

Projekt TyreRoadNoise – Datengestützte Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Geräuschemissionen bei kontrollierten und realen Fahrzuständen

Achim Winandi¹, Frank Gauterin²

¹ *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76131 Karlsruhe, Deutschland, Email: achim.winandi@kit.edu*

² *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76131 Karlsruhe, Deutschland, Email: frank.gauterin@kit.edu*

Einleitung

In der für die deutsche Bevölkerung repräsentativen Studie „Umweltbewusstsein in Deutschland 2020“ wird der Straßenverkehrslärm als störendste Lärmquelle genannt. 76 % der Befragten fühlen sich durch Straßenverkehrslärm zumindest „etwas gestört oder belästigt“ und 21 % sogar „stark“ oder „äußerst gestört oder belästigt“. Der Straßenverkehrslärm liegt damit noch vor den anderen Verkehrslärmquellen Flugverkehrslärm und Schienenverkehrslärm. [1] Die Belästigung durch Verkehrslärm kann über eine rein störende Wirkung hinausgehen und sogar verschiedene Krankheiten begünstigen. So zeigen einige (Meta-)Studien ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen [2] oder auch psychische Erkrankungen [3].

Die Messung des Vorbeifahrgeräusches von Pkw für die Typgenehmigung erfolgt in Europa nach der Verordnung (EU) 540/2014. Diese fordert die Verwendung einer Fahrbahn nach ISO 10844. Im MISOR-Projekt [4] wurden bei Messungen des Vorbeifahrgeräusches auf verschiedenen Fahrbahnen nach ISO-Norm Lärmpegelunterschiede von bis zu 3,7 dB Differenz gemessen. Noch gravierender ist die Tatsache, dass nicht einmal die Rangfolge der Reifen auf den verschiedenen Fahrbahnen gleich ist. So können unterschiedliche Reifenmodelle auf unterschiedlichen Fahrbahnen die niedrigsten Lärmpegel erreichen. Das MISOR-Projekt schlägt auch ein Verfahren zur Korrektur dieses Fahrbahneinflusses vor. Es kann den Einfluss der Fahrbahn reduzieren, aber nicht vollständig eliminieren. [4]

Um die Einflussparameter auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch besser zu verstehen und eine bessere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Fahrbahnen zu ermöglichen, wurde das Projekt TyreRoadNoise ins Leben gerufen. In diesem Projekt werden mit einfachen Messmethoden umfangreiche Messungen auf Fahrbahnen nach ISO 10844 sowie auf für öffentliche Straßen repräsentativen Fahrbahndecken durchgeführt. Auf Basis dieser Messdaten werden Prognosemodelle entwickelt, Einflussfaktoren identifiziert und Maßnahmen zur Lärmminde rung abgeleitet. Der Fokus im Projekt liegt auf der Kombination von verschiedenen Reifen mit Fahrbahnen bei Konstantfahrt sowie beschleunigter Vorbeifahrt. Aber auch andere Einflussfaktoren wie z.B. der Reifenfüll druck oder die Achslast werden in kleinerem Umfang un tersucht.

Die vorliegende Publikation stellt die Ziele und die Pro jektstruktur des Ende letzten Jahres gestarteten Projektes TyreRoadNoise vor.

Ziele und Forschungsfragen

Ziel des Projektes ist die Erschließung von Minderungs potenzialen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Dazu wer den auf Basis der im Projekt erhobenen Daten verschie dene Prognosemodelle mittels physikalischer, datenba sierter und kombinierter Ansätze entwickelt. Mit Hil fe dieser Modelle werden Einflussfaktoren identifiziert und Abhilfemaßnahmen aufgezeigt. Eine genaue Model lierung erschließt weitere Lärmminde rungspotenziale, da Zielkonflikte besser ausbalanciert und Optionen umfas sender genutzt werden können. Darüber hinaus soll das Prognosemodell ermöglichen, von den Messungen auf ei ner Strecke auf die Emissionen auf anderen Strecken zu schließen.

