LÄRMBLITZER

Bericht zur Analyse der vom Lärmblitzer erfassten lauten Kraftfahrzeuge und deren Lärmwirkungspotenzial

Senatsverwaltung
für Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt

BERLIN

IMPRESSUM

AUFTRAGGEBERIN
Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt
Umweltpolitik, Kreislaufwirtschaft und Immissionsschutz/Immissionsschutz
Am Köllnischen Park 3
10179 Berlin
www.berlin.de/sen/mvku/

AUFTRAGNEHMERIN
TU Berlin
Fachgebiet Technische Akustik, Bereich Psychoakustik
Straße des 17. Juni
10785 Berlin

BILDNACHWEISE
Titelbild: Marc Vorwerk

STAND
01/2025

Diese Studie/dieses Gutachten/dieser Bericht wurde im Auftrag der Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt (SenMVKU) erstellt. Für die Inhalte zeichnet das Auftrag nehmende Unternehmen verantwortlich. Die SenMVKU macht sich die Positionen nicht automatisch zu eigen. Sie übernimmt keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität der bereitgestellten Informationen.

INHALT

Impressum ... 1
Einleitung ... 3
Hintergrund und Problemstellung ... 4
Gesetzliche Maßnahmen in der Europäischen Union ... 5
Maßnahmen zur Bekämpfung von verhaltensbedingtem straßenverkehrslärm in Deutschland und Frankreich ... 5
Lärmblitzer in anderen Ländern ... 8
Das Lärmblitzersystem „Hydre“ ... 10
Schallquellencharakterisierung mithilfe von Mikrofonarrays ... 10
Diskussion von potenziellen Fehlmessungen ... 12
Psychoakustische Auswertung der Daten ... 14
Was ist die Psychoakustik ... 14
Psychoakustische Analyse der erfassten Kraftfahrzeuge ... 15
Psychoakustische Lästigkeit und Schalldruckpegel ... 20
Psychoakustische Lästigkeit von Ausreißern ... 22
Vergleich der Leistung von Kfz mit der psychoakustischen Lästigkeit ... 23
Psychoakustische Lästigkeit über Wochentage und Uhrzeit ... 24
Einfluss von Wetterereignissen auf die erfassten Geräusche ... 25
Klassifizierung der Geräusche mittels Künstlicher Intelligenz ... 26
Identifizierbarkeit lärmprovozierender Fahrweisen: KI-Methode und akustische Merkmale 26
Identifizierbarkeit der Fahrweise: Labeln der Daten ... 26
Identifizierbarkeit der Fahrweise: Ergebnisse der KI-Modelle ... 27
Identifizierbarkeit der Fahrweise: Auswirkung der Fahrweise auf die psychoakustische Geräuschemission ... 27
Identifizierbarkeit von technisch manipulierten Kraftfahrzeugen ... 28
Fazit & Ausblick ... 30
Psychoakustische Größen als zusätzliche Information zur Bewertung lauter Kraftfahrzeuge ... 30
Ableitung einer Dezibelgrenze für Fahrzeugklassen ... 31
Automatische Erfassung technisch manipulierter Kraftfahrzeuge und lärmprovozierender Fahrweisen ... 32
Literaturverzeichnis ... 33
Abbildungsverzeichnis ... 35
Tabellenverzeichnis ... 36
Anhang ... 36

EINLEITUNG

Die zunehmende Lärmbelastung durch den Straßenverkehr stellt in urbanen Gebieten eine wachsende Herausforderung dar. Besonders auf stark frequentierten Straßen wie dem Kurfürstendamm in Berlin wirkt sich der Verkehrslärm erheblich auf die Lebensqualität der Anwohnenden und Passanten aus. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde im Sommer 2023 eine Pilotstudie durchgeführt, in deren Rahmen eine Technologie zur Erfassung besonders lauter Kraftfahrzeuge, das sogenannte Hydre-System, erprobt wurde. Dabei wurde – neben der Bestandsaufnahme zur Häufigkeit übermäßig lauter Kraftfahrzeuge – insbesondere die Funktionsfähigkeit des Systems betrachtet, um lärmprovozierende Fahrweisen zu erfassen. Daneben wurden die mit dem Lärmblitzer erfassten Geräusche lauter Kraftfahrzeuge bezüglich psychoakustischer Eigenschaften näher betrachtet, um eine verbesserte Abschätzung der resultierenden Lärmbelästigung vorzunehmen.

Nach erfolgreicher Durchführung der Pilotstudie wurden die gesammelten Daten daher zur weiteren technischen Analyse an die Technische Universität Berlin (Fachgebiet Technische Akustik, Schwerpunkt Psychoakustik) übergeben und in einer wissenschaftlichen Arbeit bezüglich psychoakustischer Merkmale näher untersucht (Kolingba, 2024). In der Analyse wurden Erkenntnisse über die akustischen Eigenschaften der erfassten Vorbeifahrten, das Fahrverhalten und potenziell lärmverursachende Fahrmanöver gewonnen.

Das Ziel dieses Berichts ist es, eine Debatte über die automatisierte Erfassung von lauten Kraftfahrzeugen mittels neuartiger Technologien sowie die Diskussion für maximale zulässige Schalldruckpegel von Kraftfahrzeugen im realen Fahrbetrieb anzustoßen. Auch wenn es im Rahmen der Technologieerprobung nicht möglich ist, einen Schalldruckpegelgrenzwert belastbar abzuleiten, liefern die analysierten Daten dennoch wichtige Anhaltspunkte und Erkenntnisse. Die nachgelagerte psychoakustische Untersuchung der erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge beschäftigte sich mit den wesentlichen Geräuscheigenschaften. Besonders bei Fahrzeugklassen, bei denen in einigen Fällen erhebliche Schalldruckpegel erfasst wurden, stellt sich die Frage nach den Ursachen. Liegen die Gründe in einer lärmprovozierenden Fahrweise, in technischen Manipulationen oder in Schäden und technischen Mängeln oder in anderen Faktoren? Darüber hinaus wurde untersucht, ob besonders laute Fahrweisen sowie technisch manipulierte Kraftfahrzeuge (zum Beispiel durch Tuning) maschinell klassifiziert werden können. Hierbei wurden die verwendeten Algorithmen an Daten getestet, die zuvor nicht im Training der Modelle künstlicher Intelligenz verwendet wurden, um die Erkennungsleistung für unbekannte Daten bewerten zu können. Derartige Methoden könnten langfristig dazu beitragen, die Ursachen bei geräuschauffälligen Kraftfahrzeugen automatisch zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Die vorliegende Untersuchung basiert auf Audio- und Videodaten, die mithilfe des Lärmblitzersystems Hydre von BruitParif am Kurfürstendamm in Berlin erfasst wurden. In der Testphase zwischen dem 04. Juni 2023 und dem 26. Juli 2023 wurden insgesamt 2.642 Kraftfahrzeuge erfasst, die mindestens einen Schalldruckpegel (L_{AFmax}) von über 82 Dezibel (A-bewertet) erreichten. Zu den erfassten Fahrzeugklassen zählen unter anderem Personenkraftwagen (Pkw), Krafträder (Krad), Lastkraftwagen (Lkw), Busse, Oldtimer, Quads (kleine geländegängige Kraftfahrzeuge auf vier Rädern) sowie Einsatzfahrzeuge der Polizei, Feuerwehr und Krankenwagen. Ebenfalls erfasst wurden Kraftfahrzeuge (zumeist Straßenreinigungs- und Bewässerungsfahrzeuge) der Berliner Stadtreinigung (BSR) und Busse des öffentlichen Personennahverkehrs (BVG). Die Analyse dieser Daten umfasste sowohl eine psychoakustische Bewertung als auch die Anwendung maschineller Lernverfahren, um Rückschlüsse über die automatische Erkennbarkeit bestimmter Fahrweisen und mögliche lärmprovozierende Fahrmanöver zu ziehen.
Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass eine maschinelle Erkennung von lärmprovozierenden Fahrweisen grundsätzlich möglich ist. Ferner bieten die gewonnenen Erkenntnisse eine Grundlage für weiterführende Diskussionen zur Erfassung übermäßig lauter Kraftfahrzeuge sowie über mögliche regulatorische Maßnahmen.

Hintergrund und Problemstellung

Viele Studien belegen, dass eine langfristige Belastung durch Verkehrslärm gesundheitsschädlich ist (WHO, 2018). Laut Daten von 2017, die gemäß der EU-Richtlinie über Umgebungslärm erfasst wurden (EU, Umgebungslärmrichtlinie., 2002), fühlen sich in der EU mindestens 18 Millionen Menschen durch Verkehrslärm stark belästigt, 5 Millionen davon leiden unter Schlafstörungen[1]. Durch Verkehrslärm sind zahlreiche gesundheitliche Auswirkungen umfangreich belegt (WHO, 2009). Beispielsweise wird geschätzt, dass statistisch gesehen jährlich über 3.000 Todesfälle durch ischämische Herzerkrankungen verhindert werden könnten, wenn die Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur Reduzierung des Straßenverkehrslärms auf 53 Dezibel (A-bewertet) als L_{DEN}[2] eingehalten würden (Khomenko, et al., 2022). Jedoch sind nach wie vor rund 60 Millionen Menschen in Europa einem verkehrslärmbedingten Tag-Abend-Nacht Lärmindex (L_{DEN}) von über 55 Dezibel (A-bewertet) ausgesetzt (Khomenko, et al., 2022).

Die ambitionierten Empfehlungen der WHO finden derzeit in Deutschland, wie auch in vielen anderen Ländern, noch keine Anwendung. Die Umsetzung der europäischen Richtlinien erfolgt hierzulande durch Rechtsverordnungen der Bundesregierung. Diese Verordnungen legen Lärmindizes fest, bewerten gesundheitliche Risiken, informieren die Öffentlichkeit durch Lärmkarten und Lärmaktionspläne und definieren Kriterien für konkrete Lärmschutzmaßnahmen. Das Land Berlin hat 2008 als Schwellenwerte für die Dringlichkeit von Maßnahmenprüfungen im Lärmaktionsplan (LAP) Berlin zwei Stufen definiert:

— 1. Stufe: 70 Dezibel (A-bewertet) für L_{DEN} und 60 Dezibel (A-bewertet) für L_{Night}
Bei Überschreitung dieser Werte sollen prioritär und möglichst kurzfristig Maßnahmen zur Verringerung der Gesundheitsgefährdung ergriffen werden.

— 2. Stufe: 65 Dezibel (A-bewertet) für L_{DEN} und 55 Dezibel (A-bewertet) für L_{Night}
Diese Werte dienen im Rahmen der Vorsorge als Zielwerte für die Lärmminderungsplanung. Langfristig plant das Land Berlin geringere Zielwerte anzustreben.[3]

Die Lärmbelastung ist durch die Grundlast des Straßenverkehrs sehr hoch und wird durch individuelles unangepasstes Fahrverhalten noch zusätzlich verstärkt. Besonders in stark belasteten urbanen Gebieten, wie dem Kurfürstendamm in Berlin, zeigt sich die Notwendigkeit, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen, wie Lärmdisplays, Hinweistafeln, gezielte Kontrollen und die Ahndung von Verstößen.[4]

Ein zentrales Problem, das immer stärker in den Fokus rückt, ist das Phänomen der sogenannten „Lärmposer“. Das sind Kraftfahrzeugführende, die durch bewusste Manipulationen oder aggressive Fahrweise das Geräuschaufkommen erheblich steigern und eine erhöhte Lärmbelästigung der Anwohnenden bewusst in Kauf nehmen. Dies ist kein regional begrenztes Phänomen, sondern eine europaweit zunehmende Problematik. Kraftfahrzeuge erfüllen zwar aufgrund der Typenzulassung akustische Anforderungen, die unter kontrollierten Bedingungen normgerecht ermittelt werden, jedoch in der Realität sind viele Kraftfahrzeuge auf der Straße deutlich lauter. Gründe dafür können vielfältig sein. Beispielsweise illegale Manipulationen wie das Entfernen oder Verändern von Auspuffanlagen oder auch aggressive Fahrweisen, wie schnelles Beschleunigen oder starkes Abbremsen, können zu deutlich lauteren Geräuschen führen. Die Überwachung dieser Kraftfahrzeuge ist bisher auf punktuelle Kontrollen durch die Polizei beschränkt. Im Verdachtsfall können Beamte nur durch einfache Schallpegelmessungen der Leerlaufgeräusche oder durch optische Prüfungen der Kraftfahrzeuge Verstöße ermitteln. Hier setzt das Pilotprojekt „Lärmblitzer“ am Kurfürstendamm an, indem neue technische Möglichkeiten einer automatisierten Erfassung von übermäßig lauten Kraftfahrzeugen erprobt werden.

---

[1] Health impacts of exposure to noise from transport. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/health-impacts-of-exposure-to-1 Zugriff am 11.12.2024.
[2] L_{DEN} – Tag-Abend-Nacht Lärmindex (energieäquivalenter Schalldruckpegel mit Tageszeitzuschlägen).
[3] Vgl. https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/laerm/laermminderungsplanung-berlin/, Zugriff am 18.12.2024.
[4] Schutz vor Straßenverkehrslärm: So geht's, https://www.adac.de/verkehr/standpunkte-studien/positionen/laermschutz, Zugriff am 11.12.2024.

Gesetzliche Maßnahmen in der Europäischen Union

Zur Reduktion der Verkehrslärmbelastung wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Der EU-Aktionsplan „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“[5] zielt darauf ab, im Vergleich zu 2017 die Anzahl der durch Verkehrslärm betroffenen Personen bis zum Jahr 2030 um 30 Prozent zu verringern. Die europäische Umgebungslärmrichtlinie fordert von den Mitgliedstaaten die Erstellung von Lärmkarten und die Entwicklung von Lärmaktionsplänen, mit denen Lärmprobleme und deren Auswirkungen geregelt werden (EU, Umgebungslärmrichtlinie., 2002). In diesen Plänen legen die Kommunen Maßnahmen zur Minderung der Lärmbelastung fest, wobei die Beteiligung der Öffentlichkeit ein wesentlicher Bestandteil ist. Auf Grundlage von Lärmkarten werden Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen, der Einsatz lärmmindernder Fahrbahnbeläge oder die Förderung von Elektrofahrzeugen erarbeitet. Ziel ist auch, ruhige Gebiete zu identifizieren und vor einer Zunahme des Verkehrslärms zu schützen. Die Lärmaktionsplanung liegt in der Verantwortung der Gemeinden oder der nach Landesrecht zuständigen Behörden. Diese definieren Schwellenwerte für die Dringlichkeit von Maßnahmenprüfungen. Dabei ist die Öffentlichkeit, wie oben erwähnt, rechtzeitig und effektiv zu beteiligen sowie über die getroffenen Entscheidungen zu unterrichten. Prioritäten werden dabei nach der Überschreitung von Auslösewerten oder anderen Kriterien verwendet. Zur Unterstützung der zuständigen Behörden hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) „Hinweise zur Lärmaktionsplanung“[6] erstellt.

Maßnahmen zur Bekämpfung von verhaltensbedingtem straßenverkehrslärm in Deutschland und Frankreich

In Deutschland gibt es einige gesetzliche Regelungen, die darauf abzielen, den Straßenverkehrslärm zu reduzieren, allerdings sind diese in ihrer Wirkung begrenzt. Eine wesentliche Vorschrift ist in § 30 Abs. 1 Satz 1 der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) verankert. Diese Regelung besagt, dass es verboten ist, *unnötigen Lärm* durch den Fahrzeugbetrieb zu verursachen. Die Durchsetzung dieses Verbots erfolgt durch polizeiliche Kontrollen und basiert auf Einzelfallentscheidungen. Dabei wird geprüft, ob die Geräuscherzeugung über das bei sachgerechter Nutzung notwendige Maß hinausgeht. Besonders relevant sind Verhaltensweisen wie starkes Beschleunigen, Hochdrehen des Motors oder plötzliche Bremsmanöver.

