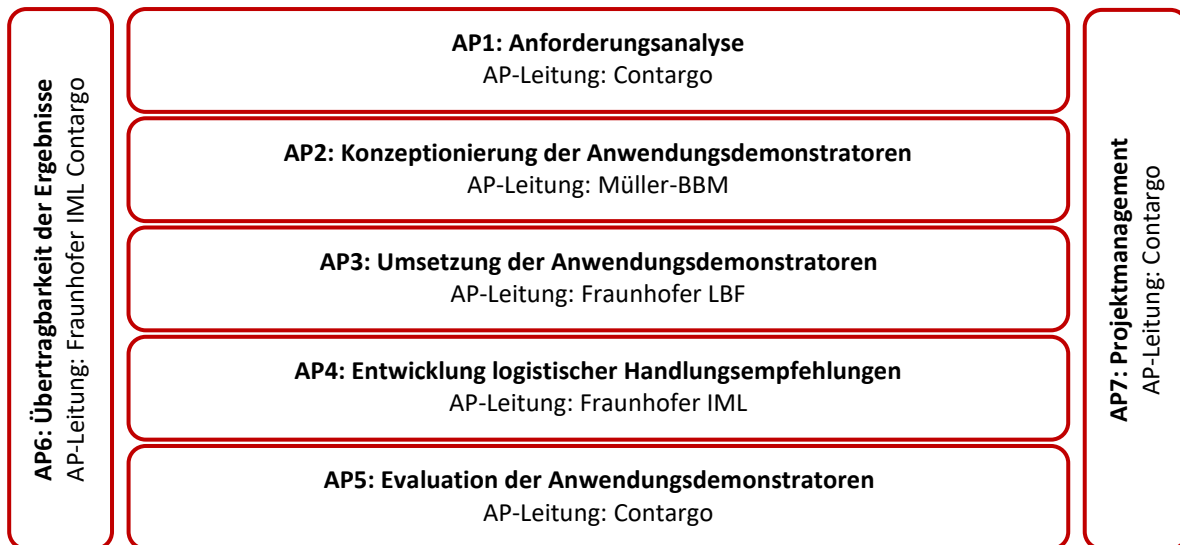


Abbildung 2: Arbeitsplan

Müller-BBM übernahm im Projekt die Leitung über die Folgenden (Teil-)Arbeitspakete:

AP1.3: Messtechnische Untersuchung / Emissionsfeststellung

Der Fokus des AP lag auf der messtechnischen Ist-Zustandserfassung der akustischen Herausforderungen der use-cases sowie der Identifikation von im Projekt realistisch handhabbaren akustischen Quellen. Zusammen mit dem Unterauftragnehmer IBAS erfolgte eine Emissionsfeststellung und Charakterisierung der Lärmprobleme bei den beteiligten Häfen. Die weiteren Projektpartner unterstützten die Tätigkeiten.

AP2: Konzeptionierung der Anwendungsdemonstratoren

Das Fraunhofer LBF ist besonders geübt in der Konzeptionierung von Anwendungsdemonstratoren. Die Rolle von Müller-BBM in AP2 bestand maßgeblich darin, die geeigneten Methoden für die use-cases mit den Partnern zu diskutieren und auszuwählen. Dabei brachte Müller-BBM seine Kompetenzen im Bereich der akustischen Beratung, Berechnungsverfahren sowie Vorwissen aus zahlreichen experimentellen Untersuchungen mit ein. Somit konnten gemeinschaftlich aussichtsreiche Konzepte identifiziert und Anwendungsdemonstratoren abgeleitet werden.

AP2.1: Konzeptentwicklung (Müller-BBM)

Entsprechend der Vorhabensbeschreibung erfolgte die Koordination und Beteiligung an der

- Erarbeitung von mindestens drei Lösungskonzepten je Use Case zusammen mit dem Fraunhofer LBF,
- Einbringung der Erfahrung in der Lösung von Lärmproblemen in der Industrie,

- Bewertung der Konzepte basierend auf der Erfahrung in der Beratung von Industriekunden auch im Kontext von Häfen.

AP2.3: Konzeptauswahl je Use Case (Müller-BBM)

Entsprechend der Vorhabensbeschreibung erfolgte die Koordination und Beteiligung an der

- Gemeinschaftlichen Auswahl eines Konzepts je Use Case zusammen mit den beteiligten Partnern,
- Bewertung der Lösungskonzepte hinsichtlich praktischer Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit auf andere in der Industrie existierende Lärmprobleme.

AP3.3: Konzepttest unter Realbedingungen (Müller-BBM)

Müller-BBM führte zusammen mit dem Unterauftragnehmer IBAS akustische und schwingungstechnische Messungen an den Demonstratoren unter Realbedingungen durch. Teilweise (use-case 4) wurden die Messungen nach vorangegangener Abstimmung vom Fraunhofer LBF selbständig durchgeführt.

AP5.1: Akustische Bewertung der Demonstrationsergebnisse (Müller-BBM)

Müller-BBM analysierte die Messergebnisse zu den einzelnen use-cases und führte jeweils eine Bewertung durch.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Die Reduktion von störendem Lärm ist ein viel untersuchtes Thema und wird branchenabhängig unterschiedlich stark betrachtet. Besonders bei mobilen Anwendungen stehen Leichtbauansätze häufig im Gegensatz zur Geräuschentwicklung. Eine Lärminderung kann durch passive, semi-aktive oder aktive Maßnahmen erfolgen, die entweder den Luftschall beeinflussen oder den Körperschall an der Schallquelle reduzieren. Meist ist die Umsetzung der Maßnahme möglichst nahe der Schallquelle am effektivsten. Werden weniger Schwingungen erzeugt, entsteht daraus auch meist weniger Lärm. In den letzten Jahren wurden neue Methoden der Lärm- und Schwingungsminderung entwickelt. In Kopfhörern werden Verfahren für das Active Noise Control (ANC) eingesetzt, die Störgeräusche reduzieren. ANC hat sich aber längst noch nicht in allen potenziellen Anwendungen etabliert. Vibroakustische Metamaterialien haben ebenfalls großes Potential und können bisherige Zielkonflikte bei der Lärminderung lösen. Erste Anwendungen mit vibroakustischen Metamaterialien werden zeitnah erwartet.

Passive Maßnahmen zur Schwingungs- und Lärmreduktion basieren auf der Idee die Eigenschaften eines Bauteils oder eines Systems so zu optimieren, dass die Auswirkungen der Schwingungen möglichst minimal sind. Hierrunter fallen beispielsweise die gezielte Anpassung der Steifigkeit oder der Masse von Strukturen, der (nachträgliche) Einsatz von Dämm- (Reduktion von Abstrahlung durch

Erhöhung der Masse) oder Absorptionsmaterialien und -systemen (Reduktion von Luftschall durch Dissipation) und die Verwendung von Zusatzsystemen wie elastischen Lagerungen, Schwingungstilgern und -dämpfern¹, sowie Resonatoren. Semi-aktive Maßnahmen passen sich an verschiedene Betriebszustände und -situationen an. Verändern sich bspw. Zuladungen, Auskraglängen und Drehzahlen, so geht damit eine Verschiebung der strukturdynamischen Eigenschaften (Eigenfrequenzen und Schwingungsmoden) und somit auch eine Veränderung der akustischen Eigenschaften einher. Semi-aktive Maßnahmen zur Schwingungs- und Lärmreduktion passen sich diesen Veränderungen an². Die Grundlage hierfür bilden Technologien, welche es ermöglichen ihre Steifigkeit, Dämpfung oder Masse zu verstellen. Das Fraunhofer LBF hat in den letzten Jahren, im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, eine Vielzahl solcher Technologien entwickelt³ und die Funktion prototypisch für verschiedene Anwendungen, zusammen mit Industriepartnern, nachgewiesen⁴.