Diese Ziele spiegeln sich auch in den Forschungsfragen des Projektes [5] wider:

1. Wie und mit welcher Genauigkeit können Reifen-Fahrbahn-Geräusche und Einflussgrößen im norma len Verkehr möglichst einfach abgeschätzt werden?
2. Wie können die Schätzwerte durch Fusion verschie dener Parameter, Wiederholungsfahrten oder Daten von verschiedenen Fahrzeugen verbessert werden?
3. Mit welcher Genauigkeit werden Zusammenhänge zwischen den geschätzten Einflussgrößen und dem geschätzten Reifen-Fahrbahn-Geräusch erkannt?
4. Wie und mit welcher Genauigkeit kann das Vor beifahrgeräusch auf der Grundlage einer Referenz messung vorhergesagt werden (z. B. für eine andere Fahrbahndecke oder andere Betriebsbedingungen)?
5. Welche Reifen-Fahrbahn-Geräusche treten auf rea len Fahrbahnen unter verkehrsrelevanten Betriebs bedingungen mit aktuellen Serienreifen auf, welche Bedeutung haben die Einflussparameter und welche Maßnahmen zur Geräuschreduzierung lassen sich ableiten?

Projektstruktur

Zur Erreichung der Projektziele arbeitet ein interdiszi plinäres Projektkonsortium mit insgesamt zehn Projektpartnern zusammen (eine detaillierte Auflistung der be teiligten Einrichtungen und Personen findet sich im Ab schnitt Danksagung). Die geplanten Inhalte des Projektes werden im Folgenden anhand der Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete grob dargestellt. Eine Übersicht über die Arbeitspakete findet sich in Abbildung 1.

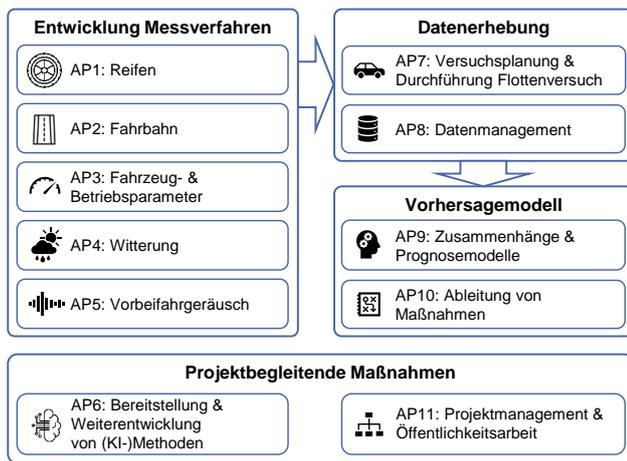


Abbildung 1: Die Arbeitspakete des Projektes TyreRoad-Noise.

Entwicklung der Messverfahren

Da nicht nur Messungen unter kontrollierten Bedingungen auf abgesperrten Versuchsstrecken, sondern auch auf realen Fahrbahnoberflächen durchgeführt werden, müssen die Messungen im fließenden Verkehr möglich sein. Da dort z. B. eine Messung des kontrollierten Vorbeifahrgeräusches aufgrund von Störungen durch Umgebungsgläusche nicht möglich ist, kann die Bestimmung des Vorbeifahrgeräusches nur indirekt über Schätzverfahren aus anderen Messgrößen erfolgen. Die Entwicklung dieser Schätzverfahren erfolgt in der ersten Projektphase. Darüber hinaus werden in dieser Projektphase die Ground-Truth-Daten sowie weitere mögliche Einflussgrößen für eine spätere Verwendung im Prognosemodell erhoben.

Reifen

Die im Projekt untersuchten Reifen sollen einen möglichst großen Bereich der Eigenschaften Steifigkeit, Profilnegativanteil und Profilgummihärte abdecken. Daher ist der Einsatz von 12 verschiedenen Reifenmodellen aus den Kategorien Sommerreifen, Winterreifen und Ultra-High-Performance-Reifen (UHP-Reifen) vorgesehen.