Zusätzlich zu den gesetzlichen Regelungen treten in einigen Städten spezialisierte Sonderkommissionen (SOKOs) in Aktion, die sich gezielt mit Autoposern, Rasern und illegalem Tuning auseinandersetzen. Eine der bekanntesten und erfolgreichsten Einheiten dieser Art ist die Einheit „Autoposer“ in Hamburg. Sie besteht aus Polizeibeamten, die sich auf Fahrzeugtechnik spezialisiert haben. Bei polizeilichen Kontrollen von verdächtigen Fahrzeugen, insbesondere wenn diese durch laute Geräusche oder auffälliges Fahrverhalten die Aufmerksamkeit auf sich ziehen, wird das Kraftfahrzeug gestoppt und die Betriebserlaubnis geprüft. Sie untersuchen anschließend sorgfältig den Bereich unter dem Fahrzeug, um die Abgasanlage zu prüfen und die Position sowie die Einstellung des Schalldämpfers zu bewerten.

Eines der Hauptinstrumente bei diesen Kontrollen ist der Einsatz eines Schallpegelmessers, der bei definierter Messposition den durch die Abgasanlage emittierten Schalldruckpegel bestimmt[7]. Überschreitet das Fahrzeug den zulässigen Grenzwert, wird es entweder direkt stillgelegt oder einer weiteren technischen Prüfung unterzogen. In solchen Fällen wird das Fahr-

[5] European Environment Agency (2017). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400, Zugriff am 11.12.2024.
[6] https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/lai-hinweise-zur-laermaktionsplanung-dritte-aktualisierung_1667389269.pdf, Zugriff am 11.12.2024.
[7] Das Messgerät muss in Höhe der Auspuffmündung mindestens 20 Zentimetern über dem Boden, im Abstand von 50 Zentimetern und in einem Winkel von 45 Grad plus, minus 10 Grad zur Ausströmungsöffnung aufgestellt werden.

zeug später von einem Sachverständigen näher untersucht, um festzustellen, ob die Modifikationen illegal sind[8]. In Deutschland gelten für Autoposer, die durch erhebliche unnötige Geräuscherzeugung oder illegales Tuning auffallen, eindeutige Sanktionen. Verstöße gegen die Vorschriften führen zu Bußgeldern, Punkten im Fahreignungsregister oder sogar zur Stilllegung des Fahrzeugs. Beispielsweise müssen Fahrzeugführende, die durch übermäßigen und unnötigen Lärm auffallen, mit einem Bußgeld von 80 Euro rechnen. Fahren sie innerorts unnötig hin und her und belästigen dadurch andere Verkehrsteilnehmende, drohen 100 Euro Strafe.
Sollte das Fahrzeug aufgrund unerlaubter Modifikationen keine gültige Betriebserlaubnis besitzen und dadurch die Verkehrssicherheit beeinträchtigt sein, können weitere Bußgelder von 90 Euro und ein Punkt im Fahreignungsregister verhängt werden[9].

In Frankreich wurden in den letzten Jahren gesetzliche Veränderungen auf den Weg gebracht, die die Einführung automatisierter Sanktionen für übermäßig laute Kraftfahrzeuge ermöglichen. Die Verordnung vom 07. Juli 2023 im Rahmen des Dekrets Nr. 2022-1 vom 03. Januar 2022 regelt die Erfassung von Geräuschemissionen durch fest installierte sowie mobile automatische Kontrolleinrichtungen. Grundlage hierfür ist die Anpassung von Artikel L. 130-9 der französischen Straßenverkehrsordnung (Code de la route) durch das Gesetz Nr. 2022-217 vom 21. Februar 2022. Ein erster Schwellenwert wurde auf 85 Dezibel (A-bewertet) L_{AFmax} festgesetzt, der auf eine Entfernung zum Fahrzeug von 7.5 Metern bezogen ist und für motorisierte Fahrzeuge gilt, die innerorts bei Straßen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von maximal 50 Kilometer pro Stunde fahren. Ausnahmen betreffen ältere Kraftfahrzeuge bestimmter Kategorien abhängig vom Erstzulassungsdatum[10]. Diese Änderungen ebnen den Weg, um in Zukunft Lärmverstöße automatisiert erfassen und sanktionieren zu können.

Das im Pilotprojekt genutzte Messsystem (Hydre vom Hersteller Bruitparif) befindet sich aktuell im Zulassungsverfahren und nach der Homologation könnten automatisiert Strafen (Bußgelder) verhängt werden. Während die Zulassung die Genehmigung zur praktischen Nutzung eines Geräts beschreibt, bezieht sich die Homologation auf den offiziellen Prozess der Anerkennung und Standardisierung durch die zuständigen Behörden. In Frankreich wurde das Hydre-System bereits für den Einsatz zugelassen, auch wenn die vollständige Homologation noch nicht abgeschlossen ist. Das bedeutet, dass es bereits in der Praxis verwendet werden kann, während die rechtlichen Grundlagen und Standards für die endgültige Genehmigung noch finalisiert werden müssen.
Zwischen Januar 2022 und Oktober 2022 fand die erste Phase der nationalen Testreihe in Frankreich statt, um die Systeme unter realen Verkehrsbedingungen zu erproben. In dieser Phase wurden noch keine Verstöße festgestellt beziehungsweise noch keine Sanktionen verhängt. Die Erprobungen wurden in verschiedenen Städten Frankreichs durchgeführt, darunter urbane Zentren wie Paris, Nizza und Toulouse sowie ländliche Regionen wie die Communauté de communes de la Haute Vallée de Chevreuse. Ziel dieser Versuche war es, die Leistungsfähigkeit der Lärmblitzertechnologie zu untersuchen und Kraftfahrzeuge, die die festgelegten Schalldruckpegelgrenzwerte überschreiten, zu erfassen.
Bruitparif bewertete die Ergebnisse dieser ersten Phase als vielversprechend, da das Hydre-System in der Lage war, übermäßig laute Kraftfahrzeuge in einem Umkreis von etwa 15 Metern beidseitig des Radars, selbst in komplexeren Verkehrssituationen mit mehreren Kraftfahrzeugen, zu erkennen. Während der Testphase konnte das System Hydre je nach Standort und Verkehrsaufkommen täglich zwischen 10 und 44 Kraftfahrzeuge identifizieren, die den zur Erprobung definierten Grenzwert L_{AFmax} von 83 Dezibel (A-bewertet)[11] überschritten.
Es bleibt abzuwarten, welchen endgültigen Schwellenwert das französische Ministerium festlegen wird. Es ist davon auszugehen, dass der zulässige A-bewertete maximale Schalldruckpegel (L_{AFmax}) voraussichtlich im Bereich von 83 und 90 Dezibel (A-bewertet) liegen dürfte. Der genaue Grenzwert, der beim Überschreiten eine Ordnungswidrigkeit darstellen würde, wird

[8] https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/die_nordreportage/Power-Poser-und-die-Polizei,sendung1265546.html, Zugriff am 11.12.2024.
[9] https://www.bussgeldkatalog.org/autoposer/#bussgeldtabelle, Zugriff am 11.12.2024.
[10] Festgelegt durch das *Arrêté du 7 juillet 2023*, erlassen in Anwendung des *décret n° 2022-1 du 3 janvier 2022* gemäß Artikel L. 130-9 des *Code de la route*, der die Experimentierverfahren zur Feststellung von Lärmemissionen regelt.
[11] https://www.bruitparif.fr/le-prototype-de-radar-sonore-hydre-mis-au-point-par-bruitparif-aux-fins-de-controle-sanction-des-vehicules-excessivement-bruyants, Zugriff am 11.12.2024.

derzeit diskutiert, was sich entscheidend auf die zukünftige Ahndung von Lärmverstößen auswirken wird[12]. Momentan wird ebenfalls erörtert, wie Lärmblitzer formal zugelassen werden und welche maximalen Geräuschgrenzwerte für welche Fahrzeugklassen im realen Fahrbetrieb nicht überschritten werden dürfen. Sollte die Homologation eines Messsystems erfolgreich abgeschlossen werden, würden Lärmverstöße gemäß Artikel R318-3 des Code de la route mit Geldstrafen der vierten Klasse in Frankreich geahndet. Diese Strafen würden bei 90 Euro für die reduzierte Bußgeldzahlung beginnen und bis zu 750 Euro im Rahmen eines gerichtlichen Verfahrens reichen[13].

Die Erprobung derartiger Messgeräte ist von großer Bedeutung, da es den Weg für die Anerkennung und Anwendung einer neuen Technologie ebnen kann, die darauf abzielt, Lärmverstöße zu erfassen, zu ahnden und damit die Lärmbelastung in urbanen Gebieten mittelfristig zu reduzieren. Sollte die Lärmblitzertechnologie in Frankreich erfolgreich homologiert werden, könnte dieser Vorgang künftig eine Schlüsselrolle bei der Durchsetzung von Lärmschutzmaßnahmen im Straßenverkehr spielen, indem laute Kraftfahrzeuge automatisch identifiziert und mit Bußgeldern sanktioniert werden.

[12] https://www.bruitparif.fr/le-prototype-de-radar-sonore-hydre-mis-au-point-par-bruitparif-aux-fins-de-controle-sanction-des-vehicules-excessivement-bruyants, Zugriff am 11.12.2024.
[13] https://www.bruitparif.fr/pages/Thematiques/900%20Bruit%20du%20trafic%20routier/500%20Ressources%20documentaires/2022-03-24%20-%20Le%20Francilophone%20N°38%20-%20Spécial%20radars%20sonores.pdf, Zugriff am 11.12.2024.

Lärmblitzer in anderen Ländern

Zur Überwachung und Ahndung von Lärmverstößen werden weltweit bereits seit einigen Jahren verschiedene Technologien wie Lärmblitzer und Lärmkameras eingesetzt, die den Schalldruckpegel vor Ort erfassen und häufig mit Technologien zur Geräuschquellenortung ausgestattet sind. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht mit weltweit dokumentierten Lärmblitzern und deren Eigenschaften (entnommen aus (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022)).

Tabelle 1. Übersicht über eingesetzte Lärmblitzer (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022)

Stadt, Land	System	Pegelschwelle in Dezibel (A-bewertet)	Quellenortung	Verhängung von Sanktionen
London, UK	Intelligent Instruments Ltd.	80	nein	ja
Taiwan	unbekannt	86	unbekannt	Bußgeld und Inspektion
Abu Dhabi, VAE	Eigenentwicklung	95	nein	ja
New York City, USA	Intelligent Instruments Ltd.	85	nein	Bußgeld und Inspektion
Frankreich	ACOEM, Viginoiz, MicrodB	85	ja	ja
Genk, Belgien	Nokia, MyCSN und G4S	unbekannt	nein	nein
Knoxville, USA	Intelligent Instruments Ltd.	90	nein	nein
Edmonton, Kanada	unbekannt	95	nein	nein
NEMO, EU	MüllerBBM, M+P, SINTEF, („N-RSD“)		ja	nein

In Nordamerika werden Lärmblitzersysteme zunehmend getestet. In New York (USA) werden seit Februar 2022 Lärmblitzer eingesetzt, die bei 85 Dezibel (A-bewertet) L_{AFmax} auslösen. In Edmonton (Kanada) wurden übermäßig laute Kraftfahrzeuge ab einem Grenzwert von 95 Dezibel (A-bewertet) L_{AFmax} erfasst. In Asien nutzen Länder wie China, Indien und Taiwan Lärmblitzertechnologien zur Überwachung von Lärmverstößen. Beispielsweise werden in China Systeme mit Mikrofonen und Kameras in mehreren Städten verwendet. Indien testet ähnliche Systeme in Delhi und Taiwan hat bereits seit 2021 ein landesweites Netz von Lärmblitzern etabliert. In der Stadt Abu Dhabi (Vereinigte Arabische Emirate) wird bereits seit 2016 einen Lärmblitzer eingesetzt, der Fahrzeuge ab einem L_{AFmax} - Wert von 95 Dezibel (A-bewertet) erfasst. In der EU ist vor allem der Hydre-Lärmblitzer von Bruitparif zu nennen, der als erstes Lärmblitzersystem mittels Schallquellenortung Sanktionen verhängen soll. Die neue Version des Systems wurde ab September 2024 dem französischen Laboratoire National d’Essai für Homologationstests zur Verfügung gestellt, die bis Anfang 2025 andauern sollen. Anschließend ist für das Frühjahr 2025 eine zweite Testphase unter realen Bedingungen geplant, bei der erstmals Sanktionen in Zusammenarbeit mit vier Gemeinden in der Île-de-France, darunter Paris und die Communauté de communes de la Haute Vallée de Chevreuse, verhängt werden sollen[14].

Insgesamt ist festzustellen, dass weltweit die Erfassung von übermäßig lauten Kraftfahrzeugen mit Hilfe neuartiger Technologien erprobt wird beziehungsweise punktuell Lärmblitzer bereits eingesetzt und Sanktionen verhängt werden. Dabei werden sehr unterschiedliche Grenzwerte genutzt. Die definierten Grenzwerte liegen mehrheitlich in einem Bereich von 80 Dezibel bis 95 Dezibel (A-bewertet), wobei in einigen Ländern für Pkw und Motorräder unterschiedliche

[14] *Expérimentation réussie pour le prototype radar sonore hydre à genève*, Bruitparif, Zugriff am 11.12.2024.

Grenzwerte angewendet werden. Jedoch werden dabei zumindest mehr oder weniger einheitlich der Indikator des maximalen Schalldruckpegels (A-bewertet) benutzt, der auf eine Entfernung von 7,5 Metern bezogen wird (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022). Analog arbeitet das in der Pilotstudie am Kurfürstendamm verwendete Messsystem zur Erfassung übermäßig lauter Kraftfahrzeuge. Dieses System nutzt dabei auch Verfahren zur Quellenortung, um dem durch die anderen Kraftfahrzeuge erzeugten Hintergrundgeräusch zum Zeitpunkt der Erfassung eines lauten Kraftfahrzeugs ausreichend Rechnung getragen.

DAS LÄRMBLITZERSYSTEM „HYDRE“

In der Pilotstudie am Kurfürstendamm wurden die Aufnahmen von lauten Kraftfahrzeugen mit dem Lärmblitzersystem Hydre durchgeführt. Wie Abbildung 1 verdeutlicht, besteht dieses System aus einer Kombination von zwei Einheiten (die sogenannten Medusa-Module), die jeweils mit vier Mikrofonen ausgestattet sind. Diese insgesamt 8 Mikrofone ermöglichen es, den Ursprung des Schalls bei lauten Ereignissen zu lokalisieren.

Abbildung 1: Die verschiedenen Komponenten des Lärmblitzers ”Hydre”. Abbildung von der Website von Bruitparif mit deutscher Übersetzung. URL: https://www.bruitparif.fr/le-radar-sonore-hydre, Zugriff am 10.12.2024

Zudem verfügen die Einheiten über eine 180-Grad-Fischaugenkamera, die als Weitwinkelkamera das gesamte Umfeld erfasst und eine Videoaufnahme der gesamten Szene bei einer potenziellen Regelverletzung ermöglicht. Zwei spezielle Kameras dienen der automatischen Kennzeichenerfassung an der Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs. Zusätzlich sind Sensoren integriert, die Umweltdaten messen. Dazu zählen Druck, Feuchtigkeit, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmengen.