NVH in Automobilbranche: In der Automobilbranche hat das NVH (Noise, Vibration, Harshness) - Verhalten von Fahrzeugen in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Nicht zuletzt durch den Einsatz von Leichtbaukonzepten treten vermehrt NVH-Probleme auf, welche mit Hilfe verschiedenster passiver, semi-aktiver und aktiver Maßnahmen gelöst werden müssen⁵. Zum Einsatz kommen unter anderem elastische Motorlager zur Schwingungsisolierung, Elastomerelemente und hydraulische Dämpfer zur Erhöhung der Dämpfung und einzelne Tilger zur Schwingungstilgung⁶. Zur Minderung der Schalleinwirkung auf die Fahrzeuginsassen werden darüber hinaus auch alternative aktive Maßnahmen, wie die direkte Beeinflussung des Schallfeldes durch Lautsprecher (Active Noise Control) eingesetzt. Um einen zielgerichteten Einsatz der verschiedenen Maßnahmen zu gewährleisten, wird versucht, diese bereits in frühen Entwicklungsphasen einzubinden. Zudem sind nachgelagerte Maßnahmen in der Regel kosten- und zeitintensiv. Durch den Einsatz numerischer Methoden können verschiedene oder unterschiedlich ausgeführte NVH-Maßnahmen am gleichen System gegenübergestellt werden. Auf diesem Wege werden aus einer Vielzahl möglicher Systemmodifikationen diejenigen mit den besten NVH-Eigenschaften herausgearbeitet. Solche

¹ Rieß, S.; Hansmann, J.; Kaal, W.; Herold, S. (2019): Hochdynamische Charakterisierung von hydraulischen Schwingungsdämpfern. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift. Nr. 3.

² Rieß, S.; Kaal, W.; Herath, K., Frequency-Adaptable Tuned Mass Damper Using Metal Cushions, *Vibration* 2021, 4, 77–90.
<https://doi.org/10.3390/vibration4010007>

³ Exemplarisch: Hansmann, J.; Kaal, W.; Seipel, B.; Kraus, R.; Melz, T. (2011): Device for transmitting or decoupling mechanical vibrations, Patent Nr.: EP2694836B1 und Hansmann, J.; Wolter, S.; Kaal, W.; Seipel, B.; Herold, S.: Device and method for influencing a dynamic property of at least one movably mounted body and use thereof as a variably adjustable damping element, Patent. Nr. US10663029B2

⁴ Hansmann, J.; Millitzer, J.; Rieß, S.; Balzer, L. (2020): Symbiose virtueller und experimenteller Methoden für effizienteres Testen und Entwickeln. In: Experten-Forum Powertrain: Simulation und Test 2019. Deutschland: Wiesbaden, Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-28706-1

⁵ Zeller, P.: „Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch“, Vieweg+Teubner (GWV), Hrsg. Zeller, Peter, ISBN 978-3-834-806-512, 2009.

⁶ TrelleborgVibracoustic: „Schwingungstechnik im Automobil“, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2015.

umfangreichen numerischen Studien helfen in der Automobilbranche die Anzahl der erforderlichen Prototypstufen zu reduzieren und die Entwicklungszeit zu verkürzen^{7,8}.

Methoden: Die eingesetzten numerischen Methoden unterscheiden sich je nach Frequenzbereich und Modellgebiet. Bei tiefen und mittleren Frequenzen werden Diskretisierungsmethoden in der Akustik verwendet⁹. Diese unterteilen das zu untersuchende akustische Gebiet in eine endliche Zahl diskreter Elemente. Bei räumlich begrenzten Gebieten ermöglichen Finite-Elemente-Methoden (FEM) eine detaillierte Modellierung der akustischen Phänomene¹⁰. Die Boundary-Elemente-Methode (BEM) reduziert komplexe 3D-Geometrien auf 2D-Oberflächenmodelle und ermöglicht somit eine effektive Berechnung der Schallausbreitung auf große Entfernungen¹¹. Für Analysen großer komplexer Systeme und in höheren Frequenzbereichen wird auf statistische Methoden, wie die Statistical Energy Analysis (SEA) zurückgegriffen¹². Ein SEA-Modell entsteht durch die Verbindung einer Vielzahl gekoppelter Subsysteme, die die Einleitung, Speicherung, Übertragung und Dissipation der Energie innerhalb jedes Subsystems beschreiben. So wird die Berechnung der Übertragung von Schall und Schwingungen durch komplexe Strukturen und das umgebende Fluid unter Einbindung statischer Elemente ermöglicht. Experimentelle Methoden, wie die experimentelle Modalanalyse und die Transferpfadanalyse, liefern wichtige Erkenntnisse in der Entwicklung von NVH-Maßnahmen in Fahrzeugen. Aufgrund des damit verbundenen hohen Aufwands wird jedoch versucht die experimentellen Untersuchungen an Prototypenstufen zu minimieren.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde während der Laufzeit in Kundengesprächen sowie internen Veranstaltungen innerhalb der Müller-BBM Gruppe vorgestellt. Der Unterauftragnehmer IBAS stellte die Projektaktivitäten und -ergebnisse anderen Häfen vor, so dass entweder Folgeprojekte oder gemeinsame Forschungsanträge geplant sind. Das Fraunhofer LBF hielt zudem einen Fachvortrag im Rahmen einer Fachkolloquienreihe bei Müller-BBM. Weiterhin gab es einen fachlichen Austausch mit dem IHATEC Projekt LaRoRo, welches eine Schnittmenge hinsichtlich von Lärminderung bei Häfen aufwies.

⁷ Digital Transformation of Industries – Automotive Industry, World Economic Forum, 2016

⁸ Digital Twin in the Automotive Industry: Driving Physical-Digital Convergence, Munish Sharma, Joe Paul George, 2018, Tata Consultancy Services

⁹ Müller, G.: “Numerische Methoden der Technischen Akustik” Springer Berlin Heidelberg, 2017

¹⁰ Ebd.

¹¹ Wang, X.: “Vehicle Noise and Vibration Refinement” Woodhead Publishing Limited, 2010.

¹² 2019: Testing and Simulation of Mid-High Frequency Acoustics in Vehicle Applying Statistical Energy Analysis Method <https://ieeexplore.ieee.org/document/9019328>

2 Verwendung der Zuwendung

2.1 Projektergebnisse der Arbeitspakete

Wie in Kapitel 1 dargestellt, wurden im Projekt 7 Arbeitspakete bearbeitet. Ein Großteil der Arbeiten wurden gemeinsam im Projektkonsortium (Contargo, Fraunhofer LBF, Fraunhofer IML, c-port, Hafen Andernach, Theo Steil GmbH, Mindener Hafen) durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Projektergebnisse findet sich im Gesamtabschlussbericht des Projekts LOLA (abrufbar bei der TIB). In diesem Kapitel werden nur die Ergebnisse aufgeführt, an denen Müller-BBM maßgeblich beteiligt war. Die Beteiligung von Müller-BBM an den jeweiligen Projektzielen wird im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse

Für alle Use Cases erfolgten die Arbeiten zur Prozessaufnahme, Darstellung der Anforderungen und Herausforderungen sowie die Messtechnische Untersuchung und Emissionsfeststellung. Hierzu erfolgten vor-Ort-Besuche bei den Binnenhäfen. Für jeden Use Case erfolgte die Beschreibung der Prozesse, Anforderungen und Herausforderungen in Prozessketten und Steckbriefen. Mögliche Konzepte wurden visualisiert und dokumentiert und in die Prozessketten integriert. Auch erfolgte in den Steckbriefen eine Verknüpfung mit den Ergebnissen der Messtechnischen Untersuchungen.