Für alle Reifenmodelle werden Reifenkennwerte für Reifendimension, Felgenmaulweite, Shore-Härte, Profilgeometrie, Profiltiefe, radiale Steifigkeit, Verlustmodul des Laufstreifenmaterials, freie Oberflächenenergie und Bodendruckverteilung auf realen Fahrbahnen erfasst. Zusätzlich werden die Reifen hinsichtlich Rollwiderstand und Nassbremsverhalten charakterisiert, um mögliche Zielkonflikte in Bezug auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch zu identifizieren.

Fahrbahn

Im Rahmen des Projektes sind sowohl Messungen auf nach ISO 10844 genormten Teststrecken als auch auf realen Fahrbahnoberflächen vorgesehen. Dazu sind derzeit 15 verschiedene Messstrecken mit folgenden Deckschichten geplant: Asphaltbeton (AC), Dünne Schicht im Heißeinbau auf Versiegelung (DSH-V), ISO 10844 genormte Teststrecken (ISO), offeneporige Asphaltbeläge (PA), Splitmastixasphalt (SMA), Splitmastixasphalt lärmarm (SMA LA) und Waschbeton (WB).

Die Auswahl der konkreten Streckenabschnitte unterliegt zahlreichen Randbedingungen: Um die im Projekt geforderten Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h zu ermöglichen, konzentriert sich die Streckenauswahl überwiegend auf Bundesfernstraßen. Stark befahrene Streckenabschnitte sind zu vermeiden, um starke Verkehrsbehinderungen durch Streckensperrungen zu vermeiden und eine sichere Durchführung des Versuchsprogramms zu gewährleisten. Aus diesem Grund bieten sich auch Strecken mit 2 Fahrstreifen pro Fahrtrichtung an, da hier nur ein Fahrstreifen gesperrt und der Verkehr über den verbleibenden Fahrstreifen umgeleitet werden kann. Darüber hinaus müssen Lademöglichkeiten für die im Projekt eingesetzten Elektrofahrzeuge in der Nähe der Teststrecken vorhanden sein.

Für die spätere Ermittlung möglicher Einflussgrößen auf das Vorbeifahrgeräusch werden an allen Versuchsstrecken folgende Fahrbahneigenschaften erhoben: Haftbeiwert, Absorptionsgrad mittels Impedanzrohr bei geschlossenen Deckschichten und Adrienne-Verfahren bei offenporigen Deckschichten, Makro- und Mikrotexur, Strömungswiderstand sowie die freie Oberflächenenergie. Diese Eigenschaften werden in den späteren Flottenversuchen nicht mehr direkt gemessen, sondern aus anderen Messgrößen am Fahrzeug geschätzt.

Fahrzeug- und Betriebsparameter

An den Versuchsfahrzeugen werden im Betrieb unter anderem Achslasten, Sturz- und Spurlinienwinkel, Radstand, Geschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung, Reifenumfangsschlupf, Radträgerbeschleunigung, Reifenfülldruck, Luft-, Fahrbahn- und Reifentemperatur (am Profilblock und am Profilgrund) gemessen. Zur Erfassung der Kenngrößen werden weitgehend die bereits im Fahrzeug eingebauten Sensoren verwendet und für nicht direkt verfügbare Größen Schätzverfahren entwickelt.

Witterung

Für das Projekt wurde festgelegt, dass die Messungen nur auf trockener Fahrbahn und bis zu einer bestimmten Windgeschwindigkeit durchgeführt werden. Da sich nach Regenfällen z. B. an schattigen Stellen Feuchtigkeit lokal länger halten kann, werden die Witterungsbedingungen während der Messungen kontinuierlich erfasst. Ein kamerabasiertes Verfahren erkennt Nässe auf der Fahrbahn, so dass solche Messstellen von den Messungen ausgeschlossen werden können. Anhand der Kamerabilder wird auch eine Zustandserkennung der Fahrbahn durchgeführt, so dass Streckenabschnitte mit Rissen und anderen Schäden ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen werden können.

Zusätzlich werden Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung erfasst, um später den Einfluss dieser Größen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch identifizieren zu können.