Schallquellencharakterisierung mithilfe von Mikrofonarrays

Der Lärmblitzer verwendet für die akustischen Messungen zwei Subsysteme, die aus jeweils vier MEMS-Mikrofonen bestehen. Mit derartigen Mikrofonarrays (gleichzeitige Verwendung mehrerer Mikrofone) werden die Signale üblicherweise phasensynchron aufgezeichnet. Die Mikrofone eines Subsystems sind hier in einem Abstand von 15 Zentimeter in Tetraederform angeordnet. Bei bekannten Umgebungsbedingungen (insbesondere der Temperatur) ist es mit einer solchen Anordnung möglich, anhand des zeitlichen Versatzes von gleichartigen Signalcharakteristika die Ursprungsrichtung von einseitig einfallenden Schallwellen zu bestimmen (Direction of Arrival, DoA), wenn diese das Schallfeld am Ort der Aufnahme dominieren. Die Verwendung zweier solcher Subsysteme erlaubt eine Triangulation des Ursprungsorts der Quellen, wobei die Genauigkeit der Lokalisation von der Synchronizität der Sensoren, den

verwendeten Signalverarbeitungsalgorithmen, dem Quellort sowie weiteren Quell- und Umgebungseigenschaften abhängt. Je nach verwendeten Verfahren ist darüber hinaus eine Trennung voneinander unabhängiger, gleichzeitig auftretender Signale möglich. [15]

Im hier vorliegenden Fall wird mit Hilfe des Messsystems das lauteste Kraftfahrzeug erfasst und dafür ein Schalldruckpegel trotz gleichzeitiger Anwesenheit weiterer Geräuschquellen ermittelt. Dabei kann in besonders günstigen Fällen auch auf die genaue Quelle der starken Geräuschentwicklung geschlossen werden, wie Motor, Auspuff, Hupe oder Reifen (siehe exemplarisch Abbildung 2).

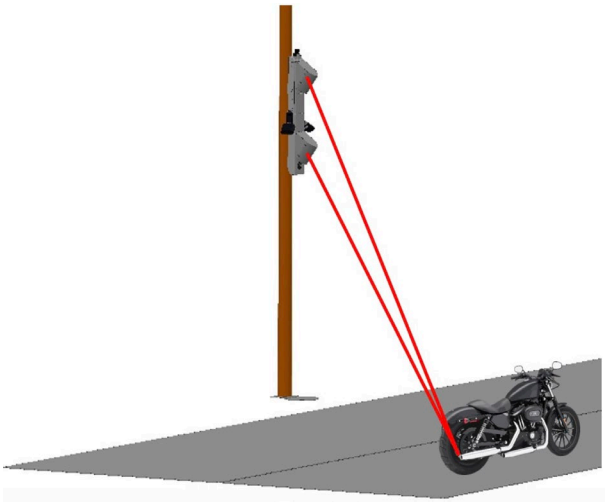


Abbildung 2: Beispielkonfiguration mit dem Hydre-System. Der Fokuspunkt liegt an der Spitze des roten Dreiecks. Abbildung von der Webseite von Bruitparif. https://www.bruitparif.fr/le-radar-sonore-hydre*, Zugriff am 10.12.2024*

Die technische Konfiguration des Systems orientiert sich an den Vorgaben der Norm zur Vorbeifahrtmessung (ISO362-1, 2022). Der Schalldruckpegel (L_p) wird daher mittels des Hydre-Systems auf eine Entfernung von 7,5 Metern der Horizontalen und 1,2 Meter in der Höhe bezogen. Die Erfassungsdauer der erfassten Kraftfahrzeuge variiert zwischen 0,6 und 1 Sekunde. Die Vorbeifahrt wird mit 25 Bildern pro Sekunde dokumentiert. Überschreitet der Schalldruckpegel eine festgelegte Schwelle, wird eine mögliche Verstoßakte auf einer zentralen Datenbank erstellt. Das System sendet dann Schalldruckpegelinformationen, Video- und Audiodaten. Die weitere Analyse und Klassifikation erfolgt zentral in Frankreich und nutzt maschinelles Lernen zur Identifizierung von Fahrzeugklassen und anderen Merkmalen. Die automatisierte Videoverarbeitung erfasst den Zeitraum Sekunden vor und nach dem kritischen Moment des Lärmverstoßes. Anhand der Bilder werden die Position und Bewegungen der Fahrzeuge analysiert, um das Kraftfahrzeug zu identifizieren, das ursächlich für die Überschreitung des Geräuschgrenzwertes verantwortlich ist. Dabei werden, sofern vorhanden, Kennzeichen erfasst, und alle erhobenen Daten - Fotos, Videos, Audiodaten - gespeichert (Mietlicki, Mietlicki, & Bernfeld, 2022).
Für diese Pilotstudie wurden ein Excel-Dokument, Videos (mp4-Format) und Audiodateien (flac-Format) der erfassten Kraftfahrzeuge anonymisiert der TUB zur Verfügung gestellt. Im Excel-Dokument sind Informationen zu den erfassten Fahrzeugen enthalten, wie das Jahr der Erstzulassung, Hersteller, Hubraum in Kubikzentimeter, Motorleistung in Kilowatt, Nennleistung bei Umdrehungen, Standgeräusch in Dezibel (A-bewertet), Fahrgeräusch in Dezibel (A-bewertet), Leergewicht, Anzahl der Achsen, Fahrzeugklasse, Aufbauart und weitere.

[15] Die konkrete Implementierung im Hydre-System ist nicht bekannt und kann daher an dieser Stelle weder genau wiedergegeben noch hinsichtlich Messunsicherheit belastbar bewertet werden. Einige Informationen zum Aufbau des Systems lassen sich dem Patent entnehmen (Frankreich Patent No. Systeme de localisation d'une source sonore, notamment de nuisances sonores provenant de vehicules. FR3131640B1, 2021). In einem Fachbeitrag heißt es zur Funktionsweise des Systems „This multiplicity of microphones makes it possible to detect small time shifts when noise arrives, sufficient to allow the direction of the dominant noise to be reconstructed several times per second with no need of classical beamforming algorithms." (Mietlicki & Mietlicki, Medusa. A new approach for noise management, 2018)

Diskussion von potenziellen Fehlmessungen

Um eine Fehleranalyse durchzuführen, wurde eine Datenbereinigung vorgenommen. Eine Plausibilitätsanalyse zeigte anhand der vorhandenen Daten eine geringe Fehlerquote in der Erfassung lauter Kraftfahrzeuge.[16] Die identifizierten Fehler lassen sich auf verschiedene Arten von Problemen zurückführen. Es wurden insgesamt 56 Aufnahmen identifiziert, die sich bezüglich der vermeintlichen Fehlerquellen wie folgt aufteilen: starke Audioverzerrungen (7), Geräusche hinter dem Blitzer (36), gemischte und dadurch nicht zuverlässig trennbare Schallquellen (10), große Entfernung (3).
Die Aufnahmen mit Geräuschen von hinten (36) entstanden, da die Messungen auf einer Mittelinsel durchgeführt wurden (siehe Abbildung 3). Die Audiodaten wurden in Stereo aufgezeichnet, wodurch die Bewegungsrichtung der Geräuschquellen von links nach rechts nachvollzogen werden kann und falsche Zuordnungen offenkundig werden.

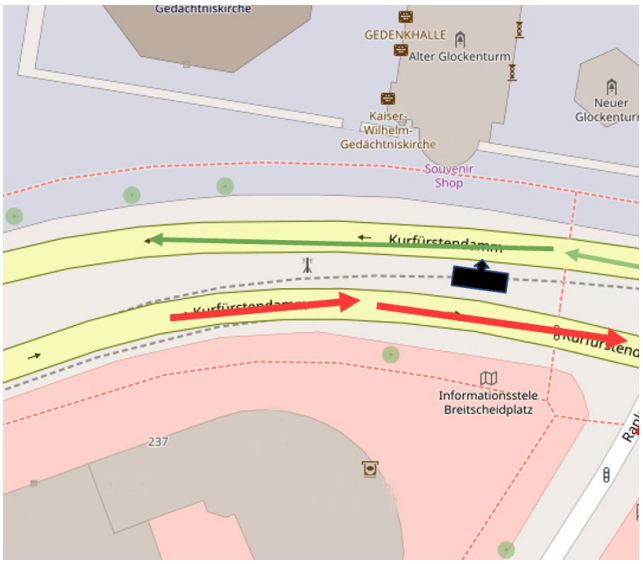


Abbildung 3: Versuchsaufbau am Kurfürstendamm, Berlin. Der Lärmblitzer ist durch ein schwarzes Quadrat gekennzeichnet, der schwarze Pfeil stellt die Aufnahmerichtung der Kamera dar. Die grünen Pfeile stellen die Wege der Fahrzeuge dar, deren Erfassung erwünscht ist, während die roten Pfeile die Wege der Fahrzeuge darstellen, deren Erfassung unerwünscht ist.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, entspricht dies der Fahrtrichtung der Fahrzeuge, die hinter der Kamera vorbeifahren. Diese Bewegungsmuster lassen sich eindeutig in den Audiodaten identifizieren und entsprechen demnach einem Bewegungsmuster, welches nur durch Fahrzeuge hinter dem Hydre entstanden sein kann. Fahrzeuge, die hinter der Kamera vorbeifuhren, führten dazu, dass weniger laute Kraftfahrzeuge, die vor der Kamera fuhren, fälschlich erfasst wurden. Bei zehn Aufnahmen mit dem Problem von gemischten Quellen gestaltete sich die präzise Zuordnung der Schallquellen schwierig. Der Grund dafür war, dass mehrere laute Kraftfahrzeuge gleichzeitig erfasst wurden, wodurch es zu Geräuschüberlagerungen kam, die eine eindeutige Identifikation erschwerten. In den drei Fällen mit großer Entfernung wurde festgestellt, dass die Empfindlichkeit gegenüber dem Schalldruckpegel mit zunehmender Entfernung zunimmt. Bei einer Distanz von über 15 Metern war es beim Sichten der Aufnahmen nicht immer möglich, per Augenscheinvalidität zu bestimmen, ob das Geräusch tatsächlich vom erfassten Kraftfahrzeug stammte. Aufgrund dieser Unsicherheiten war es ratsam, diese Aufnahmen aus der Analyse auszuschließen. Ferner muss erwähnt werden, dass in Berlin die

[16] Die hier identifizierten Probleme bei der Messung basieren ausschließlich auf Plausibilitätsbetrachtungen. Eine genaue Einschätzung der Messunsicherheit war im Rahmen der Pilotstudie nicht möglich und würde umfangreiche zusätzliche Messungen erfordern.

Option der integrierten Wetterstation nicht genutzt werden konnte, wodurch geräteinterne Optimierungen nicht zur Anwendung kamen. Der Einfluss der Wetterbedingungen auf die Datenqualität kann nicht anhand der vorliegenden Daten hinreichend bewertet werden.

Ursprünglich standen 2.593 Audio- und Videoaufnahmen zur Verfügung. Nach der Datenbereinigung, bei der 56 Aufnahmen aufgrund verschiedener offensichtlicher Probleme ausgeschlossen wurden, verbleiben 2.537 formal valide Datenpunkte. In Bezug auf das automatische Kennzeichenerfassungssystem wurden zusätzlich 218 Fahrzeuge nicht korrekt identifiziert. Dies führte zu einer Fehlerquote in der Größenordnung von 10 Prozent.

Seit der Pilotstudie wurden am Gerät weitere technische Verbesserungen vorgenommen. Besonders die Distanzbewertung soll sich laut Hersteller verbessert haben, da zuvor die Messungen vor allem ab einer Entfernung von 15 Metern nicht ausreichend genau waren. Zusätzlich werden laut Hersteller weitere neue Funktionen entwickelt, um verbessert verschiedene Wetterbedingungen bei der Messung berücksichtigen zu können.

PSYCHOAKUSTISCHE AUSWERTUNG DER DATEN

Was ist die Psychoakustik

Die Psychoakustik beschäftigt sich mit der Beziehung zwischen physikalischen Größen und subjektiven Höreindrücken. Zur Untersuchung dieser Beziehungen werden physikalische Parameter wie Schalldruckpegel, Frequenz und Modulationen (periodischen Veränderungen) mittels komplexer Modelle in hörbezogene Parameter umgewandelt. Im Gegensatz zu physikalischen Größen stellen die hörbezogenen Größen - auch als psychoakustische Parameter bezeichnet - eine Abbildung der menschlichen Hörwahrnehmung dar. Eine Verdoppelung einer psychoakustischen Größe entspricht somit einer Verdoppelung des entsprechenden Wahrnehmungsniveaus (Fastl & Zwicker, 2007).

In psychoakustischen Studien werden oft folgende Parameter ausgewertet:

- **Lautheit (N)**: Gemessen in *sone* (oder *phon*), beschreibt sie die wahrgenommene Intensität beziehungsweise Lautstärke eines Geräusches.
- **Schärfe (S)**: Gemessen in *acum*, beschreibt sie, wie „scharf“ oder „zischend“ ein Geräusch wahrgenommen wird. Sie ist ein Maß für die Klangfarbe.
- **Rauigkeit (R)**: Gemessen in *asper*, gibt sie die Stärke von Modulationen eines Geräusches im Bereich von etwa 15 bis 300 Hertz wieder (schnelle Modulationen).
- **Schwankungsstärke (FS)**: Gemessen in *vacil*, gibt sie die Stärke von Modulationen eines Geräusches im Bereich von etwa 1 bis 20 Hertz wieder (langsame Modulationen).
- **Tonalität (T)**: Gemessen in *tonal units* (t.u.), beschreibt sie das Verhältnis von tonalen zu rauschhaften Komponenten eines Geräusches.[17]

Die Lautheit (N) wurde gemäß der Zwicker-Lautheit nach DIN ISO 532-1 (DIN/ISO532-1, 2022) ermittelt. Die Einheit der Lautheit ist *sone*. Ein *sone* ist definiert als ein Ton mit einer Frequenz von 1.000 Hertz und einem Schalldruckpegel von 40 Dezibel.
Die Schärfe (S) wurde gemäß der Norm DIN 45692 (DIN45692, 2009) ermittelt. Die Schärfe wird in *acum* angegeben, wobei ein schmalbandiges Signal (160 Hertz) bei einer Mittenfrequenz von 1.000 Hertz und 60 Dezibel 1 *acum* ergibt. Die Rauigkeit (R) wurde hier nach dem Modell von Daniel und Weber bestimmt (Daniel & Weber, 1997). Die Rauigkeit wird in *asper* gemessen, wobei ein Ton mit 1.000 Hertz mit 60 Dezibel, der zu 100 Prozent mit 70 Hertz moduliert ist, 1 *asper* ergibt. Die Schwankungsstärke (FS) wurde nach dem Modell von Osses et al. ermittelt (Osses, García, & Kohlrausch, 2016). Sie wird in *vacil* angegeben, wobei ein Ton mit 1.000 Hertz mit 60 Dezibel, der zu 100 Prozent mit 4 Hertz moduliert ist, 1 *vacil* ergibt. Die Tonalität (K) wurde nach dem Modell von Aures (Aures, 1985) im vorliegenden Projekt bewertet. Diese Größen wurden mit dem Programm Matlab und der SQAT-Toolbox berechnet. Diese psychoakustischen Parameter sind verhältnisskaliert, was bedeutet, dass ihre Ausprägung im Verhältnis zu einer festgelegten Referenzausprägung steht.
Die erfassten Daten ermöglichen darüber hinaus die Berechnung der **psychoakustischen Lästigkeit (psychoacoustic annoyance (PA))**, beispielsweise nach Fastl und Zwicker (Fastl & Zwicker, 2007) oder unter Berücksichtigung der Tonalität (Tu) nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016). Diese psychoakustische Lästigkeit wird durch eine gewichtete Kombination ausgewählter psychoakustischer Parameter quantifiziert, die es erlaubt, das psychoakustische Störpotenzial von Geräuschen quantitativ abzubilden. Die psychoakustische Lästigkeit ist somit ein Maß zur Ermittlung der Auffälligkeit von Geräuschen (Fastl & Zwicker, 2007). Um die psychoakustische Lästigkeit zu berechnen, sind verschiedene psychoakustische Größen

[17] Normen und Berechnungsverfahren, die im Rahmen der Auswertung verwendet wurden, sind entnommen aus Fastl und Zwicker (Fastl & Zwicker, 2007), DIN ISO 532-1 (DIN/ISO532-1, 2022), DIN 45692 (DIN45692, 2009), Daniel und Weber (Daniel & Weber, 1997), Osses et al. (Osses, García, & Kohlrausch, 2016), und Aures (Aures, 1985).

erforderlich (Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität). Die vollständige Formel zur Berechnung der psychoakustischen Lästigkeit ist im Anhang dargestellt.