Das Teilarbeitspaket AP1.3 (Messtechnische Untersuchung) unterlag der Führung durch Müller-BBM. Nachfolgend ist beispielhaft das Vorgehen zur Problemidentifikation und Emissionsfeststellung an einem use-case dargestellt:

Es wurden Begehungen der Häfen der Projektpartner durchgeführt. Zuvor wurde sichergestellt, dass die relevanten akustischen Quellen in der Zeit der Begehung aktiv sind. Hierfür sorgten die Hafentreiber. Müller-BBM und IBAS führten während der Begehungen erste Messungen durch. Ziel der Begehungen war es eine erste Einschätzung zu den jeweils relevanten akustischen Quellen abzuleiten sowie deren Charakter (Frequenzinhalte, Tonalität, Impulshaltigkeit, Dauer,...) zu bestimmen. IBAS führte orientierende Schalleistungsmessungen auf Basis von Schalldruckpegelmessungen durch. Müller-BBM führte zudem Messungen mit einer akustischen Kamera durch, um die akustischen Quellen genauer zu lokalisieren.

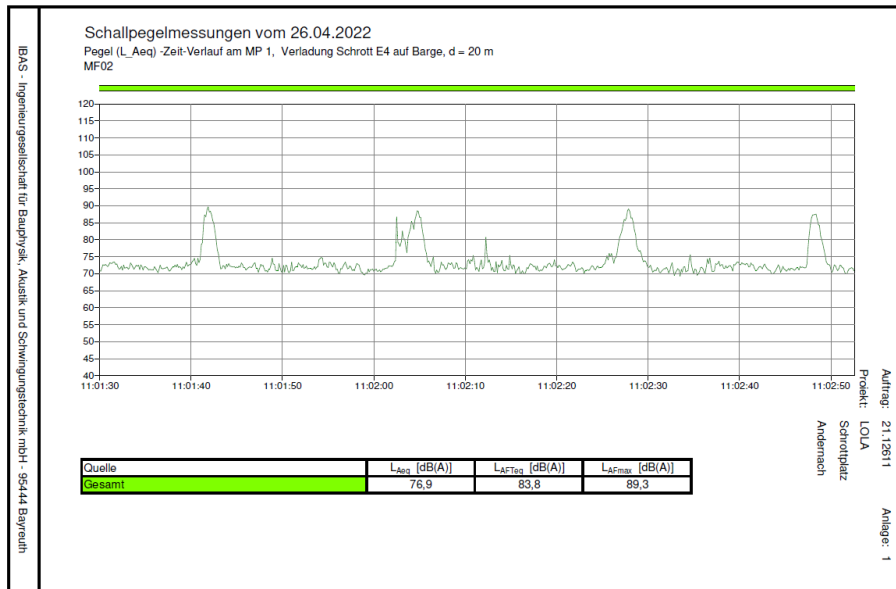


Abbildung 3: Messergebnisse zur Schalleistungsbestimmung aus Schalldruckpegelmessungen am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.

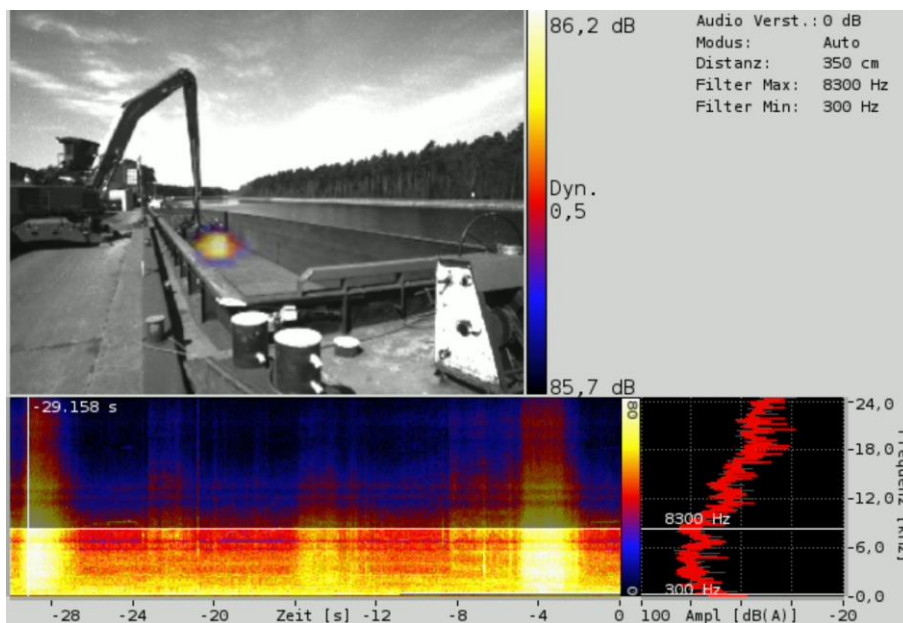


Abbildung 4: Messergebnisse der akustischen Kamera am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.

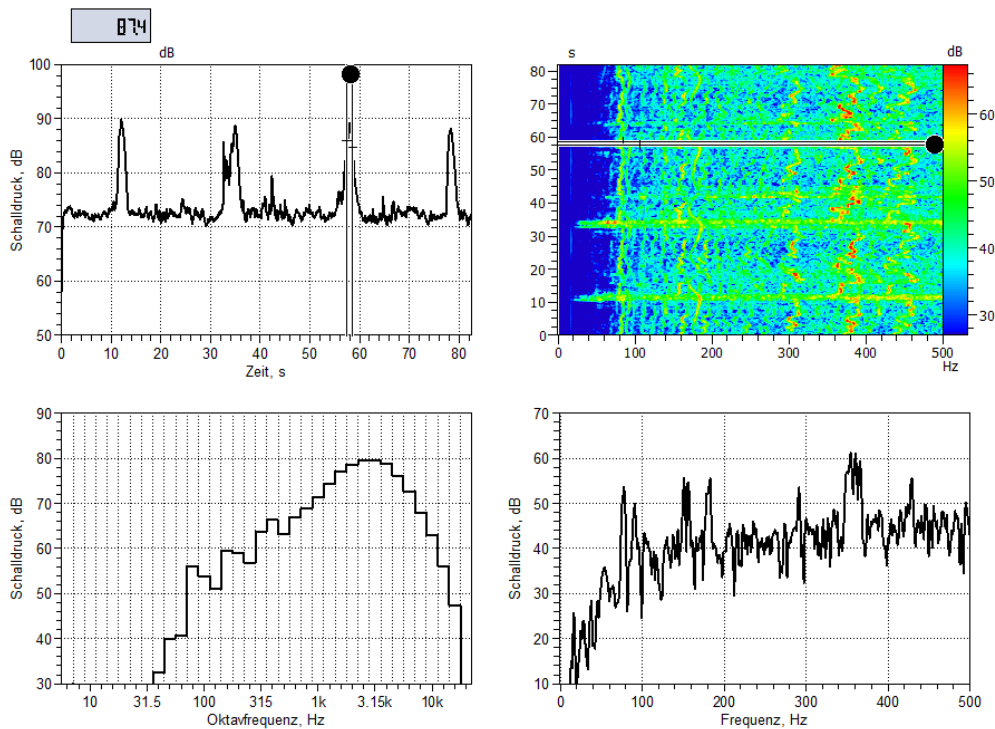


Abbildung 5. Datenanalysen zur Charakterisierung der akustischen Quelle am Beispiel der Verladung von Schrott auf eine Barge.