Vorbeifahrgeräusch

Für die Schätzung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches im fließenden Verkehr werden im Wesentlichen zwei Methoden eingesetzt: Zum einen wird das Geräusch im Reifeninneren mit der Akustischen Torusmethode (ATM) gemessen. Zum anderen wird das vom Reifen abgestrahlte

Geräusch mit 2 Schallintensitätssonden ähnlich der On-Board Sound Intensity (OBSI) Methode gemessen.

Das ATM-Messgerät besteht aus einem Mikrofon im Reifeninneren und einer kabellosen Übertragungseinheit, um die Daten vom rotierenden Rad zum Fahrzeug zu übertragen. In früheren Arbeiten konnte gezeigt werden, dass das ATM-Signal in der Lage ist, sowohl den Fahrbahnzustand [6] als auch das Außengeräusch des frei rollenden Reifens [7, 8] zu schätzen. Im Rahmen dieses Projektes werden die Schätzverfahren durch die Einbeziehung weiterer Signale (z. B. OBSI, Radträgerbeschleunigung, Fahrzeugdaten) auf die Vorhersage genauerer Fahrbahnkenngrößen (z. B. Makro-/Mikrotextur) und des Außengeräusches bei beschleunigter Fahrt erweitert.

Datenerhebung

Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes ist die Erhebung von Messdaten. Daher sind sowohl die Planung und Durchführung der Messungen als auch die Aufbereitung der Daten von zentraler Bedeutung.

Versuchsplanung/Durchführung Flottenversuch

Im Rahmen des Projektes sind Messungen bei trockenem Wetter in den Sommermonaten vorgesehen, um den Messumfang zu begrenzen. Dementsprechend sind Messkampagnen in den Sommermonaten der Jahre 2025 und 2026 geplant.

Ebenso werden zur Eingrenzung des Messumfangs ausschließlich Pkw in die Untersuchung einbezogen, Lkw werden explizit nicht untersucht. Bei den 3 vorgesehenen Fahrzeugen handelt es sich um den Audi Q8 eTron, den Porsche Taycan und den VW ID.4. Dabei handelt es sich um Elektrofahrzeuge, um den Einfluss der Antriebsgeräusche nahezu vollständig zu vermeiden.

Datenmanagement

Im Rahmen des Projektes werden Messdaten aus verschiedenen Datenquellen generiert. Diese Daten werden zentral gesammelt und allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Damit diese Daten von allen sinnvoll genutzt werden können, ist eine automatisierte Zusammenführung und Qualitätskontrolle der Daten unumgänglich. Zu Beginn des Projektes wird hier noch viel manuelle Datenkuration notwendig sein. Im Laufe des Projektes wird die Datenkonvertierung und -prüfung jedoch zunehmend automatisiert werden.

Insbesondere für eine spätere Veröffentlichung der Daten ist eine entsprechende Beschreibung der Daten durch Metadaten notwendig. Zu diesem Zweck werden bestehende Metadatenschemata überprüft und ggf. erweitert. Derzeit erscheint eine Anpassung des Metadatenschemas Metadata4Ing [9] sinnvoll. Darüber hinaus ist eine Abstimmung der Metadaten mit bereits vorhandenen Datensätzen und anderen verwandten Projekten wie z. B. dem Projekt BaLSaM [10] sinnvoll.

Vorhersagemodell

Basierend auf den im Projekt erhobenen Daten werden abschließend verschiedene Prognosemodelle entwickelt. Mit Hilfe dieser Modelle können Einflussgrößen und mögliche Maßnahmen zur Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches identifiziert werden.

Zusammenhänge und Prognosemodelle

Im Projekt werden physikalische, datenbasierte und kombinierte Ansätze einbezogen. Bei den physikalischen Modellen wird unter anderem das SPERoN-Modell [12] verwendet. Bei den datenbasierten Ansätzen wird entweder das Geräusch direkt oder die verbleibenden Abweichungen zwischen dem SPERoN-Modell und den Messdaten vorhergesagt.