Da die Wahrnehmung von Geräuschen auch von deren Dynamik abhängt, werden oft Perzentile verwendet. Diese Werte geben an, wie oft ein bestimmter Wert innerhalb eines Zeitraums überschritten wurde. Zum Beispiel bedeutet das 5. Perzentil der Lautheit N_5, dass dieser Wert in nur 5 Prozent der Messzeit überschritten wurden. Das heißt, in 5 Prozent der Zeit war der gemessene Wert gleich oder höher als der angegebene Wert. Dieser Bericht geht daher im Wesentlichen nur auf die maximalen Lautheitswerte (N_{max}) sowie die Lautheitswerte, die nur in 5 Prozent der jeweiligen Messzeit (N_5) überschritten wurden, ein.

Psychoakustische Analyse der erfassten Kraftfahrzeuge

Werden die erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge bezogen auf die jeweiligen Fahrzeugklassen hinsichtlich deren psychoakustischen Parameter analysiert, ergeben sich mitunter unterschiedliche Ausprägungen. Tabelle 2 zeigt die Mittelwerte der wesentlichen psychoakustischen Parameter über alle erfassten Fahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugklasse sowie die Größe des Interquartilsbereiches, in dem 50 Prozent aller Messwerte liegen. Es ist zu erkennen, dass Einsatzfahrzeuge aufgrund ihrer in der Regel sehr prominenten Warngeräusche eine hohe Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit aufweisen. Dies ist ein plausibles Ergebnis, dienen die emittierten auffälligen Warngeräusche vornehmlich zur Steigerung der Aufmerksamkeit der anderen Verkehrsteilnehmenden.

Tabelle 2: Auflistung der psychoakustischen Ausprägungen über Fahrzeugklassen. Dargestellt sind jeweils der arithmetische Mittelwert (AM) und die Größe des Interquartilbereiches (IQR) ermittelt für sämtliche Vorbeifahrten in der jeweiligen Fahrzeugklasse.

Fahrzeug-klasse	Lautheit N_5 (sone)	Schärfe S_5 (acum)	Rauigkeit R_5 (asper)	Schwankungs-stärke FS_5 (vacil)	Klanghaftigkeit K_5 (tu)
BVG	AM: 25.62, IQR: 5.44	AM: 1.98, IQR: 0.33	AM: 0.09, IQR: 0.02	AM: 0.13, IQR: 0.15	AM: 0.08, IQR: 0.03
Oldtimer	AM: 24.67, IQR: 5.81	AM: 1.79, IQR: 0.13	AM: 0.17, IQR: 0.14	AM: 0.23, IQR: 0.15	AM: 0.12, IQR: 0.03
Krafträder	AM: 26.03, IQR: 7.56	AM: 1.90, IQR: 0.31	AM: 0.19, IQR: 0.29	AM: 0.22, IQR: 0.19	AM: 0.13, IQR: 0.06
Lkw und Busse	AM: 26.61, IQR: 7.04	AM: 1.98, IQR: 0.35	AM: 0.10, IQR: 0.03	AM: 0.13, IQR: 0.19	AM: 0.08, IQR: 0.03
BSR	AM: 30.33, IQR: 6.99	AM: 1.85, IQR: 0.17	AM: 0.10, IQR: 0.01	AM: 0.12, IQR: 0.12	AM: 0.11, IQR: 0.02
Pkw	AM: 26.08, IQR: 10.53	AM: 1.72, IQR: 0.35	AM: 0.12, IQR: 0.08	AM: 0.24, IQR: 0.38	AM: 0.14, IQR: 0.08
Quads	AM: 28.86, IQR: 7.41	AM: 1.65, IQR: 0.31	AM: 0.14, IQR: 0.09	AM: 0.18, IQR: 0.17	AM: 0.12, IQR: 0.03
Einsatzfahr-zeuge	AM: 52.62, IQR: 30.37	AM: 2.23, IQR: 0.39	AM: 0.10, IQR: 0.09	AM: 0.36, IQR: 0.53	AM: 0.15, IQR: 0.07

Schaut man sich im Boxplot in der Abbildung 4 die Verteilung der ermittelten Lautheitswerte (N_5) über die Fahrzeugklassen an, wird deutlich, dass die Klassen Einsatzfahrzeuge, BSR-Fahrzeuge und die Fahrzeuge vom Typ Quad die vom Lärmblitzer erfassten durchschnittlich lautesten Fahrzeugklassen sind. Boxplots geben eine anschauliche Darstellung der Verteilung der berechneten Werte an. Sie stellen zentrale Tendenzen, Streuungen und mögliche Ausreißer innerhalb von Datensätzen visuell dar, bieten damit eine kompakte Übersicht über die Daten und erleichtern den Vergleich zwischen unterschiedlichen Gruppen.
Die anderen Fahrzeugklassen liegen dagegen im Mittel in einem ähnlichen Lautheitsbereich. BSR-Fahrzeuge wie auch Quads sind häufig mit leistungsstarken Motoren ausgestattet, die im

höheren Drehzahlbereich betrieben werden. Zudem weisen diese Modelle oft eine unzureichende Motorabschirmung auf. Es gilt zu erwähnen, dass mehrere Ereignisse in der Fahrzeugkategorie der BSR-Fahrzeuge auf ein einzelnes Fahrzeug zurückzuführen sind. Eine gezielte Überprüfung des kommunal genutzten Kraftfahrzeugs könnte Aufschluss über diese akustische Auffälligkeit bringen.

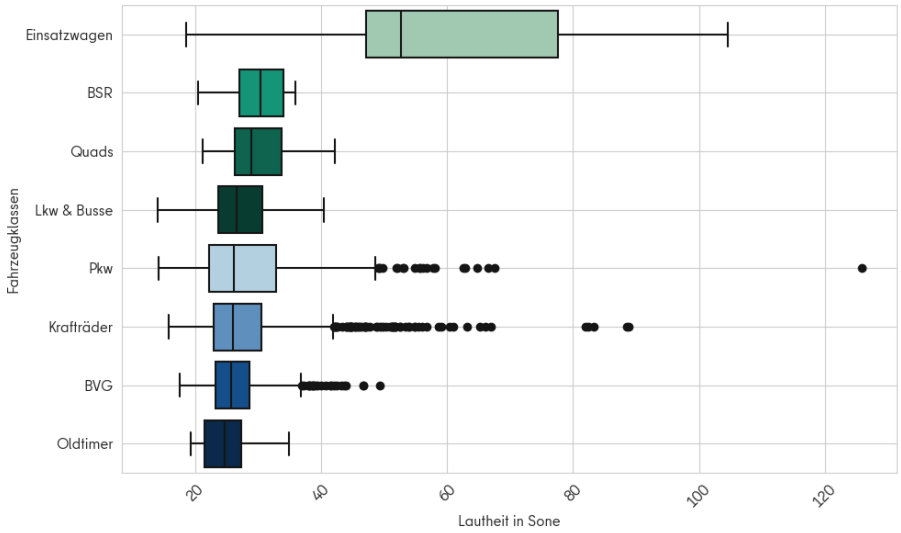


Abbildung 4: Boxplots der Lautheitswerte N_5 nach Fahrzeugklassen nach Medianwerten absteigend sortiert.[18]

Darüber hinaus sind in der Abbildung 5 verschiedene psychoakustische Ausprägungen für zusammengefasste Fahrzeugklassen graphisch mittels Boxplots dargestellt. Hierbei werden die leichten Kraftfahrzeuge (LF) den Krafträdern (Krad) und schweren Kraftfahrzeuge (SF) gegenübergestellt[19]. Hier ist zu erkennen, dass die Lautheit im Mittel über die erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge in den Oberkategorien kaum erheblich variiert. Lediglich in der Klasse der Krafträder treten häufiger Ausreißer auf, das heißt Ereignisse, die viel lauter sind als der Großteil der erfassten Fahrzeuge in dieser Kategorie. Größere Unterschiede zwischen den Klassen sind ferner noch bezüglich Schärfe und Tonalität festzustellen.

Bevor im Folgenden auf die kombinierte Größe der psychoakustischen Lästigkeit detailliert eingegangen wird, ist ein Blick auf die Unterschiede zwischen Schalldruckpegel und Lautheit interessant. In der Abbildung 6 ist ein entscheidendes Ergebnis graphisch dargestellt. Es zeigte sich, dass im Mittel bei gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel Krafträder und schwere Kraftfahrzeuge aufgrund spezifischer Geräuscheigenschaften lauter sind als leichte Kraftfahrzeuge, hier verdeutlicht durch den Lautheitswert in *phon*. Dies zeigt sich in der Verschiebung der Regressionsgeraden in der Abbildung 6. Damit wird die erhöhte Störwirkung von lauten Motorrädern auf Basis der üblichen Indikatoren deutlich, das heißt der A-bewertete Schalldruckpegel, im Vergleich zur Fahrzeugklasse Pkw, unterschätzt um 2 bis 3 Dezibel die Lautstärke der Motorräder. Laute Motorradvorbeifahrten sind damit im Vergleich zum Pkw im Mittel lauter als es der A-bewertete Schalldruckpegel vermuten lässt.

[18] Boxplots sind nützlich, um zentrale Tendenzen, Streuungen und mögliche Ausreißer innerhalb von Datensätzen visuell darzustellen. Boxplots können wie folgt gelesen werden: Der mittlere Strich im farbigen Kasten repräsentiert den Median, also den Wert, der genau in der Mitte einer Datenverteilung bei 50 Prozent liegt. Die Enden der farbigen Bereiche, auch Quartile genannt, stellen die unter- und oberhalb des Medians liegenden 25 Prozent der Daten dar. Das erste Quartil (Q1) ist der Wert, unter dem 25 Prozent der Daten liegen, während das dritte Quartil (Q3) den Wert angibt, unter dem 75 Prozent der Daten liegen. Der Abstand zwischen dem ersten und dritten Quartil wird als Interquartilsabstand (IQR) bezeichnet und umfasst 50 Prozent der Daten. Die T-förmigen „Antennen" links und rechts der farbigen Boxen werden Whisker genannt. Ihre Position wird zunächst durch das Minimum beziehungsweise Maximum der Datenreihe bestimmt. Liegt ein Punkt jedoch jenseits des 1,5-fachen des Interquartilsabstands, wird dieser als Ausreißer betrachtet und gesondert dargestellt. In diesem Fall markiert der nächste Wert unter dem 1,5-fachen des Interquartilsabstands das Ende des Whiskers. Die Ausreißer werden als einzelne Punkte vor und nach den Whiskern dargestellt.

[19] Bus/Lkw, BSR und BVG entsprechen der Kategorie schwerer Kraftfahrzeuge (SF).

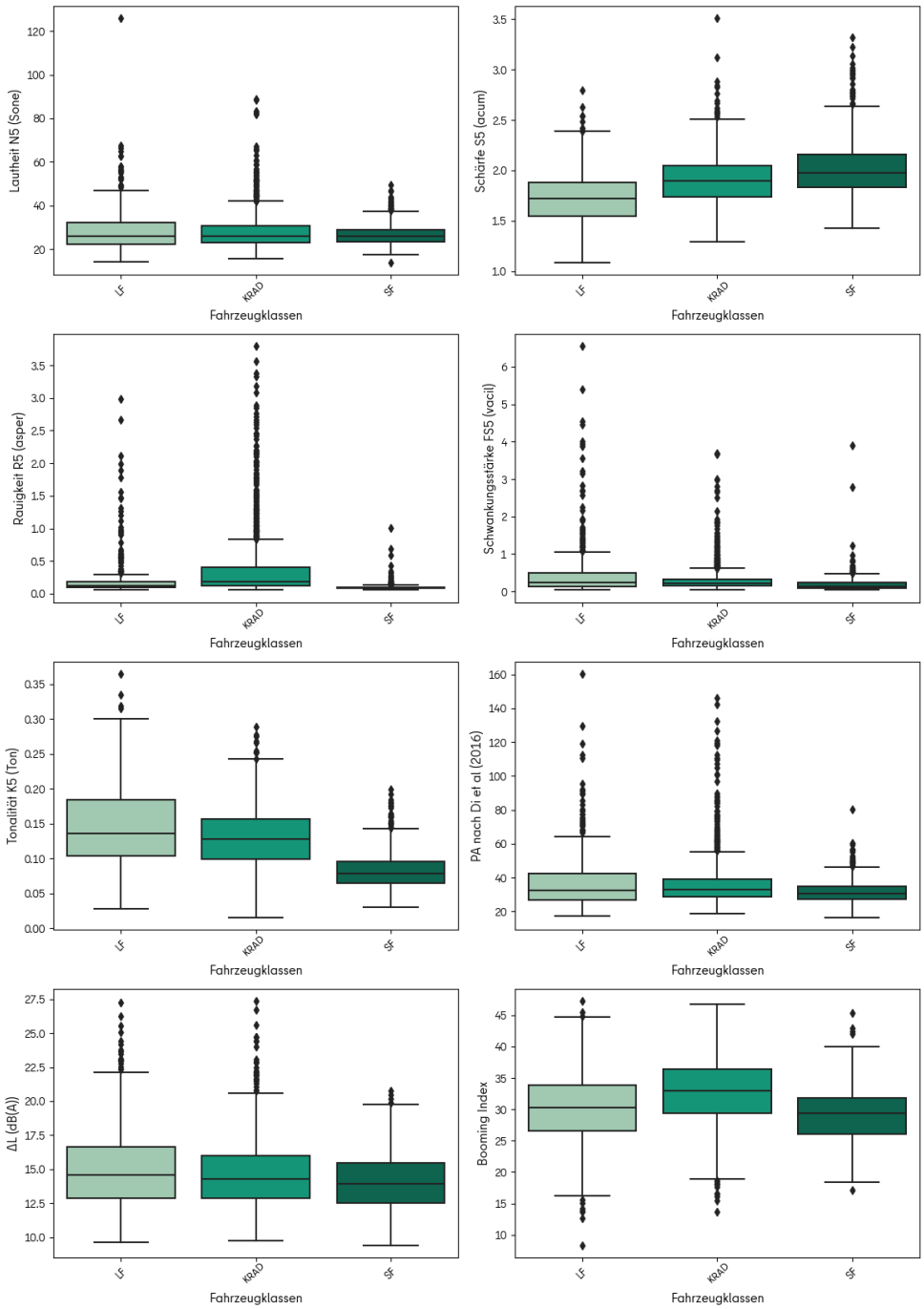


Abbildung 5: Boxplots zu den psychoakustischen Werten nach den zusammengefassten Fahrzeugklassen leichte Kraftfahrzeuge (LF), Krafträder (Krad) und schwere Kraftfahrzeuge (SF). Von links oben nach rechts unten: Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonalität, Psychoakustische Lästigkeit nach (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016)

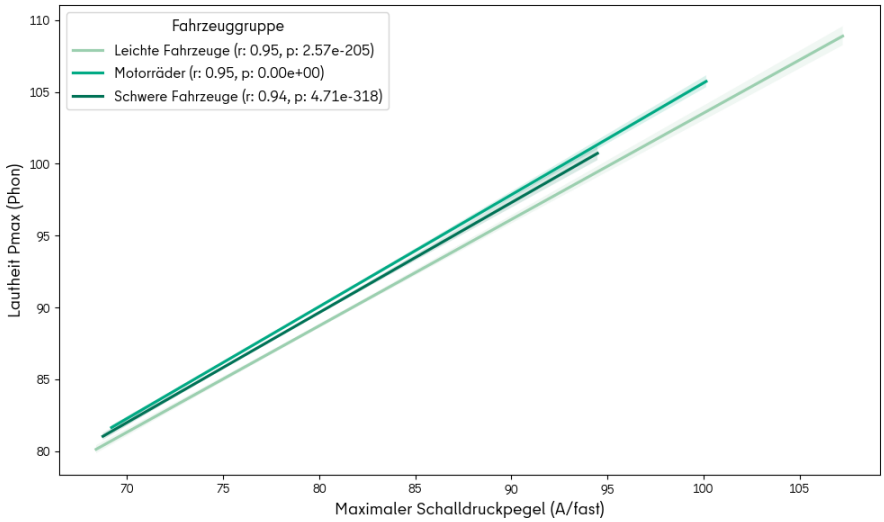


Abbildung 6: Lineare Regressionsgeraden für den Zusammenhang der Größen zur Quantifizierung der Lautstärke (Lautheit und Schalldruckpegel) für die zusammengefassten Fahrzeugklassen leichte Kraftfahrzeuge, Krafträder und schwere Kraftfahrzeuge. Lautheit (N_{max} in phon) über Schalldruckpegel (L_{AFmax} in Dezibel (A-bewertet)).