Ergebnis identifizierter Schalleistungen von Teilquellen:

- Kondirator Abwurf: $L_w = 106 \text{ dB(A)}$
- Kondirator Bandanlage: $L_w = 108 \text{ dB(A)}$
- Verladung auf Barge: $L_w = 111 \text{ dB(A)}$
- Verladung auf LKW: $L_w = 113 \text{ dB(A)}$

Die Ergebnisse der Analysen aller use-cases in Form von Spektren, Zeitverläufen, Audio und Videoaufnahmen wurden den Projektpartnern vorgestellt und für die weitere Konzeptionierung von Demonstratoren diskutiert.

2.1.2 Arbeitspaket 2: Konzeptionierung der Anwendungsdemonstratoren

Die Leitung von AP2 oblag Müller-BBM. Während das Fraunhofer LBF besonders geübt in der Konzeptionierung und Umsetzung von Anwendungsdemonstratoren ist, verfügt Müller-BBM über langjährige Erfahrung bei der Beurteilung von akustischen Effekten, Mechanismen und allgemein Schallquellen. Daher bestand die Rolle von Müller-BBM in AP2 maßgeblich darin, die geeigneten Methoden für die use-cases mit den Partnern zu diskutieren und auszuwählen. Dabei brachte Müller-BBM seine Kompetenzen im Bereich der akustischen Beratung, Berechnungsverfahren sowie Vorwissen aus zahlreichen experimentellen Untersuchungen mit ein. Der Unterauftragnehmer IBAS konnte zudem aus Vorprojekten bei der Akustikberatung von Häfen wichtige Hinweise liefern. Somit

konnten im Konsortium gemeinschaftlich aussichtsreiche Konzepte identifiziert und Anwendungsdemonstratoren abgeleitet werden. Die diskutierten und erarbeiteten Konzepte für Anwendungsdemonstratoren zu den jeweiligen use-cases sind in Kapitel 3 des gemeinsamen Abschlussberichts zu finden. Das Fraunhofer LBF hat für jeden Use Case mindestens 3 Lösungskonzepte entwickelt und die aktuellen Forschungsthemen „Meta-Materialien“ und „ANC“ (Active Noise Control) in die Konzeptentwicklung eingebracht. Nachfolgend werden zusätzliche Tätigkeiten, welche nicht explizite Erwähnung im gemeinsamen Bericht genannt werden, jedoch forschungsrelevant für die Weiterentwicklung der Methode der vibro-akustischen Metamaterialien (VAMM) sind, zusammengefasst.

Im Zuge der Arbeiten zu AP2.1 (Konzeptentwicklung) wurden seitens Müller-BBM sowie des Fraunhofer LBFs teilweise bereits parallel Arbeiten aus AP2.2 (Numerische Bewertung) verfolgt. Das Fraunhofer LBF hat aus der Vergangenheit bereits Vorerfahrungen in der Auslegung von akustischen Metamaterialien und eigene FE-Berechnungsansätze und Optimierungsverfahren entwickelt. Diese wurden im Projekt vom Fraunhofer LBF auf die use-cases angewendet und sind im gemeinsamen Bericht dokumentiert.

Aus den Diskussionen zur Konzeptentwicklung und -bewertung ergaben sich Erkenntnisse zu methodischen Schwachstellen in den Berechnungsverfahren bzw. deren fehlender Validierung. Während bisherige Modellierungsansätze zur Bewertung des Einsatzes von vibroakustischen Metamaterialien VAMM häufig auf Methoden der Finiten Elemente Methode (FEM) basieren, sind diese zur Beschreibung hochfrequenter Schallabstrahlung nur eingeschränkt anwendbar, da die Modellgröße und damit Rechenkapazität mit der Frequenz stark ansteigt. Für die höherfrequente Bewertung verwendete Müller-BBM daher zunächst die numerischen Ansätze der statistischen Energieanalyse (SEA). Mittels kommerziell verfügbarer Software wurden die Eigenschaften der resonanten Metamaterialien über Einheitszellenansätze modelliert. Hierbei zeigten sich Herausforderungen an den Modellierungsansatz bei nichtebenen (einfachgekrümmten) Strukturen sowie bei der korrekten Beschreibung der Energiedissipation durch die gedämpften Resonatoren. Bevor komplexere Strukturen, wie das Silo aus use-case 2 berechnet wurden, wurde anhand einer einfacheren Struktur (ebene Platte) das Vorgehen getestet. Hierfür wurden experimentell ermittelte Ergebnisse mit numerisch gewonnen Ergebnissen verglichen um die berechneten Ergebnisse zu validieren. Abbildung 6 zeigt eine Holzplatte mit VAMM in einem akustischen Prüfstand bei Müller-BBM, bei dem unterhalb der Platte ein Senderaum liegt, in dem ein diffuses Schallfeld erzeugt wird und oberhalb der Platte über Schallintensitätsmessungen die abgestrahlte Schalleistung bestimmt wird. Ziel der Auslegung des VAMM war es, die Schallabstrahlung im Bereich der Koinzidenzfrequenz zu reduzieren.



Abbildung 6. Versuchsaufbau zur Messung der akustischen Eigenschaften einer Platte mit VAMM bei Luftschallanregung.

Als Messergebnis wurde das Schalldämmmaß mit und ohne VAMM ermittelt. Die Verläufe sind in Abbildung 7 dargestellt. Das bewertete Schalldämmmaß R_W des Ausgangszustands (ohne VAMM) von 31 dB konnte mit VAMM um 2 dB auf 33 dB erhöht werden. In der Terz des Koinzidenzbereichs und damit Zielbereichs der Auslegung liegt die Reduktion bei max. 6,6 dB.

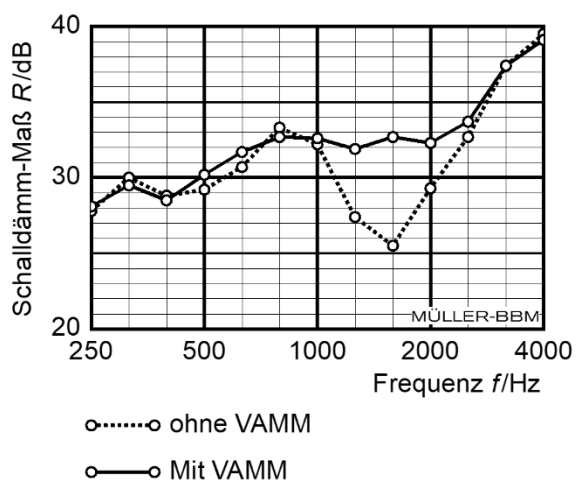


Abbildung 7. Ergebnisse der Schallintensitätsmessungen zur Bestimmung des Schalldämmmaßes mit und ohne VAMM.

Die Modellierung der oben genannten Platte als SEA-Modell erfolgte analog zum Versuchsaufbau der Messung. Abbildung 8 zeigt die prinzipiell notwendigen Schritte zur Erstellung eines SEA-Modells für diesen Anwendungsfall: Die Platte befindet sich zwischen zwei Luftvolumen. Die Eigenschaften der Platte ohne VAMM, sowie der Luftvolumina werden durch die anzugebenden Materialparameter und die Geometrie definiert. Die Platte mit VAMM hingegen wird mit der Einheitszellenbeschreibung modelliert. Hierbei wird nur die kleinste Einheit der periodischen Struktur als FE-Modell erstellt und diese als Eigenschaften der, zwischen den beiden Luftvolumen positionierten, Platte zugewiesen.