Ein wichtiges Ziel ist es, durch die Messung auf einer Referenzstrecke auch das Reifen-Fahrbahn-Geräusch auf beliebigen anderen Strecken und unter anderen Betriebsbedingungen vorhersagen zu können. Damit könnte nicht nur der spezifische Testfall für die Fahrzeugzulassung überprüft werden, sondern auch die Auswirkungen auf Szenarien, die im alltäglichen Straßenverkehr auftreten, besser untersucht werden.

Aus den trainierten und validierten Modellen werden die Einflussgrößen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch identifiziert. Bei physikalischen und einigen datenbasierten Modellen (z. B. lineare Regression oder Entscheidungsbäume) ist dies direkt durch Parameteranalyse möglich. Bei datenbasierten Modellen, die für den Anwender nur als Black Box nutzbar sind, werden entsprechende post hoc Analysen der Modelle durchgeführt.

Ableiten von Maßnahmen

Aus den entwickelten Prognosemodellen werden schließlich konkrete Maßnahmen zur Lärminderung abgeleitet und in Handlungsempfehlungen formuliert. Dies können beispielsweise Maßnahmen zur Reifen-, Fahrzeug- oder Fahrbahngestaltung sein. Ebenso können die Erkenntnisse in die Normung und Gesetzgebung einfließen, z. B. für die auf EU-Ebene geplanten „Real Drive Noise Emissions“. Auch eine bessere Korrektur des Fahrbahneinflusses bei genormten ISO-Teststrecken (vgl. MISOR-Projekt [4]) wird angestrebt.

Projektbegleitende Maßnahmen

Begleitend zu den anderen Arbeitspaketen finden die folgenden Tätigkeiten statt.

Bereitstellung und Weiterentwicklung von (KI-) Methoden

Da der zentrale Bestandteil dieses Projektes die Anwendung bisher nicht genutzter Methoden zur Prognose des Reifen-Fahrbahn-Geräusches ist, wird die Entwicklung und Anwendung datenbasierter Methoden in einem eigenen Arbeitspaket vorangetrieben. Dies stellt zum einen sicher, dass gängige Fehler bei der Versuchsplanung und Datenanalyse vermieden werden und somit eine hohe Daten- und letztlich Prognosequalität erreicht wird. Darüber hinaus werden im Projekt bisher nicht berücksichtigte statistische und maschinelle Lernverfahren zur Verbesserung bestehender Prognosemodelle eingesetzt. Diese Methoden werden recherchiert und für die Anwendung aufbereitet.

Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Neben dem klassischen Projektmanagement, wie der Organisation von Meilensteintreffen und Workshops mit den assoziierten Partnern, liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Veröffentlichung der Projektergebnisse. So wird die Publikation der Ergebnisse nicht nur in Form von

Journal- und Konferenzbeiträgen erfolgen, sondern auch die Messdaten selbst werden unter Einhaltung der FAIR-Prinzipien [11] veröffentlicht. Hierfür werden verschiedene Plattformen wie die Mobilithek, Zenodo, FID move, RADAR4KIT und andere in Betracht gezogen. Ebenso wird eine Beschreibung der Datensätze in speziellen Datenjournalen wie z. B. Nature Scientific Data angestrebt.

Neben den Daten selbst werden auch die Software zur Verarbeitung der Daten sowie die entstehenden Modelle möglichst als Open Source veröffentlicht, um eine einfache Nachnutzung der Projektergebnisse zu ermöglichen. Auch hier werden etablierte Plattformen wie Gitlab, Github, Huggingface, Kaggle oder Softwarejournals auf ihre Eignung geprüft.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt TyreRoadNoise hat zum Ziel, mit einfachen Methoden umfangreiche Daten zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei konstanter und beschleunigter Fahrt zu erheben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer großen Anzahl von Reifen-Fahrbahn-Kombinationen und Betriebsbedingungen. Die Messungen werden sowohl auf abgesperrten ISO-Fahrbahnen als auch auf öffentlichen Straßen im fließenden Verkehr durchgeführt. Auf Basis der Messdaten werden physikalische und datenbasierte Prognosemodelle erstellt. Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, die Geräuschentwicklung unter anderen Bedingungen vorherzusagen, relevante Einflussgrößen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch zu identifizieren und Maßnahmen zur Minderung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches aufzuzeigen. Die Messdaten, die Werkzeuge zur Datenverarbeitung sowie die Prognosemodelle werden so weit wie möglich öffentlich zugänglich gemacht.