In der Abbildung 7 werden Boxplots präsentiert, die anschaulich die Verteilung der berechneten psychoakustischen Lästigkeitswerte (PA)[20] über die verschiedenen Fahrzeugklassen darstellen. Die höchsten psychoakustischen Lästigkeitswerte weisen, neben den auffälligen Einsatzfahrzeugen, die Fahrzeugklassen Quad und BSR-Fahrzeuge auf. Krafträder und Pkw zeigen vergleichbare Werte, jedoch ist eine größere Streuung in den psychoakustischen Lästigkeitswerten zu erkennen. Im Gegensatz dazu verursachen Busse und Oldtimer von allen mit dem Lärmblitzer erfassten Fahrzeugklassen im Mittel die geringsten psychoakustischen Lästigkeitswerte.

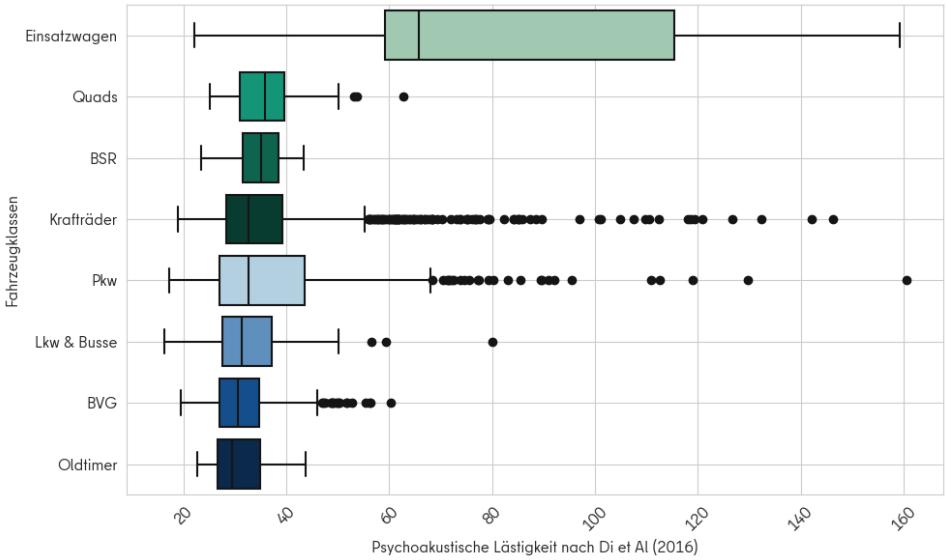


Abbildung 7: Boxplot der Werte der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) nach Fahrzeugklassen nach Medianwerten absteigend sortiert.

[20] Die Psychoakustische Lästigkeit wird durch ein mathematisches Modell berechnet und gilt als Annäherung der menschlichen Wahrnehmung bezüglich der psychoakustischen Auffälligkeit von Geräuschen. Es ist anzumerken, dass die Lästigkeit von Geräuschen von Mensch zu Mensch individuell unterschiedlich beurteilt wird und der hier dargestellte Indikator nur ein Modell zur Lärmbelästigung ist.

Die ermittelte Lautheit N_5 spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016). Dennoch zeigt Abbildung 8, dass auch andere Größen die berechneten Werte der psychoakustischen Lästigkeit beeinflussen. Ein Beispiel dafür sind die erfassten Fahrzeuge der BSR, die eine höhere Lautheit aufweisen als die Quad-Fahrzeuge, jedoch im Mittel einen geringeren PA-Wert besitzen. Ein weiteres Beispiel ist der Vergleich zwischen Krafträdern und Lkw/Bussen, die ähnliche Lautheitswerte besitzen, jedoch Krafträder gegenüber den Lkw und Bussen einen höheren PA-Wert aufweisen. Auch Pkw zeigen trotz einer im Mittel vergleichsweise geringen Lautheit einen hohen PA-Wert. Diese Effekte sind besonders relevant für Kraftfahrzeuge, die ausgeprägte Geräuschmuster erzeugen. Derartige Geräusche der Kraftfahrzeuge sind dann also nicht nur laut, sondern auch besonders störend, weil sich diese zusätzlich rau oder schwankend anhören. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Lautheit nicht der einzige Indikator für die Lästigkeit von lauten Kraftfahrzeugen ist, sondern dass weitere Faktoren und Geräuscheigenschaften bei realen Fahrzeuggeräuschen berücksichtigt werden müssen. Der Einfluss der psychoakustischen Parameter auf die psychoakustische Lästigkeit verdeutlicht die Notwendigkeit, auffällige Geräusche von Kraftfahrzeugen in städtischen Umgebungen stärker zu regulieren, um die Lärmbelästigung wirksam zu verringern.
In Abbildung 8 sind bis auf die Lautheit alle absoluten Medianwerte der einzelnen Beiträge zur psychoakustischen Lästigkeit dargestellt. Bei der Fahrzeugklasse der BVG fallen Geräuschanteile mit Modulationsbeiträgen (w_R und w_{FS}) geringer als bei den meisten anderen Fahrzeugklassen aus. Die Fahrzeuge der BSR sowie Lkw weisen ebenfalls niedrige Modulationsanteile auf. Dies deutet darauf hin, dass die Geräusche weniger auffällige Modulationen aufweisen.

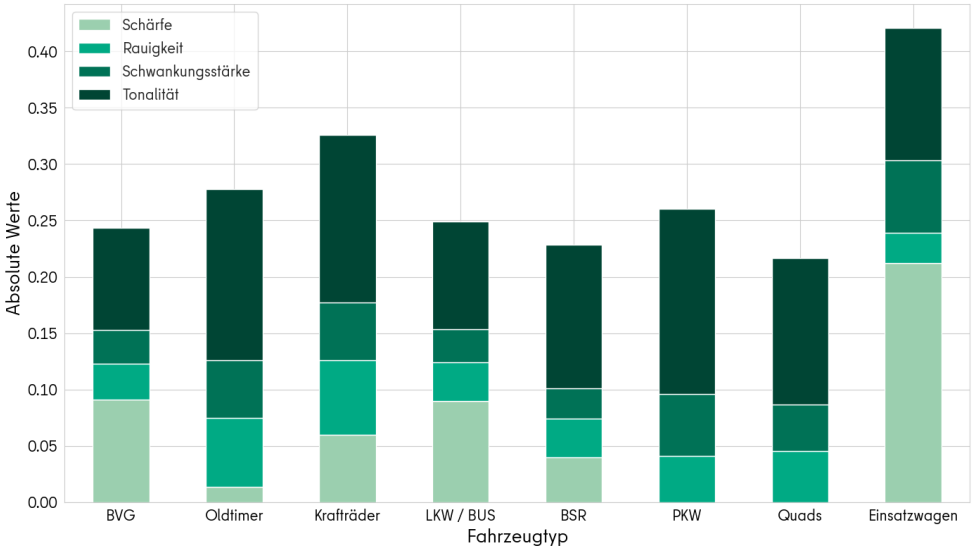


Abbildung 8: Medianwerte (absolut) der einzelnen Beiträge (w_S, w_R, w_{FS}, w_T) zum PA-Wert nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016). Die einzelnen Werte geben an, wie der PA-Wert durchschnittlich durch ausgewählte psychoakustische Parameter über die Lautheit hinaus erhöht wird (siehe exakte Berechnung der psychoakustischen Lästigkeit im Anhang).

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Fahrzeuge mit hohen PA-Werten, wie Quad und BSR-Fahrzeuge, möglicherweise gezielte Maßnahmen zur Lärmminderung benötigen, da sie in der psychoakustischen Analyse durchweg höhere Werte zeigen und damit noch stärker zur Lärmbelästigung beitragen.
Fahrzeuge mit niedrigeren Werten, wie Busse der BVG und Oldtimer, sind psychoakustisch unauffälliger und besitzen daher ein geringeres Belästigungspotential. In Anbetracht der hohen Werte für Quad- und BSR-Fahrzeuge könnte eine Überprüfung der Lärmminderungsmaßnahmen für diese Fahrzeugklassen sinnvoll sein, um die psychoakustische Belastung in städtischen Gebieten gezielt zu reduzieren.

Die Gruppe der Pkw lässt sich durch einen hohen Beitrag der Schwankungsstärke charakterisieren und weist im Mittel von allen Fahrzeugklassen das höchste Tonalitätsgewicht in Bezug zum PA-Wert auf. In dieser Klasse wurden vermehrte Hupgeräusche erfasst, wodurch sich möglicherweise die durchschnittlich hohe Tonalität erklären ließe.
Die Krafträder zeigen einen vergleichsweise hohen Schärfe- und Tonalitätsbeitrag zum PA-Wert und weisen den höchsten Rauigkeitsbeitrag auf. Diese Werte deuten auf signifikante Modulationsgeräusche hin, die vom Motor stammen. Besonders bemerkenswert ist, dass unter den erfassten Krafträdern 230 Harley-Davidson-Motorräder vertreten sind, die für ein charakteristisches raues Motor- und Auspuffgeräusch bekannt sind (Huth, Eberlei, & Liepert, 2019). Tatsächlich stellen Harley-Davidson-Motorräder mit 22 Prozent der Gesamtzahl die größte Gruppe unter den erfassten Krafträdern dar. Danach folgt die Marke Ducati, die 13 Prozent der erfassten Krafträder ausmachen. Zudem sind 41 Prozent der identifizierten Ausreißer, das heißt besonders laute Ereignisse, Harley-Davidson-Kraftfahrzeuge, was ihre große Präsenz in der Lärmstatistik unterstreicht.

Psychoakustische Lästigkeit und Schalldruckpegel

Abbildung 9 ist zu entnehmen, dass eine systematische Beziehung bei den erfassten Kraftfahrzeugen zwischen dem maximalen Schalldruckpegel und der psychoakustischen Lästigkeit besteht, wobei höhere Schalldruckpegel erwartungsgemäß auch mit einer höheren Lästigkeit einhergehen[21]. Die Korrelation[22] zwischen dem ermittelten maximalen Schalldruckpegel eines erfassten Fahrzeugs und der berechneten psychoakustischen Lästigkeit beträgt 0,81, was auf eine starke positive Beziehung hinweist. Dies unterstreicht, dass der Schalldruckpegel (beziehungsweise die Lautheit) ein wichtiger Faktor für die psychoakustische Lästigkeit derartiger Geräusche ist: Für jeden Anstieg des Schalldruckpegels um 1 Dezibel nimmt die psychoakustische Lästigkeit im Durchschnitt um etwa 3,47 Einheiten zu. Zusätzlich ist jedoch zu erkennen, dass die Beziehung zwischen Schalldruckpegel und psychoakustischer Lästigkeit eine nichtlineare Komponente hat. Dies weist darauf hin, dass die psychoakustische Lästigkeit bei sehr hohen Schalldruckpegeln schneller ansteigt als bei niedrigeren Schalldruckpegeln.

[21] Grundlage der psychoakustischen Auswertungen sind die vom Lärmblitzer bereitgestellten nicht kalibrierten Audiosignale. Dabei handelt es sich um Signale, die nicht exakt den Schalldruckpegel des erfassten Kraftfahrzeugs wiedergeben, sondern nur in Annäherung den wahren Schalldruckpegel repräsentieren. Sämtliche Audiosignale wurden nachträglich angepasst. Dadurch ist eine nicht exakt bezifferbare Messunsicherheit in der Datenanalyse bezüglich des Schalldruckpegels enthalten. Jedoch lässt sich anmerken, dass viele psychoakustische Parameter nur im geringen Maße vom Schalldruckpegel abhängen.
[22] Die Korrelation ist ein statistisches Maß, welches ausdrückt, inwieweit zwei Variablen in einer linearen Beziehung zueinanderstehen. Eine perfekte positive Korrelation weist einen Wert von 1 und eine perfekte negative Korrelation einen Wert von -1 auf.

Abbildung 9: Zusammenhang zwischen dem maximalen Schalldruckpegel L_{AFmax} (in Dezibel (A-bewertet)) und der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) für alle erfassten Kraftfahrzeuge. In rot (linear) und orange (quadratisch) sind Regressionsmodelle eingezeichnet, die den mathematischen Zusammenhang von maximalen Schalldruckpegel und psychoakustischer Lästigkeit exemplarisch approximieren.

Besonders ab einem Schalldruckpegel von 95 Dezibel (A-bewertet) ist eine deutliche Zunahme der psychoakustischen Lästigkeit zu beobachten. Diese Zunahme, die eher einer quadratischen Veränderung zu folgen scheint, kann auf verschiedene psychoakustische Dimensionen zurückgeführt werden, die bei höheren Schalldruckpegeln verstärkt wirken.

Psychoakustische Lästigkeit von Ausreißern

Wie in Abbildung 7 deutlich wird, zeigen Krafträder und Pkw hohe Streuungen in den berechneten akustischen Ausprägungen. In der Klasse der Krafträder sind 95 Ausreißer (7,4 Prozent des Gesamtwertes) festzustellen, wobei die psychoakustische Lästigkeit (PA) Werte bis zu 146,3 zeigt. Die Klasse der Pkw zeigt insgesamt 25 Ausreißer (6,5 Prozent), darunter das Kraftfahrzeug mit dem höchsten PA-Wert nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) von über 160.

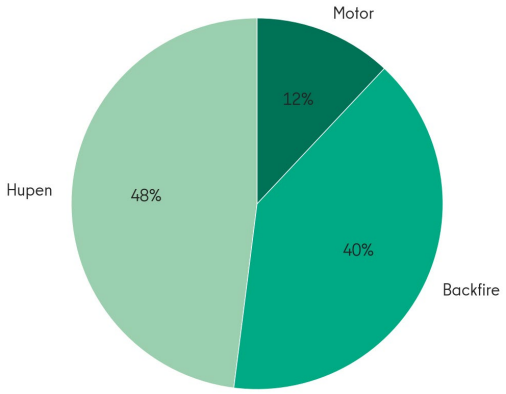


Abbildung 10: Ausreißer, das heißt besonders auffällige Vorbeifahrten, in der Fahrzeugklasse Pkw. Dargestellt sind die prozentualen Anteile der ermittelten Lärmursache.

Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, sind bei den erfassten übermäßig lauten Pkw Ausreißer vornehmlich auf Hupen (48 Prozent) und auf Backfire[23]-Geräuschen (40 Prozent) zurückzuführen. Quads und BSR-Fahrzeuge zeigen hingegen, laut Abbildung 7, deutlich weniger Ausreißer nach oben. Die hohen Medianwerte bei diesen Fahrzeugklassen weisen auf ein grundsätzlich hohes Belästigungspotenzial hin, da viele Kraftfahrzeuge in diesen Klassen sehr laut und psychoakustisch auffällig sind. Dahingegen betreffen die Ausreißer bei Pkw und Krafträdern mit sehr hohen PA-Werten eher einzelne Fälle, die jedoch teilweise erhebliche Belästigungen hervorrufen können. Gerade bezogen auf kritische Aufwachreaktionen in der Nacht sind derartig auffällige Ereignisse zwingend zu vermeiden (Basner & McGuire, 2018).
Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass bei den Klassen der Pkw und Krafträder häufiger Fehlverhalten und technische Manipulationen vorliegen, die zu erheblich auffälligen Geräuschemissionen führen, wohingegen in den Klassen der BSR-Fahrzeuge und Quads grundsätzlich ein hohes psychoakustisches Störpotential vorliegt, das eher durch strengere technische Anforderungen verringert werden müsste als durch Verhaltenssanktionen.

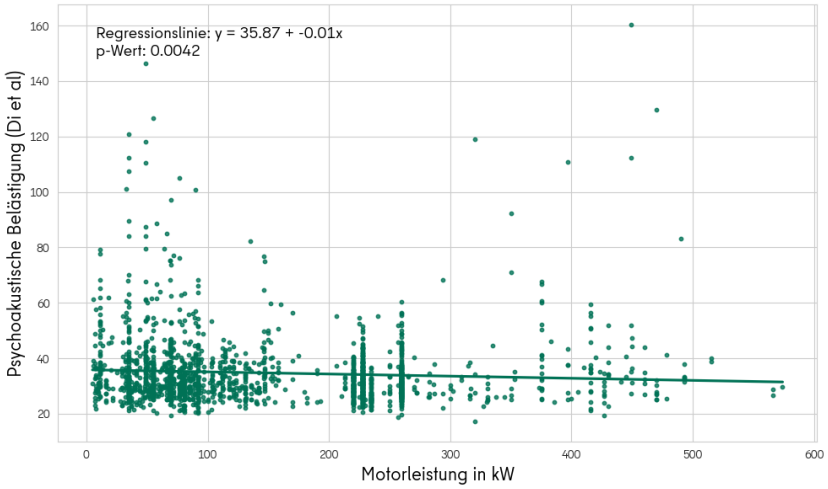
Das erfasste Fahrzeug mit dem höchsten Wert der psychoakustischen Lästigkeit ist ein Sportwagen, der über einen Hubraum von über 5.000 Kubikzentimetern verfügt und eine Motorleistung von 470 Kilowatt aufweist. Dasselbe Fahrzeugmodell wurde weitere acht Mal mit dem Lärmblitzer erfasst, wobei die weiteren PA-Werte geringer ausfielen. Wenn das gleiche Fahrzeugmodell sowohl hohe als auch niedrige PA-Werte erreicht, deutet dies darauf hin, dass durch eine spezifische Fahrzeugnutzung (Fahrweise) gezielt hohe Geräuschbelastungen verursacht werden.

[23] Das Phänomen Backfire bei Kraftfahrzeugen beschreibt Fehlzündungen im Ansaugtrakt von Verbrennungsmotoren, die häufig durch technische Manipulationen gezielt erzeugt werden.

Vergleich der Leistung von Kfz mit der psychoakustischen Lästigkeit

Eine Analyse der Daten zeigt insgesamt schwache Korrelationen zwischen den technischen Parametern der Kraftfahrzeuge und der in der Vorbeifahrt erfassten psychoakustischen Lästigkeit. Der Hubraum weist eine geringe Korrelation auf, was theoretisch bedeutet, dass Kraftfahrzeuge mit größerem Hubraum nicht unbedingt psychoakustisch auffälliger ausfallen. Möglicherweise verursachen besonders leistungsfähige Kraftfahrzeuge hinsichtlich der Motorleistung weniger auffällige Geräuschanteile, was zu einem insgesamt geringeren Niveau der psychoakustischen Lästigkeit führt. Ähnlich verhält es sich bei der Nennleistung und bei der Motorleistung in Kilowatt.

Insgesamt verdeutlicht dies, dass technische Spezifikationen eines Kraftfahrzeuges wie Hubraum, Nennleistung und Motorleistung nur begrenzt für die psychoakustische Lästigkeit bei den erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeugen relevant sind. Die Ergebnisse deuten stark darauf hin, dass andere Faktoren, wie die Fahrzeugklasse, das individuelle Fahrverhalten oder technische Manipulationen des Kraftfahrzeuges im Wesentlichen für die psychoakustische Auffälligkeit verantwortlich sind. Aus den höheren Leistungsparametern eines Kraftfahrzeuges resultiert offensichtlich nicht automatisch eine hohe psychoakustische Lästigkeit, vielmehr erscheint (unter anderem) die Fahrweise für besonders belästigende Geräuschsituationen maßgeblich.



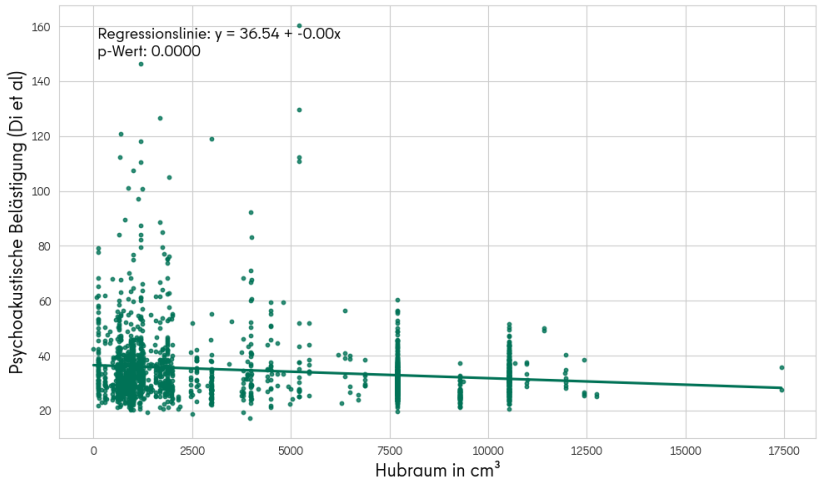


Abbildung 11: Lineare Regression zwischen psychoakustischer Lästigkeit und Motorleistung in Kilowatt (oben) und Hubraum in Kubikzentimetern (unten). Es ist jeweils die lineare Regressionsgerade eingezeichnet.

Psychoakustische Lästigkeit über Wochentage und Uhrzeit

In Abbildung 12 wird die Anzahl der erfassten lauten Kraftfahrzeuge über die Tagesstunden mit der psychoakustischen Lästigkeit (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) in Beziehung gesetzt. Es wurde beobachtet, dass der Mittelwert der psychoakustischen Lästigkeit zwischen 0 Uhr und 7 Uhr im Vergleich zu anderen Stunden geringer ist. In den frühen Morgenstunden ist die Anzahl der geblitzten Fahrzeuge relativ gering. Ab 8 Uhr nimmt der mittlere PA-Wert deutlich zu, erreicht den Höhepunkt um 21 Uhr und sinkt danach wieder. Krafträder machen den größten Anteil der Fahrzeuge aus, besonders in den Stunden mit hoher Verkehrsdichte zwischen 15 und 21 Uhr. Pkw sind ebenfalls häufig vertreten, insbesondere nachmittags und abends, mit einem Höhepunkt um 21 Uhr. BVG-Fahrzeuge sind regelmäßig über den Tag verteilt und stellen die Mehrheit der in den Nachtstunden zwischen 1 Uhr und 5 Uhr erfassten lauten Kraftfahrzeuge dar. Andere Fahrzeugklassen wie Lkw, Busse, Oldtimer, BSR-Fahrzeuge, Quads und Einsatzfahrzeuge sind weniger häufig erfasst worden und zeigen dabei bezüglich Auftrittshäufigkeiten keine tageszeitabhängigen Muster auf. Die erhöhte Anzahl erfasster Kraftfahrzeuge zwischen 8 und 21 Uhr weist auf die Hauptverkehrszeiten hin. Die höchste psychoakustische Lästigkeit der erfassten Fahrzeuge zeigt sich im Mittel um die Mittagsstunden und am Nachmittag sowie weist einen lokalen Höhepunkt um 21 Uhr auf. Der Peak gegen 21 Uhr ist nicht Fahrten im Berufsverkehr zuzuordnen, sondern wird vermutlich durch Freizeitfahrten (Poser) erzeugt.

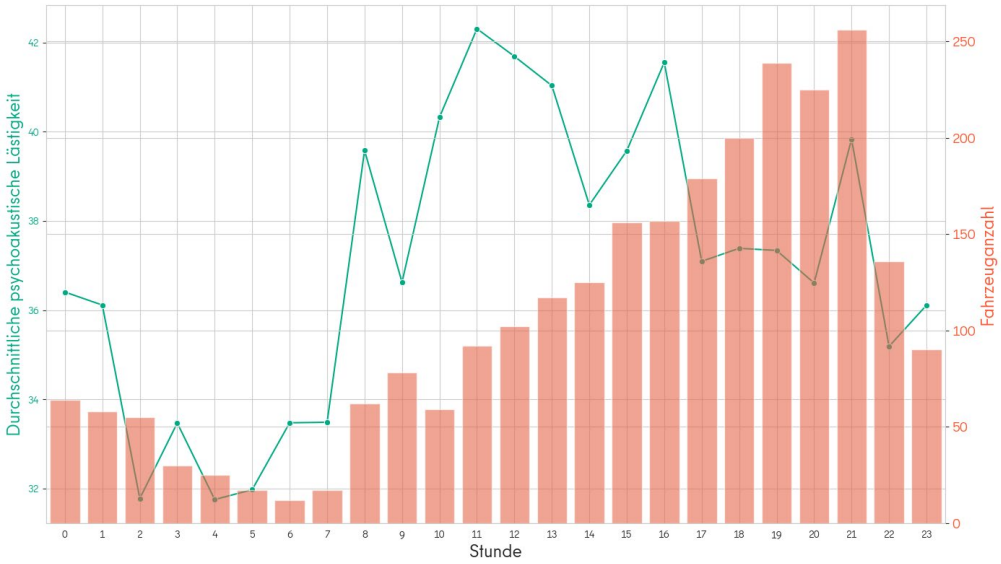


Abbildung 12: Der Graph stellt einerseits die absolute Häufigkeit der erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge über den Tag dar (rot) sowie die Mittelwerte der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) (grün).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Lärmbelastung tagsüber nicht nur bezüglich der Anzahl der lauten Ereignisse höher ist als in den Nachtstunden, sondern durchschnittlich auch psychoakustisch auffälligere Kraftfahrzeuge am Tag beziehungsweise Abend am Kurfürstendamm verkehren. Jedoch zeigen die vergleichbaren Medianwerte der PA-Werte bezogen auf die Tagesstunde gleichzeitig auch, dass zu jeder Zeit am Tag und Nacht laute und psychoakustisch auffällige Kraftfahrzeuge am Kurfürstendamm erfasst wurden, was die durchgängig hohe Lärmbelastung am Untersuchungsort unterstreicht.
Eine Analyse der PA-Mittelwerte nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) für die einzelnen Wochentage zeigte dagegen keine auffälligen Trends.

Einfluss von Wetterereignissen auf die erfassten Geräusche

Im Verlauf der Pilotstudie wurden 28 Aufnahmen von Kraftfahrzeugen auf nasser Fahrbahn bei Regenwetter erfasst. Die spezifische Lautheit in *sone* wurde für verschiedene Frequenzbereiche (Bark) verglichen, um den Einfluss des Regens auf das Fahrzeuggeräusch näher zu analysieren.

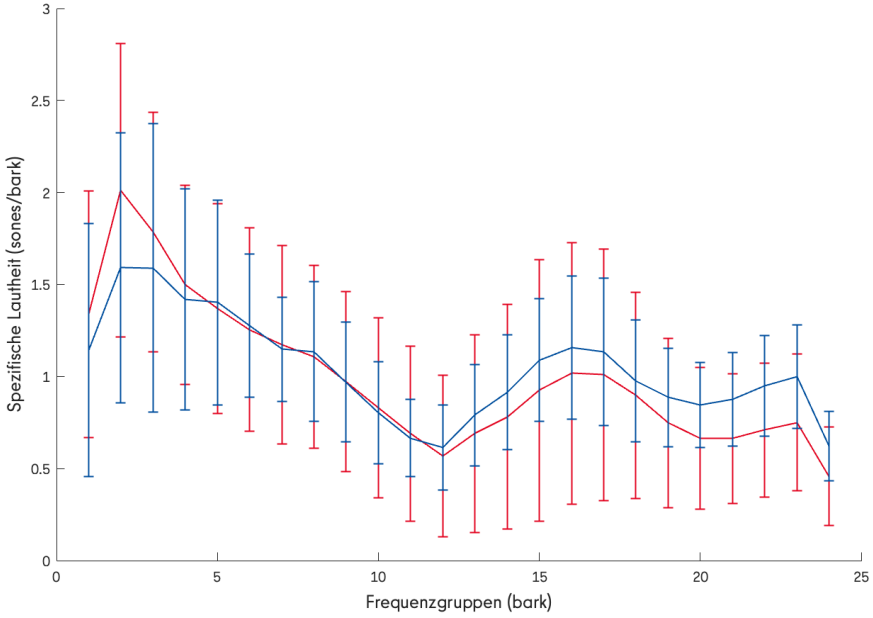


Abbildung 13: Spezifische Lautheit pro Frequenzgruppe in Bark. Vergleich der spezifischen Lautheiten von erfassten lauten Kraftfahrzeugen zwischen Regentagen (in blau) und normalen Tagen (in rot).

Abbildung 13 zeigt, dass die spezifische Lautheit bei Regenwetter in den Frequenzbereichen zwischen 12 und 24 Bark (ca. 1.720 bis 15.500 Hertz) höher ausfällt. Dieser Bereich umfasst höhere Frequenzen und das Geräusch klingt demnach psychoakustisch schärfer. Im Bereich von 5 bis 12 Bark (ca. 510 bis 1.720 Hertz) wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Regen- und Normalwetteraufnahmen beobachtet.
Von 1 bis 5 Bark (ca. 100 bis 510 Hertz), der tieffrequente Bereich, ist die spezifische Lautheit ohne Regen höher als bei Regenwetter. Die erhöhten spezifischen Lautheitswerte bei regennasser Fahrbahn lassen sich auf ein stärkeres Reifengeräusch und wahrscheinlich nicht auf ein Fehlverhalten beziehungsweise eine Manipulation zurückführen. Hier müssten weitergehende Untersuchungen erfolgen, um die Messgenauigkeit bei Regensituationen detailliert zu analysieren.

KLASSIFIZIERUNG DER GERÄUSCHE MITTELS KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

Die vorherigen Ergebnisse zeigten, dass sich die verschiedenen Fahrzeugklassen akustisch in einigen Merkmalen unterscheiden. Allerdings sind die technischen Eigenschaften eines Kraftfahrzeugs nicht immer die alleinige Ursache für Lärm und spezifische akustische Ausprägungen, auch die Fahrweise kann eine Rolle spielen. Um erkennen zu können, ob eine lärmprovozierende Fahrweise die Geräuschüberschreitung verursachte, wurde eine KI-gestützte Methode entwickelt. Das Vorgehen zur Entwicklung der Methode umfasste eine Auswahl relevanter Vorbeifahrten, das Extrahieren spezifischer akustischen Merkmale aus den Audiodaten, das Trainieren der Modelle der Künstlichen Intelligenz (KI) und das Vorhersagen des Fahrverhaltens auf Basis der akustischen Merkmale.