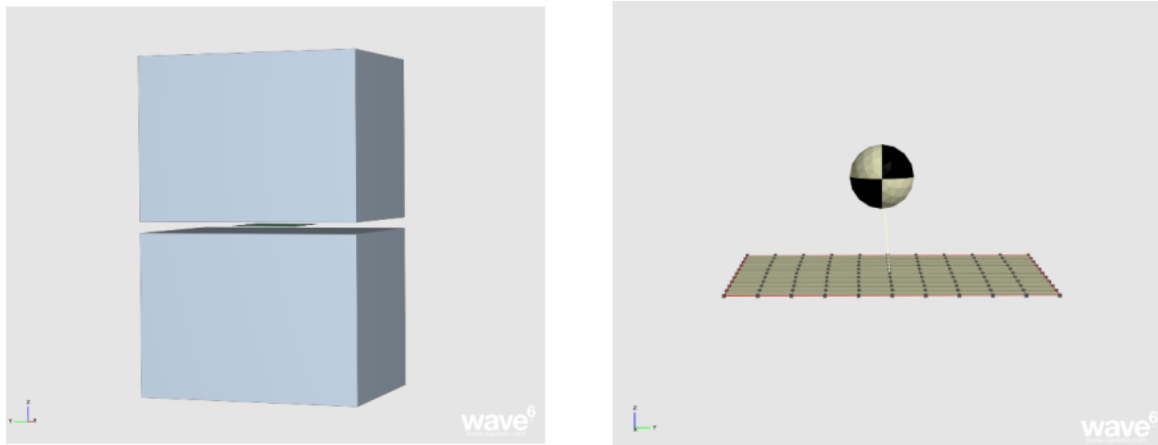


Abbildung 8. SEA-Modellierung der ebenen Platte mit VAMM (links: Empfänger und Senderraum mit Platte, rechts: Einheitszelle der Platte).

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen ist in Abbildung 9 dargestellt. Die berechneten und gemessenen Verläufe des Schalldämmmaßes ohne VAMM zeigen gute Übereinstimmung. Wohingegen die Ergebnisse mit VAMM Abweichungen bei der Resonatoreigenfrequenz aufzeigen. Hier überschätzt das Modell die Wirkung, obwohl die Dämpfungsparameter messtechnisch ermittelt und im Modell bereits integriert sind. Die methodischen Hintergründe hierzu und die Folgen für die Ableitung von Maßnahmen wurden mit den Partnern und dem Softwareanbieter diskutiert.

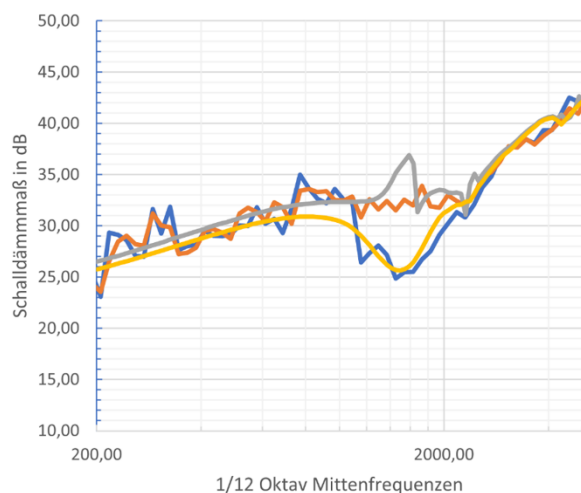


Abbildung 9. Berechnetes Schalldämmmaß mit VAMM (grau), ohne VAMM (gelb) verglichen mit experimentellen Ergebnissen mit VAMM (orange) und ohne VAMM (blau)

Die Modellierung mit der Methode der SEA beruht auf verschiedenen Annahmen. So gilt der Einheitszellenansatz streng genommen nur für die Eigenschaft einer unendlich großen Struktur, in diesem Fall einer unendlichen Platte. Inwieweit die verwendete Software die Eigenschaften einer endlichen Struktur durch zusätzliche rechnerische Ansätze abbildet, konnte im Projektverlauf nicht geklärt werden, da auf die dahinterliegenden Berechnungsmethoden kein Zugriff gewährt wurde.

Am Beispiel von use-case 2 (Silo) werden nachfolgend das weitere Vorgehen beschrieben sowie einige Aspekte beleuchtet, die bei der Modellierung Relevanz zeigten. Die Zielstellung des uses-cases 2 war, eine Maßnahme auszulegen, welche die für den Prozess notwendigen Schwingungen des Unwuchterregers möglichst nicht beeinflusst, jedoch die akustisch wirksamen Schwingungen der höheren Ordnungen und somit die Schallabstrahlung reduziert. Abbildung 10 zeigt ein Teilmodell des später realisierten Aufbaus mit einer mehrreihigen Anordnung aus Resonatoren um den Unwuchterreger (idealisiert dargestellt als Kraft mit einem roten Pfeil).

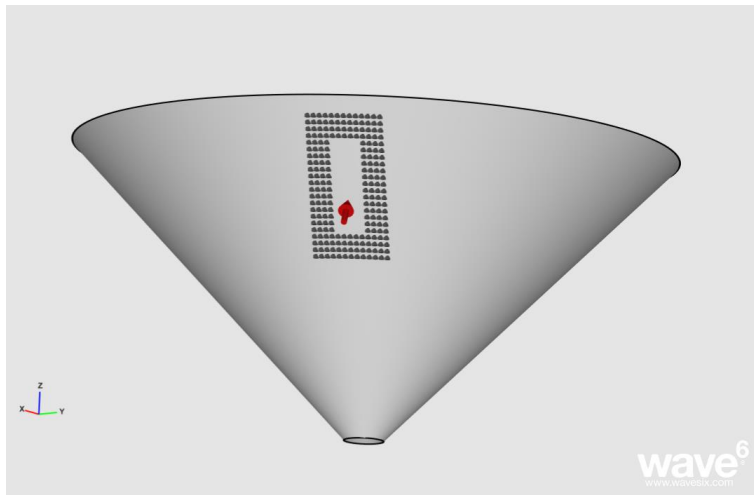


Abbildung 10. Teilmodell des Silos mit VAMM-Barriere und Anregungskraft innerhalb der Barriere.

Zur effizienten Auslegung eines resonanten Metamaterials gilt es eine geeignete Methode zu finden, die recheneffizient ist, für Optimierungsrechnungen geeignet und das physikalische Wellenausbreitungsverhalten korrekt beschreibt. Der oben genannte Ansatz der Beschreibung der Wellenübertragung anhand eines kleinen FE-Modells einer Einheitszelle ist mit der verwendeten Software Wave6 möglich (siehe Abbildung 8). Abbildung 11 stellt die Berechnungsergebnisse an der Einheitszelle für zwei verschiedene Resonatoranordnungen anhand eines Wellenzahlendiagramms dar. Erkennbar ist der zunehmend breitbandigere Charakter eines Stopppandes mit zunehmender Masse. Somit ist die Methode prinzipiell geeignet für Parameterstudien oder eine recheneffiziente Optimierung.

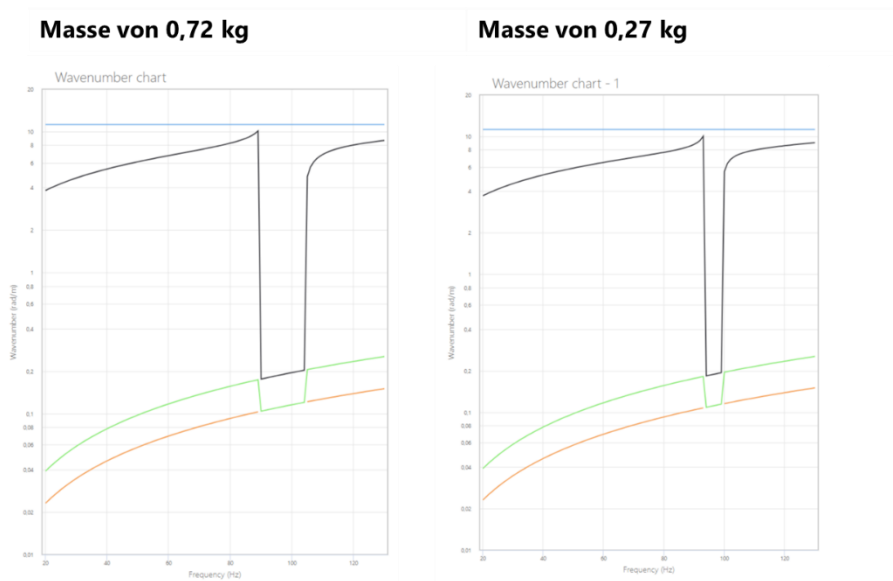


Abbildung 11. Wellenzahlendiagramm einer VAMM Einheitszelle mit zwei verschiedenen Resonatormassen.