Derzeit werden die Vorbereitungen für die Messungen abgeschlossen (z. B. Auswahl der Strecken, Festlegung des Messplans, Beschaffung der Messtechnik). Als nächster Schritt werden Vorversuche mit einem Fahrzeug durchgeführt. Interessierte sind herzlich eingeladen, sich an der Diskussion zum Thema Reifen-Fahrbahn-Geräusch im Rahmen des Projektes zu beteiligen.

Danksagung

Folgenden Projektpartnern möchten wir danken: Janis Klaus (AUDI), Friedemann Vogel (AUDI), Wolfram Bartolomaeus (BAST), Esther Chevalier (BAST), Michael Chudalla (BAST), Adrian Fazekas (BAST), Igor Müller (BAST), Fabio Strigari (BAST), Borge Wasser (BAST), Rozenn Garaud (BMW), Michael Steffan (Continental Reifen), Michael Breiter (EYES), Min-Bin Lin (KIT-AIFB), Michael König (KIT-FAST), Jiawen Meng (KIT-FAST), Matthias Vollat (KIT-FAST), Gregor Richartz (Porsche), Thomas Kotschenreuther (RA Consulting), Armin Rupalla (RA Consulting), Veljko Vučinić (RA Consulting), Nora Braun (RWTH-ISAC), Ingo Hapke (VW) und Anne-Kathrin Ringel (VW). Außerdem danken wir André Hinträger und Alexander Attenberger (Bay. LfU) für die Unterstützung beim Aufbau des ATM.

Information zum Einsatz von KI

Diese Veröffentlichung wurde mit Hilfe von Deepl Write sprachlich überarbeitet.

Förderhinweis

Das Projekt TyreRoadNoise hat ein Gesamtvolumen von 3,7 Mio. Euro und wird im Rahmen der Innovationsinitiative mFUND mit 3 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert.

Literatur

- [1] Belz, J.; et al.: Umweltbewusstsein in Deutschland 2020: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. BMUV, Berlin und UBA, Dessau-Roßlau, 2022
- [2] World Health Organization: Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization, Regional Office for Europe, Kopenhagen, 2011
- [3] Seidler, A.; et al.: Einfluss des Lärms auf psychische Erkrankungen des Menschen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2023
- [4] Klaus, J.; Vogel, F.: MISOR – ein Ansatz zur exakten Beschreibung des Reifen-Fahrbahngeräusches. Fortschritte der Akustik – DAGA 2023, 49. Jg., 2023, S. 479-481
- [5] Gauterin, F.; et al.: Projekt TyreRoadNoise – Data-based study of effects on controlled and real drive noise emission. Vorhabenbeschreibung, Karlsruhe, 2023
- [6] Masino, J.: Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Dissertationsschrift, Karlsruhe, 2020
- [7] Krauss, O.; Gauterin, F.: Abschlussbericht Akustische Torusmessmethode – ATM (P.2702). Abschlussbericht, Karlsruhe, 2013
- [8] Hinträger, A.; Attenberger, A.: Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen: AQuStra II. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2023
- [9] Arndt, S. et al. Metadata4Ing: An ontology for describing the generation of research data within a scientific activity. Zenodo, 2023, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10022363>
- [10] Schliephake, C.; Böttcher, T.: Braunkohlereviere als attraktive Lebensräume durch Straßen-geräuschsimulation auf Basis bestehender Verkehrsdaten zur Minimierung von Lärm – BaL-SaM. Forschungsprojekt, RWTH Aachen, 11.2022-10.2025, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/balsam.html>
- [11] Wilkinson, M.; et al.: The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3, 160018, 2016
- [12] Beckenbauer, T.; et al.: Tyre-road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models-part 1. Journal of the Acoustical Society of America 123.5 (2008), 3388-3388