Identifizierbarkeit lärmprovozierender Fahrweisen: KI-Methode und akustische Merkmale

Ein klassisches Anwendungsgebiet von KI ist die Klassifizierung von Audiodaten, beispielsweise zur Erkennung von Sprache oder Geräuschen. Die Fähigkeit zur Klassifizierung lernt ein KI-Modell mithilfe von Trainingsdaten. Während des Trainings lernt das Modell Merkmale und Muster zu identifizieren, die für eine Zuordnung zu einer bestimmten Geräuschklasse notwendig sind. In dieser Studie wurden gute Ergebnisse bezüglich der Erkennung lärmprovozierender Fahrweise mit dem Support Vector Machine (SVM) Klassifikator erzielt, der mithilfe von überwachtem Lernen trainiert wurde. Der Klassifikator bildet vorher extrahierte akustischen Merkmale in einen mehrdimensionalen Merkmalsraum ab. Ziel des Trainings ist das Finden einer geeigneten Trennlinie (sogenannte Hyperplane) innerhalb des Merkmalsraums, wodurch die Zuordnung der Merkmale zu einer Geräuschklasse ermöglicht wird. SVMs sind auch bei Datensätzen mit wenigen Beispielen und bei binären Klassifikationsproblemen geeignet (hier: lärmprovozierende Fahrweise trifft nicht zu oder trifft zu). Ersteres ist von Relevanz, da die Anzahl der Vorbeifahrten vergleichsweise klein ist und somit nur eine begrenzte Anzahl an Trainingsdaten vorlag. Es wurden zwei besonders geeignete SVM Modelle[24] trainiert, die sich hinsichtlich der verwendeten Daten (Merkmale) unterscheiden. Für weiterführende Informationen zur Modellfindung und Optimierung wird auf die Arbeit „Untersuchung zur Auffälligkeit von Vorbeifahrtgeräuschen im Realverkehr im Rahmen einer Pilotstudie“ (Kolingba, 2024) verwiesen.

Identifizierbarkeit der Fahrweise: Labeln der Daten

Vor dem Training des SVM Klassifikators mithilfe von überwachtem Lernen musste zunächst entschieden werden, welche der erfassten Geräusche durch lärmprovozierende Fahrweisen entstanden sind. Die Zuordnung (trifft zu/trifft nicht zu) wurde hier subjektiv begründet, weshalb ein Hörversuch mit insgesamt 7 Personen durchgeführt wurde, in dem insgesamt 384 Vorbeifahrtgeräusche bewertet beziehungsweise klassifiziert wurden. Im Versuch wurden ausschließlich Vorbeifahrten der Fahrzeugklasse Pkw verwendet, da die Gesamtzahl der Vorbeifahrten bei den anderen Fahrzeugklassen geringer waren.
Der Hörversuch umfasste die Fragestellung, die Art der Fahrweise basierend auf der akustischen Wahrnehmung zu klassifizieren. Für alle Geräusche wurde den Teilnehmenden folgende Frage gestellt: „Welcher der folgenden Aspekte trägt Ihrer Meinung nach zur erheblichen Geräuschentwicklung des Kraftfahrzeuges bei?“

[24] Das sogenannte MFCC-Mix Modell (MFCC: Mel-Frequency Cepstral Coefficients) basiert auf signaltheoretischen Merkmalen, wie den zeit- und frequenzabhängigen Kennwerte „Zero Crossing Rate“ (ZCR), „Root Mean Square“ (RMS) Energie, „Short-Time Energy“ (STE), „Chroma“ sowie Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs). Daneben wurde auch ein Psychoakustik-Modell getestet, dass auf psychoakustischen Merkmalen (Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Schwankungsstärke, „ΔL“ (Unterschied zwischen dem lautesten Moment eines Geräusches (L_{AFmax}) und dem energieäquivalentem Schalldruckpegel L_{Aeq})) basiert.

Die Teilnehmenden konnten zwischen zwei Hauptkategorien wählen (*unauffällige Fahrweise* vs. *lärmprovozierende Fahrweise*). Bei der der Oberkategorie „lärmprovozierende Fahrweise" gab es fünf Unterkategorien (sportliches Beschleunigen, aggressives Bremsen, hochtouriges oder untertouriges Fahren, Gasstoß im Leerlauf, Hupen). Für jede Aufnahme durften die Teilnehmenden eine Antwort auswählen. Am Ende bestimmte die Mehrheit der Antworten das endgültige Label der entsprechenden Audiodatei. Die Teilnehmenden konnten auch "lärmprovozierende Fahrweise" als einzelne Antwort eingeben ohne Auswahl einer Unterkategorie.
Die Einordnungen der Teilnehmenden zeigten eine nahezu gleichmäßige Verteilung zwischen den Oberkategorien *unauffällig* und *lärmprovozierend*, wobei die lärmprovozierenden Unterkategorien unterschiedlich häufig genutzt wurden (siehe Tabelle 3). Aufgrund dieser ungleichen Verteilung und der Komplexität einer detaillierten Klassifikation für die Unterkategorien wurden für die endgültige Klassifikation lediglich die zwei Oberkategorien betrachtet (unauffällige Fahrweise oder lärmprovozierende Fahrweise). Die durch die Befragten klassifizierten Fahrzeuggeräusche dienten als Grundlage für die nachfolgende Klassifizierung. Die Oberkategorie *Hupen* wurde bei der Klassifikation nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Verteilung der Antworten in einer Befragung mit 7 Teilnehmenden. Die Kategorie "Lärmprovozierend" umfasst die Antworten "Beschleunigen", "Bremsen" und "H/N-tourig (Hoch-Niedertourig)" und "Gasstoß im Leerlauf", aber nicht „hupen".

Unauffällige Fahrweise	Lärmprovozierende Fahrweise[25]				Hupen
	Beschleunigen	Bremsen	H/N-tourig	Gaststoß	
166	75	3	49	15	56

Identifizierbarkeit der Fahrweise: Ergebnisse der KI-Modelle

Die beiden verwendeten KI-Modelle (MFCC-Mix Modell und Psychoakustik-Modell) erreichten mit knapp 80 Prozent eine gute Genauigkeit bei der automatischen Klassifikation der Fahrweisen in unauffällig und lärmprovozierend. Die Modelle zeigten kleinere Unterschiede in der Erkennungsleistung der beiden Klassen. Die Ergebnisse belegen, dass lärmprovozierende Fahrweisen durchaus verlässlich und robust durch maschinelles Lernen (KI) erkannt werden könnten. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass mit einer größeren Datenbasis noch eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit erreicht werden könnte.

Identifizierbarkeit der Fahrweise: Auswirkung der Fahrweise auf die psychoakustische Geräuschemission

Die von den Probanden klassifizierten Geräusche wurden einer psychoakustischen Analyse unterzogen, um deren akustischen Eigenschaften zu betrachten. Laut dem Modell der psychoakustischen Lästigkeit (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) ist das Hupen psychoakustisch besonders lästig, wie Tabelle 4 zeigt. Auch die Geräusche, die als lärmprovozierende Fahrweise klassifiziert wurden, zeigen höhere Werte der psychoakustischen Lästigkeit als die Geräusche der unauffälligen Fahrweise. Eine Studie bestätigt, dass bei aggressiver Fahrweise die Motor- und Rollgeräusche signifikant stärker ausfallen, was zu einer erhöhten Lautheit führt (Calvo, Álvarez-Caldas, San Romána, & Colob, 2012).

[25] In 20 Fällen wurde bei der Auswahl "lärmprovozierende Fahrweise" keine Unterkategorie ausgewählt.

Tabelle 4: Medianwerte und Interquartilsabstände (IQR) der psychoakustischen Parameter Lautheit (N), Schärfe (S), Rauigkeit (R), Schwankungsstärke (FS), Tonhaltigkeit (K) und psychokustische Lästigkeit (PA) analysiert nach Fahrweise.

Fahrweise	N_5 (sone)	S_5 (acum)	R_5 (asper)	FS_5 (vacil)	K_5 (tu)	PA (Di, 2016)
Unauffällige Fahrweise	22.41, IQR: 4.54	1.69, IQR: 0.35	0.15, IQR: 0.05	0.19, IQR: 0.12	0.13, IQR: 0.07	27.39, IQR: 5.05
Lärmprovozierende Fahrweise	32.52, IQR: 0.38	1.72, IQR: 0.36	0.31, IQR: 0.19	0.63, IQR: 0.42	0.14, IQR: 0.08	43.46, IQR: 15.50
Hupen	38.88, IQR:12.92	1.93, IQR: 0.38	0.14, IQR: 0.06	1.19, IQR: 0.89	0.21, IQR: 0.09	54.42, IQR: 21.71

Laut Tabelle 4 beträgt die Lautheit im Mittel (Median) lediglich rund 22 *sone* für die unauffällige Fahrweise, wohingegen die lärmprovozierende Fahrweise im Mittel über 32 *sone* aufweist. Die Lautheitswerte beim Hupen fallen dabei im Mittel noch höher aus.
Dies zeigt, dass lärmprovozierende Fahrweisen im Vergleich zur unauffälligen Fahrweise der mittels Lärmblitzer erfassten Kraftfahrzeuge zu deutlich höheren Lautstärken führen. Die lauten Kraftfahrzeuge mit lärmprovozierenden Fahrweisen sind um 50 Prozent lauter als die erfassten lauten Kraftfahrzeuge mit eher unauffälliger Fahrweise, was die Bedeutung für die durch hervorgerufene Lärmbelästigung aufgrund von unangebrachtem und unnötigem Fahrverhalten unterstreicht. Das Hupen zeigt zudem die höchste Lautheit, was nicht überraschend ist, da es typischerweise als Alarmsignal gestaltet ist und eingesetzt wird.
Darüber hinaus ist die Rauigkeit bei der lärmprovozierenden Fahrweise doppelt so hoch wie bei der unauffälligen Fahrweise. Der Parameter Rauigkeit bezieht sich auf den "kratzigen, rauen Charakter“ eines Geräusches, der oft als unangenehm empfunden wird. Bei der lärmprovozierenden Fahrweise ist diese erhöht, was zur Lärmbelästigung beiträgt. Auch die berechneten Schwankungsstärkewerte fallen höher aus als bei der unauffälligen Fahrweise.
Diese psychoakustischen Parameter tragen zur deutlichen Erhöhung der Störwirkung der Geräusche bei, siehe PA-Werte in der Tabelle 4. Diese Beobachtungen sind für die mögliche zukünftige maschinelle Erkennung der Fahrweise wichtig, da damit Belege für die besonders relevanten Parameter bei aggressiven, lärmprovozierenden Fahrweisen vorliegen.

Identifizierbarkeit von technisch manipulierten Kraftfahrzeugen

Tuning bezeichnet die individuelle Anpassung von Fahrzeugen, wobei Modifikationen sowohl optisch als auch technisch vorgenommen werden können. Während Tuning für viele Fahrzeugbesitzer eine Möglichkeit darstellt, ihr Kraftfahrzeug nach den eigenen Vorstellungen zu gestalten, müssen dabei gesetzliche Bestimmungen beachtet werden. Diese Vorgaben sind insbesondere in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) und der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) geregelt.
Nach § 19 Absatz 2 StVZO erlischt die Betriebserlaubnis eines Fahrzeugs, wenn Änderungen vorgenommen werden, durch die die in der Betriebserlaubnis genehmigte Fahrzeugart geändert wird, eine Gefährdung von Verkehrsteilnehmern zu erwarten ist oder das Abgas- oder Geräuschverhalten verschlechtert wird.
In solchen Fällen drohen Sanktionen, wie beispielsweise Bußgelder und die Stilllegung des Fahrzeugs. Gefährdende oder das Abgas- und Geräuschverhalten verschlechternde technische Änderungen ohne Teilegenehmigungen müssen über die Einzelabnahme nach § 21 StVZO durch den „amtlich anerkannten Sachverständigen einer technischen Prüfstelle“ begutachtet und dokumentiert werden. Danach erhält das Fahrzeug eine Einzelbetriebserlaubnis.

Technische Änderungen mit einer allgemeinen Betriebserlaubnis (ABE) müssen nicht in den Fahrzeugschein eingetragen werden, das Mitführen der ABE ist ausreichend. Teile mit der E-Kennzeichnung (EU-Zulassung) benötigen weder Papiere noch eine Eintragung.
Ein wesentliches Problem beim Tuning ist die oft einhergehende zusätzliche Geräuschentwicklung. Technische Modifikationen am Motor oder an der Auspuffanlage führen häufig dazu, dass getunte Fahrzeuge lauter als die Originalversionen sind. Hier spielt auch das sogenannte Motor-Tuning eine Rolle, das auf die Steigerung der Fahrzeugleistung abzielt. Dabei kann der Motor durch Chip-Tuning oder den Einbau von Ladeluftkühlern verändert werden, was häufig auch die Lautstärke erhöht.

Die Erhöhung der Lärmbelästigung durch getunte Kraftfahrzeuge ist nicht nur ein Ärgernis für die Umwelt und für Lärmbetroffene, sondern kann auch rechtliche Konsequenzen haben. Die polizeiliche Bestimmung, ob ein vorbeifahrendes Kraftfahrzeug zu laut ist, gestaltet sich in der Praxis jedoch schwierig. Im Gegensatz zur Geschwindigkeitsmessung, die relativ einfach realisiert werden kann, sind akustische Messungen oft nicht eindeutig. Einige Kraftfahrzeuge können, auch ohne Tuning, bereits laut sein, was die rechtliche Bewertung kompliziert macht. Daher ist eine präzise Messung und Beurteilung der Geräuschemissionen wichtig, um mögliche Verstöße festzustellen.

In der aktuellen Praxis werden polizeiliche Kontrollen durchgeführt, um sicherzustellen, dass Kraftfahrzeuge die gesetzlichen Geräuschvorgaben einhalten. Das in dieser Pilotstudie erprobte Messsystem ist aktuell nicht in der Lage, illegal getunte Kraftfahrzeuge zuverlässig zu erkennen. Eine Weiterentwicklung, beispielsweise durch den Einsatz von Wärmebildkameras oder einer angeschlossenen zusätzlichen KI-Klassifikation, könnte eine Verbesserung in dieser Hinsicht darstellen. Hierbei könnte die KI nicht nur helfen, das Modell sicher zu identifizieren, sondern auch erkennen, welche Bauteile voraussichtlich zugelassen sind beziehungsweise überprüft werden sollten. Weitere Daten typischer Geräusche von Beschleunigungs-, Brems- und Stand- beziehungsweise Leerlaufphasen für bestimmte Modelle könnten KI-Modellen helfen, akustische Auffälligkeiten besser zu erkennen, Fahrweisen präziser zuzuordnen und mögliche Anhaltspunkte für (möglicherweise illegale) technischen Manipulationen zu erhalten.
Wenn die Analyse eine beobachtete erhebliche Lautheitsüberschreitung aufgrund einer lärmprovozierenden Fahrweise ausschließen kann, kann dies auf eine mögliche Fahrzeugmanipulation hindeuten.

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts (Noise and Emissions Monitoring and Radical Mitigation[26] (Ertsey-Bayer, et al., 2021)) wird ein Verfahren entwickelt, bei dem ein gemessener Schalldruckpegel auf einen Referenzschalldruckpegel für das Fahrzeugmodell bezogen unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrzustandsparameter und mittels Datenbankabgleich ermittelt wird, ob eine größere Abweichung zum erwarteten Schalldruckpegel vorliegt. So sollen illegale Modifikationen oder schlecht unterhaltene Fahrzeuge automatisch erkannt werden unabhängig von der jeweiligen Fahrweise (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022).

[26] Forschungsprojekt NEMO, https://nemo-cities.eu, Zugriff am 10.12.2024.