Bei der Übertragung der Methode auf ein SEA-Modell des Silos zeigte sich jedoch, dass die Energien der SEA-Subsysteme mit einem, auf Basis der Einheitszelle modellierten, VAMM nicht korrekt abgebildet werden.

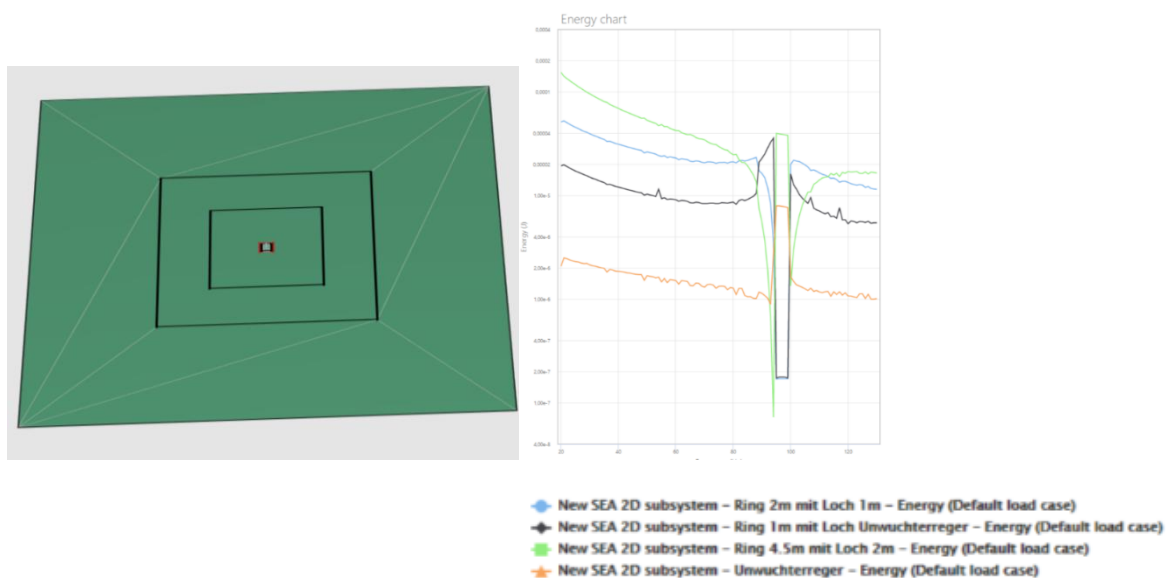


Abbildung 12. Vereinfachtes SEA-Modell des Silos mit Umwuchanregung in der Mitte und zwei Schichten VAMM sowie einer Empfängerplatte außen.

Abbildung 12 stellt rechts die Energien der vier Teilflächen für die vereinfachte (ebene) Silo Struktur gegenüber. Es zeigt sich ein Energieminimum im Bereich des Stoppbandes für die beiden (innenliegenden) VAMM-Teilflächen. Jedoch liegt die Energie der dahinterliegenden Empfängerplatte (grün) im Bereich des Stoppbandes über dem Energieniveau der Erregerfläche (orange). Dieses Ergebnis widerspricht jedoch den experimentellen Ergebnissen sowie FE-Berechnungen. Somit lässt sich das Gesamtsystemverhalten einer komplexen Struktur mit dem evaluierten Vorgehen der SEA-

Methode nicht korrekt beschreiben. Ob dieser Sachverhalt an den internen Algorithmen der verwendeten Software liegt oder die SEA-Methode prinzipiell nicht geeignet ist, das Verhalten eines VAMM zu beschreiben, konnte im Projektverlauf nicht abschließend geklärt werden. Dieser Sachverhalt konnte jedoch als eine methodische Schwachstelle identifiziert zur numerischen Bewertung der akustischen Eigenschaften von Metamaterialstrukturen im hohen Frequenzbereich identifiziert werden. Als alternatives Vorgehen zur Modellierung der akustischen Abstrahlung wurde im Projekt LOLA im weiteren Verlauf auf eine Kombination aus FE-Modellierung und BEM-Modellierung zurückgegriffen. Abbildung 13 verdeutlicht das Verhalten einer vereinfachten Plattenstruktur mit einer stochastisch verteilten Kraftanregung im linken Bereich, eines VAMM-Bereichs bestehend aus 3 Reihen Resonatoren und einem Empfängerbereich rechts. Aus dem Vergleich der Energieverteilung wird deutlich, dass bei dieser Modellierung der Energieinhalt des Masse-Feder-Systems korrekt abgebildet ist und die Energie im Empfängerbereich im Bereich des Stopfbandes stark reduziert wird.

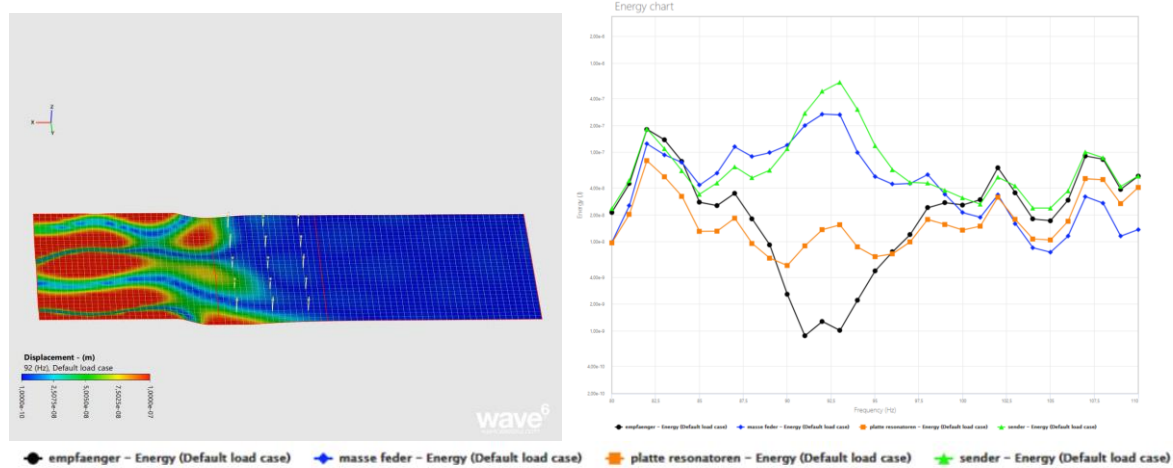


Abbildung 13. FE-Modell einer einfachen Plattenstruktur mit 3 Reihen Resonatoren als VAMM (links) und Energieverteilung der Komponenten (rechts).

Das finale Modellierungsvorgehen kann mit den folgenden Schritten zusammengefasst werden:

Voruntersuchung:

1. Modellierung des VAMM als Einheitszelle → Effiziente Optimierung des Stopfbandes an den Anregungsfall möglich

Hauptuntersuchung:

2. Modellierung der Struktur als FE-Modell inkl. VAMM → Einfluss des VAMM wird richtig abgebildet
3. Identifikation der Anregungskräfte aus den experimentell ermittelten Beschleunigungen und dem FE-Modell
4. Modellierung der umgebenden Struktur als BEM-Modell → Abstrahlung des Luftschalls in die Umgebung (siehe Abbildung 14)

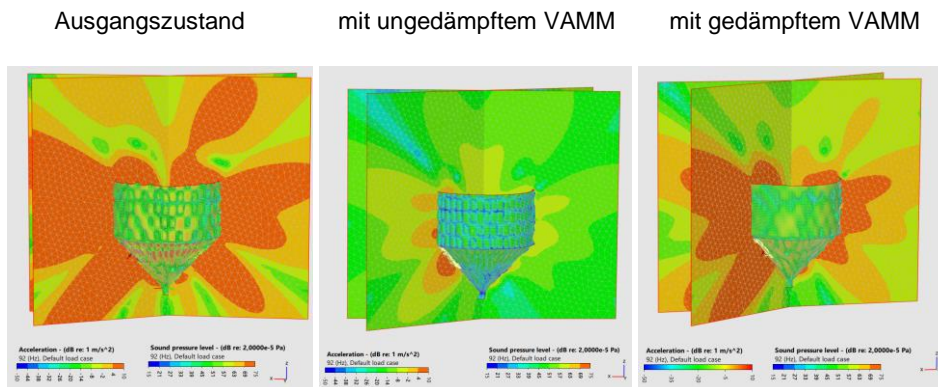


Abbildung 14. Berechnete Schallabstrahlung am Silo in der 2. Ordnung des Unwulterregers mit und ohne VAMM.

Die Ergebnisse der Berechnungen fließen in die Arbeiten zu AP3 ein.

2.1.3 Arbeitspaket 3: Umsetzung der Anwendungsdemonstratoren

Das dritte Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer LBF geleitet. Teilarbeitspaket 3.3 (Konzepttest unter Realbedingungen) unterlag der Leitung von Müller-BBM. In AP3 wurden die in Arbeitspaket 2 entwickelten Konzepte umgesetzt. In einem ersten Schritt fand die Konzeptumsetzung durch das Fraunhofer LBF statt. Die Anwendungsdemonstratoren wurden zunächst numerisch ausgelegt und dimensioniert. Auf Basis der numerischen Untersuchungen erfolgte die konstruktive Ausarbeitung der erforderlichen mechanischen Komponenten mittels CAD am Fraunhofer LBF. Müller-BBM beteiligte sich in dieser Phase durch Beiträge in der numerischen Modellierung und durch Teilnahme an Besprechungen zur Planung und Detaillierung der finalen Ausführungen. Die Lärminderungskonzepte wurden dann im Laborumfeld aufgebaut und umfassend messtechnisch durch das Fraunhofer LBF mit Unterstützung von Müller-BBM untersucht. Ziel der Untersuchungen war die experimentelle Validierung der Demonstratoren unter möglichst realitätsnahen Randbedingungen, die den späteren Einsatzszenarien entsprechen.

In AP3.3 wurden die am Fraunhofer LBF im Labor entwickelten Konzepte unter Realbedingungen in den Häfen getestet. Hierfür wurden die Demonstratoren in den Häfen durch das Fraunhofer LBF mit Unterstützung durch Müller-BBM aufgebaut und für einen mit den Anwendungspartnern festgelegten Zeitraum eingesetzt. Müller-BBM führte zusammen mit dem Unterauftragnehmer IBAS akustische und schwingungstechnische Messungen an den Demonstratoren unter Realbedingungen durch. Das Fraunhofer LBF hat Müller-BBM in diesem Arbeitspaket bei der Durchführung und Validierung der Messungen unterstützt. Teilweise (use-case 4) wurden die Messungen nach vorangegangener Abstimmung mit Müller-BBM vom Fraunhofer LBF selbständig durchgeführt.

Details zu den durchgeführten Messungen sind im gemeinsamen Abschlussbericht ausführlich dargestellt.

2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung logistischer Handlungsempfehlungen

Das vierte Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer IML geleitet. Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Entwicklung logistischer Handlungsempfehlungen. Hierbei wurde zum einen ein Logistikkonzept für einen Hafen entwickelt und zum anderen das LOLA-Tool entwickelt. Müller-BBM beteiligte sich unter anderem an Besprechungen zum akustischen Potenzial verschiedener logistischer Anpassungsmaßnahmen.

Zur Vorbereitung der Entwicklung der Webseite des LOLA-Tools wurden vom Fraunhofer IML mehrere Workshops mit den Anwendungspartnern zu den Anforderungen an ein Lärmtool diskutiert. Hierbei wurden u.a. die folgenden Fragen diskutiert:

- Welche Funktionen müsste das Tool besitzen, um einen hohen Praxisnutzen zu bieten?
- Welche Maßnahmen (z. B. Geräuschabschirmungen, Technik-Update) sind für Häfen besonders wirksam?
- Wie können logistische Prozesse (z. B. Umschlag, Lagerung, Verladung) in Bezug auf Lärmbelastungen optimiert werden (z. B. zeitliche oder örtliche Verschiebungen)?
- Welche der Maßnahmen sollen in das Tool aufgenommen werden?

Die Ergebnisse der Workshops wurden als Grundlage für das LOLA-Tool genutzt. In einem iterativen Entwicklungsprozess wurde die Seite immer weiterentwickelt und auf Basis des Feedbacks der Projektpartner überarbeitet. Dies umfasste sowohl inhaltliches Feedback als auch Feedback zur Farb- und Designgestaltung.

Müller-BBM veranstaltete einen Workshop für die Konsortialpartner über die rechtlichen Hintergründe der TA-Lärm und die rechnerischen Verfahren und heranzuziehenden Daten. Der Unterauftragnehmer IBAS hielt zudem einen Vortrag über die Besonderheiten im Umgang mit tieffrequenten Schallquellen. Die Berechnungen der Lärmkarten wurden durch Müller-BBM in Zusammenarbeit mit IBAS durchgeführt. Die dargestellte Schallausbreitung wurde hierfür nach der DIN ISO 9613-2 berechnet. Die Details hierzu sind im gemeinsamen Abschlussbericht aufgeführt.

2.1.5 Arbeitspaket 5: Evaluation der Anwendungsdemonstratoren

In Arbeitspaket 5 wurde eine Bewertung der Anwendungsdemonstratoren vorgenommen. Müller-BBM leitete Teilarbeitspaket AP5.1.

Müller-BBM analysierte hierzu die Messergebnisse zu den einzelnen use-cases und führte jeweils eine akustische Bewertung durch. Zudem wurde dem Konsortium eine realistische Einschätzung zum weiteren Potential der umgesetzten Maßnahmen vermittelt.

Eine genaue Beschreibung der Messungen zu den jeweiligen use-cases und den angewandten Analyseverfahren sowie den quantitativen Bewertungen findet sich im gemeinsamen Abschlussbericht.

2.1.6 Arbeitspaket 6: Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Projektergebnisse sind zum Teil direkt auf andere technische Bereiche übertragbar. Die Methode der vibroakustischen Metamaterialien befindet sich noch im Erprobungsstadium. Das Fraunhofer LBF konnte bereits das prinzipielle Potenzial in Forschungsprojekten nachweisen, jedoch sind Müller-BBM noch keine kommerziellen Produkte oder akustische Maßnahmen bekannt, die auf den Mechanismen der VAMM beruhen. Der Nachweis, dass die Methode auch in schweren Umgebungsbedingungen bei hohen Energien funktioniert, stellt aus Sicht von Müller-BBM einen wichtigen Schritt in der weiteren Etablierung der Methode dar. Die angewandten Auslegungsmethoden können für andere Anwendungsfälle herangezogen und genutzt werden, so dass nach Projektabschluss der TRL dieses neuen Werkzeugs für die akustische Produktoptimierung gestiegen ist.

Müller-BBM ist in zahlreichen Branchen aktiv, so dass die Wahrscheinlichkeit eines breiteren Einsatzes der Methode gestiegen ist.

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse hat das Fraunhofer IML die Lösungen aus dem Projekt mit Unternehmen aus anderen Branchen und Bereichen der Binnenhäfen gespiegelt. Müller-BBM beteiligte sich bei Diskussionen innerhalb des Konsortiums und half den Partnern bei der Bewertung der Übertragbarkeit und dem Aufzeigen von technischen Grenzen.

Die weiteren Tätigkeiten zu AP.6 oblagen dem Fraunhofer IML und sind im gemeinsamen Projektbericht genannt.

2.1.1 Arbeitspaket 7: Projektmanagement

Das Fraunhofer IML hat die wissenschaftliche Projektleitung für LOLA übernommen. Dies beinhaltete zum einen die wissenschaftliche Kommunikation mit dem Fördermittelgeber und dem Projektträger wie auch die Koordination des Konsortiums. Es haben im Projektverlauf 4mal im Jahr Konsortialtreffen und monatliche Statustelkos stattgefunden.

Müller-BBM nahm an allen Treffen teil. Zudem hat Müller-BBM bei der Erstellung von Berichten unterstützt und die Projektergebnisse im Rahmen von Vorträgen vorgestellt.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Projektmittel wurden grundlegend gemäß dem beantragten Finanzierungsplan ausgegeben. Im Rahmen des Projekts wurde durch Müller-BBM, aufgrund der vorliegenden Vorprojekte und spezifischen Hafenerkenntnisse, die IBAS Ingenieurgesellschaft für Bauphysik, Akustik und Schwingungstechnik unterbeauftragt. Ein Großteil der in LOLA beantragten Mittel ist für Personalkosten angefallen. Weitere Posten waren Material-, Software- und Reisekosten.

Im Projekt wurde eine Mittelumwidmung von zuvor budgetierten Personalkosten zur Anschaffung und Verlängerung einer speziellen Software (Wave6) beantragt. Diese Mittelumwidmung wurde bewilligt. Die Lizenzkosten wurden entsprechend der tatsächlichen Projektnutzung anteilig berechnet.

2.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit im Projekt LOLA ergibt sich aus der Forschungslücke bezüglich des Einsatzes von innovativen Lärminderungsmaßnahmen im Hafenumfeld. Aufgrund der allgemeinen Anforderungen an die Prozesse im Bereich des Güterumschlags an Häfen sind klassische akustische Maßnahmen häufig nicht einsetzbar oder der Einsatz wäre mit starkem Verschleiß verbunden. Die akustisch wirkenden Prozesskräfte sind häufig sehr groß und die Anforderungen an rein energiedissipierende Maßnahmen entsprechend hoch. Weiterhin sind an Häfen unterschiedlichste akustische Quellen aktiv, die meist primär auf Funktionalität und weniger auf die akustischen Eigenschaften hin entwickelt wurden.

Die zu Projektbeginn diskutierten Maßnahmen (insbesondere vibro-akustische Metamaterialien) wurden bisher fast ausschließlich unter geregelten Laborbedingungen eingesetzt und geprüft. LOLA stellte diesbezüglich die Möglichkeiten bereit, diese Methoden unter realen Bedingungen zu testen und die Entwicklungsmethodik am bestehenden Produkt zu evaluieren.

Das Projekt hat gezeigt an welchen Prozessen im Hafen Lärminderungsmaßnahmen (aktiv, passiv, technisch, prozessual, logistisch) möglich und sinnvoll umsetzbar sind und welche Anforderungen hierbei zu beachten sind. Die Projektergebnisse sind im LOLA-Tool aufbereitet und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Ohne diese Fördermaßnahme hätten die Projektergebnisse in dieser Form nicht entstehen können. Daher wird die geleistete Arbeit für das Vorhaben als notwendig und angemessen bewertet.

2.4 Nutzen der Arbeiten und Verwertbarkeit der Ergebnisse

2.4.1 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Projekt wurden innovative Ansätze zur Beherrschung akustischer Quellen verfolgt, deren TRL (Technology readiness level) noch vergleichsweise niedrig lag. Eine eigenständige Weiterentwicklung der Maßnahmen durch bspw. Hafenbetreiber ist durch die hohen Entwicklungskosten erschwert. Hierbei konnte durch das geförderte Projekt LOLA eine wichtige Grundlage für weitere Innovationen geschaffen werden. Der prinzipielle Nachweis der Machbarkeit kann dazu führen, dass die Technologien zukünftig für den Einsatz in Produkten in Betracht gezogen oder bei der Umsetzung spezifischer Einzelmaßnahmen Anwendung finden.

Müller-BBM konnte im Rahmen von LOLA numerische Methoden prüfen und weiterentwickeln, sowie wichtige Erfahrungen zum Verhalten von vibro-akustischen Metamaterialien sammeln. Diese Erkenntnisse fließen zukünftig in die Beratungsleistungen mit ein und können so den Technologietransfer in andere Bereiche beschleunigen.

Dadurch steht den Projektkosten auch nach Beendigung des Forschungsprojekts hinaus ein hoher Nutzen gegenüber.

2.4.2 Nutzen für die deutsche Hafenwirtschaft

Im Projekt wurden mit den beteiligten Hafenbetreibern gemeinsame Begehungen durchgeführt. Die in diesem Zusammenhang und späteren Konsortialtreffen und Projekttreffen geführten Gespräche erlaubten allgemeine Diskussionen zu akustischen Anforderungen an Häfen und Erläuterungen zu Eigenschaften von Quellen. Demzufolge wurde das akustische Verständnis der Hafenbetreiber erweitert, was ggf. in das weitere akustische Management von Häfen einfließen kann.

Die Umsetzung der im Projekt entwickelten Maßnahmen bei den Projektpartnern und die Dokumentation der Ergebnisse in Form von Berichten und dem Open Source Tool ermöglicht es weiteren Häfen einen Überblick zum Thema Lärm an Hafenanlagen zu erlangen.

2.4.3 Nutzen für Umwelt und Allgemeinheit

Der Nutzen für das Projekt ist auch für die Allgemeinheit und Umwelt von Bedeutung. Lärm stellt nicht nur eine Komfortbeeinträchtigung dar, sondern kann ebenfalls gesundheitsbeeinträchtigend wirken. Daher können die im Projekt gemachten Fortschritte zukünftig zur Vermeidung unnötigen Lärms durch optimierte Produkte oder entsprechend ausgelegte Gegenmaßnahmen beitragen. Die

Projektergebnisse können zu Verbesserungen im Prozessablauf in Binnenhäfen führen und so die Umwelteinwirkungen durch den Güterumschlag verringern.

Durch den Forschungscharakter des Projekts, sind die Ergebnisse öffentlich verfügbar und lassen sich von anderen Akteuren abrufen und nutzen.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet

Siehe gemeinschaftlicher Abschlussbericht.

2.6 Veröffentlichungen

Im Laufe der Projektlaufzeit wurde das Projekt bei internen Veranstaltungen und Vorträgen vorgestellt.

Veröffentlichungen in Papern und auf Tagungen:

- N. Kleinfeller, S. Rieß, M. Schmidt, H. Atzrodt, V. Gimpl und O. Heuss, „Anwendung und messtechnische Bewertung von vibroakustischen Metamaterialien im Binnenhafen,“ in DAGA 2026 - 52. Jahrestagung für Akustik, Dresden, Deutschland, 23.-26. Mrz. 2026, akzeptierter Abstract.