FAZIT & AUSBLICK

Die Anzahl und die Ausprägungen der mittels der Lärmblitzer erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge am Kurfürstendamm über einen Zeitraum von 2 Monaten belegen das grundsätzliche Lärmkonfliktpotenzial und die Notwendigkeit, mit geeigneten Maßnahmen derartige laute Fahrzeuge zu erfassen und im Sinne des Lärmschutzes zu sanktionieren.
Eine Detailanalyse der Daten zeigte, dass basierend auf den Medianwerten der psychoakustischen Lautheit die lautesten erfassten Fahrzeugklassen, neben den Einsatzfahrzeugen mit Martinshörnern, die BSR-Fahrzeuge und Quads sind. Diese Kraftfahrzeuge weisen im Mittel die höchsten Lautheitswerte auf. Die anderen Fahrzeugklassen liegen dagegen durchschnittlich mit 25 bis 26 *sone* eher in einem ähnlichen Lautheitsbereich.

Auf Basis eines mathematischen Modells nach (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) zur Bestimmung der psychoakustischen Lästigkeit der erfassten Kraftfahrzeuge trägt erwartungsgemäß die Lautheit am stärksten zur Ausprägung der Lästigkeit bei. Dennoch zeigt sich, dass auch andere Parameter die psychoakustische Lästigkeit relevant beeinflussen. Ein Beispiel dafür sind Quads, die zwar eine niedrigere Lautheit als BSR-Fahrzeuge aufweisen, jedoch einen höheren Wert der psychoakustischen Lästigkeit zeigen. Auch beim Vergleich zwischen Krafträder und Lkw/Busse, die ähnliche Lautheitswerte haben, ist zu sehen, dass Krafträder aufgrund spezifischer Geräuscheigenschaften höhere PA-Werte erzeugen. Es zeigt sich, dass bei Einsatzfahrzeugen die Schärfe aufgrund der Martinshörner besonders auffällig ist, wohingegen bei Krafträdern, Oldtimern und Quads die Rauigkeit aufgrund prominenter Motorgeräusche eine wichtige Rolle spielt. Bei Lkw, Bussen, BVG- sowie BSR-Fahrzeugen trat häufiger eine ausgeprägte Tonalität sowie Schärfe auf.

Die Ergebnisse zur psychoakustischen Lästigkeit zeigen auch, dass die Fahrzeugklassen der Krafträder und Pkw eine hohe Anzahl an Ausreißern aufweisen, was darauf hindeutet, dass Fahrer dieser Fahrzeuge tendenziell häufiger auffällige Fahrweisen zeigen. Vor allem bei den Krafträdern treten viele Ausreißer mit sehr hohen PA-Werten auf. Hier liegt nahe, dass durch besonders lärmprovozierende Fahrweisen oder durch technische Manipulationen ein ungewöhnlich hohes Geräuschniveau provoziert wird.

Bei der Analyse spezifischer Fahrweisen auf Basis subjektiver Bewertungen zeigte sich, dass häufig lärmprovozierende Fahrweisen maschinell erkannt wurden. Durch maschinelles Lernen konnte gezeigt werden, dass unauffällige und lärmprovozierende Fahrweisen durchaus mit guter Genauigkeit automatisiert klassifiziert werden können. Es wurden zwei verschiedene Modelle getestet, die jeweils gute Klassifikationsergebnisse zeigten und die subjektiven Einschätzungen gut abbilden konnten. Insgesamt wurde deutlich, dass durch spezielle Fahrweisen Fahrzeugführende bewusst laute Geräusche hervorgerufen, was die Notwendigkeit unterstreicht, derartige vermeidbare Geräuschemissionen zu sanktionieren.
Die psychoakustische Analyse der Geräusche, welche durch verschiedene Fahrweisen verursacht wurden, zeigte deutlich, dass lärmprovozierende Fahrweisen generell lauter und psychoakustisch viel auffälliger sind. Die Geräusche durch lärmprovozierende Fahrweisen weisen damit eine deutlich höhere psychoakustische Lästigkeit auf und sind daher auch als besonders kritisch einzuschätzen. Neben der Lautheit sind die Rauigkeit und Schwankungsstärke bei lärmprovozierenden Fahrweisen höher als bei einer unauffälligen Fahrweise.

Psychoakustische Größen als zusätzliche Information zur Bewertung lauter Kraftfahrzeuge

Die Herausforderung bei der Einbeziehung der Psychoakustik liegt darin, dass sie auf verschiedene Normen und Standards beruht, wodurch die Berechnungen der Parameter möglicherweise aufwendiger sind. Jedoch zeigte die psychoakustische Analyse der über 2.000 erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge, dass nicht nur die Lautheit relevant für die psychoakustische Lästigkeit ist. Die Formel zur Bestimmung der psychoakustischen Lästigkeit zeigte,

dass Lautheit – stark korreliert mit dem Schalldruckpegel – zwar den größten Einfluss darauf hat, ob ein Kraftfahrzeuggeräusch besonders lästig ist oder nicht. Jedoch besitzen auch andere psychoakustische Parameter neben der Lautheit einen Einfluss auf die psychoakustische Lästigkeit und sollten genutzt werden, um die wahrgenommene Störwirkung noch besser vorherzusagen. Bei lärmprovozierendem Fahrverhalten konnten ferner deutliche Unterschiede in den psychoakustischen Ausprägungen wie Rauigkeit und Schwankungsstärke festgestellt werden. Diese Unterschiede deuten wiederum auf eine erhöhte Lästigkeit dieser Geräusche hin, die allein mit dem Dezibelwert nicht ausreichend erfasst wird. Langfristig könnte es daher sinnvoll sein, auffällige Geräuscheigenschaften, die beispielsweise durch das Aufheulen eines Motors verursacht werden, als Kriterien für die Lärmbelastung zu berücksichtigen, da auch diese Geräuschmuster zur Lärmbelästigung beitragen.

Ableitung einer Dezibelgrenze für Fahrzeugklassen

Die Festlegung einer pauschalen Dezibelgrenze für alle Fahrzeugklassen erscheint schwierig, da die Fahrzeugklassen unterschiedliche Funktionen, Anforderungen und technische Voraussetzungen haben. Einsatzfahrzeuge wie Rettungswagen oder Polizei müssen von Natur aus laut und auffällig sein, um im Notfall wahrgenommen zu werden. Ebenso erzeugen Lkw und Busse aufgrund ihrer leistungsstärkeren Motoren häufig größere Geräuschemissionen. Ein einheitlicher Grenzwert würde diesen Unterschieden möglicherweise nicht gerecht werden beziehungsweise müssten bestimmte Fahrzeugklassen bei einer Erfassung anhand einer einheitlichen Dezibelgrenze ausgeschlossen werden. Ferner müssten gegebenenfalls Grenzwerte auch in Abhängigkeit der geltenden Geschwindigkeit oder anderen Vorgaben formuliert werden. Ein Schwellenwert müsste so angesetzt werden, dass er nur durch eindeutig nicht adäquates Verhalten bzw. technischer Manipulationen erreicht werden kann (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022). Hier leitet Jäggi et al. theoretisch einen einheitlichen Schwellenwert als zulässigen Maximalpegel von 82 Dezibel (A-bewertet) auf Basis von technischen Vorschriften ab, der typische Geräuschemissionen für Stadtverkehr berücksichtigt. In dieser Überlegung werden jedoch ältere Fahrzeuge, Steigungen, besondere Fahrzeugkategorien wie Quads, Mofas, Traktoren oder auch höhere Fahrgeschwindigkeiten nicht berücksichtigt. Daher werden, wie die Analyse aktueller Lärmblitzer in anderen Ländern zeigt, häufig auch noch höhere Grenzwerte angesetzt.

Aus der akustischen Analyse heraus ist bemerkenswert, dass Pkw und Krafträder zwar im Durchschnitt nicht die lautesten erfassten Fahrzeugklassen im Mittel sind, aber am häufigsten sogenannte Ausreißer aufweisen. Das heißt in diesen Fahrzeugklassen wurden besonders häufig besonders laute und lästige Geräuschereignisse beobachtet. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, derartige Lärmverstöße zu sanktionieren und damit mittelfristig im städtischen Kontext zu unterbinden. Die erhebliche Streuung innerhalb dieser Fahrzeugklassen erschwert es zudem, eine Schalldruckpegelgrenze festzulegen. Die hier erprobte Schwelle von 82 Dezibel (A-bewertet) erlaubt nur eine statistische Betrachtung der lauten Kraftfahrzeuge ab diesem Dezibelwert. Pkw und Krafträder, die unter dieser Schwelle liegen, wurden nicht erfasst, weshalb hier keine Aussage gegeben werden kann, wie der Schalldruckpegel im Mittel bei weniger auffälligen Kraftfahrzeugen häufig ausfällt. Die Tatsache, dass ca. 0,5 Prozent aller Kraftfahrzeuge[27] am Kurfürstendamm als übermäßig laute Kraftfahrzeuge erfasst wurden, zeigt zumindest, dass die erprobte Schwelle nicht zu sensitiv gewählt wurde.

Aus Lärmwirkungssicht sind vor allem die besonders lauten Geräusche kritisch. Hierbei zeigte sich bezüglich der psychoakustischen Lästigkeit eine überproportionale Zunahme der berechneten Lästigkeit bei Schalldruckpegeln größer 95 Dezibel (A-bewertet). Derartig laute Kraftfahrzeuge sind daher unbedingt zu vermeiden und müssten besonders wirksam sanktioniert werden.
Für andere Fahrzeugklassen wie Quads, Lkw und Oldtimer wurden deutlich weniger Ausreißer beobachtet, was die Festsetzung eines Grenzwertes möglicherweise erleichtert und nicht zwingend nach abgestuften Sanktionen verlangt.

[27] Bezogen auf die durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge auf Basis der Berliner Lärmkartierung aus dem Jahr 2022.

Automatische Erfassung technisch manipulierter Kraftfahrzeuge und lärmprovozierender Fahrweisen

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Frage, ob technisch manipulierte Kraftfahrzeuge zur Erhöhung der Geräuschemission, möglichweise durch illegale Veränderungen am Kraftfahrzeug, automatisiert erkannt werden können. Allein durch eine Analyse der erfassten Geräuschmerkmale lässt sich schwer feststellen, ob ein Kraftfahrzeug (illegal) manipuliert wurde. Um eine zuverlässige Erkennung zu ermöglichen, wäre zukünftig noch ein umfangreicher Abgleich mit Referenzmessdaten desselben Fahrzeugmodells ohne Manipulation erforderlich, was derzeit mit der hier verwendeten Lärmblitzertechnologie nicht möglich ist.
Dazu ist es schwierig, selbst wenn eine erhebliche akustische Abweichung zur Standardakustik des Kraftfahrzeuges vorliegt, nachzuweisen, dass eine illegale Fahrzeugmanipulation vorliegt. Ein nachträglich eingebauter Auspuff beispielsweise könnte innerhalb der rechtlichen Vorgaben liegen, solange dieser eine Typ-Genehmigung für das Fahrzeug besitzt oder nachträglich in die Fahrzeugpapiere eingetragen wurde. Daher bleibt aktuell eine Vor-Ort-Kontrolle, bei der das Kraftfahrzeug und die Betriebserlaubnis überprüft werden, nach wie vor die einzige Methode, um illegale Manipulationen am Kraftfahrzeug sicher festzustellen. Jedoch zeigte sich bereits im Rahmen der Auswertung der in der Pilotstudie erfassten Kraftfahrzeuge, dass für die automatische Erkennung von beispielsweise lärmprovozierender Fahrweisen KI-Methoden anhand der Berücksichtigung akustischer Merkmale bereits gute Erkennungsleistungen hervorbringen. Daher erscheint es denkbar, dass zukünftig auch andere Auffälligkeiten, zum Beispiel verursacht durch technische Veränderungen am Fahrzeug, automatisch erkannt werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

16.BImSchV. (2020). Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des BundesImmissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV). *Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. November 2020 (BGBl. I S. 2334) geändert worden ist.* Deutschland.

Acoustics, HEAD. (2018, 02). *Loudness and sharpness calculation.* Retrieved from head-acoustics.com: https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/global/Application-Notes/SVP/Psychoacoustic-Analyses-I_e.pdf

ADAC. (2024, 02 27). *Schutz vor Straßenverkehrslärm: So geht's.* Retrieved from https://www.adac.de/verkehr/standpunkte-studien/positionen/laermschutz/

Aures, W. (1985). Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. *Acta Acustica united with Acustica, 59, 2*, pp. 130-141.

Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO Environmental. *Int. J. Environ. Res. Public Health. Vol. 15 Issue 3,.*

Bernfeld, D. a. (2023). Hydre: a noise radar to automatically track down excessively noisy vehicles in real traffic conditions. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference* (pp. 4959-4966). INTER-NOISE. Retrieved from Hydre: a noise radar to automatically track down excessively noisy vehicles in real traffic conditions.

Bruitparif. (2022). *Le Francilophone.* Retrieved from Bruitparif.fr: https://www.bruitparif.fr/pages/Thematiques/900%20Bruit%20du%20trafic%20routier/500%20Ressources%20documentaires/2022-03-24%20-%20Le%20Francilophone%20N°38%20-%20Spécial%20radars%20sonores.pdf

Bruitparif. (2024, 07 16). *EXPÉRIMENTATION RÉUSSIE POUR LE PROTOTYPE DE RADAR SONORE HYDRE À GENÈVE.* Retrieved from Bruitparif.fr: https://www.bruitparif.fr/experimentation-reussie-pour-le-prototype-de-radar-sonore-hydre-a-geneve/

Bruitparif. (2024). *LE PROTOTYPE DE RADAR SONORE HYDRE MIS AU POINT PAR BRUITPARIF AUX FINS DE CONTRÔLE-SANCTION DES VÉHICULES EXCESSIVEMENT BRUYANTS.* Retrieved from Bruitparif: https://www.bruitparif.fr/le-prototype-de-radar-sonore-hydre-mis-au-point-par-bruitparif-aux-fins-de-controle-sanction-des-vehicules-excessivement-bruyants/

Calvo, J., Álvarez-Caldas, C., San Romána, J., & Colob, P. (2012). Influence of vehicle driving parameters on the noise caused by passenger cars in urban traffic. *Transportation Re-search Part D: Transport and Environment, 17 (7)*, 509-513.

Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica, 83,1*, pp. 113-123.

Di, G.-Q., Chen, X.-W., Song, K., Zhou, B., & Pei, C.-M. (2016). Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises. *Applied Acoustics, 105*, pp. 164-170.

DIN/ISO532-1. (2022). *Akustik - Verfahren zur Berechnung der Lautheit - Teil 1: Verfahren nach Zwicker.* Berlin: Beuth Verlag.

DIN45692. (2009). *Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe.* DIN: Berlin, Germany.

Ertsey-Bayer, M., Kirchhoff, N., Alves, S., Peeters, B., Henriksen, V., & Berge, T. (2021). NEMO project: developing a N-RSD (Noise Remote Sensing Device) to. *InterNoise* (pp. 1773-1783). Washington : Institute of Noise Control Engineering.

EU. (2002). Umgebungslärmrichtlinie. *Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.* Europäisches Parlament und Rat.

EU. (2018, 06). *Regelung Nr. 51 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern hinsichtlich ihrer Geräuschemissionen [2018/798].* Retrieved from Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union:

https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/09bcd363-67c8-11e8-ab9c-01aa75ed71a1

European Environment Agency. (2022, 07 18). *Health impacts of exposure to noise from transport.* Retrieved from https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/health-impacts-of-exposure-to-1/?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b

Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: facts and models.* Springer Science & Business Media.

Greco, G. F.-M. (2023). SQAT: a MATLAB-based toolbox for quantitative sound quality analysis. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (pp. 7172-7183). Institute of Noise Control Engineering.

Huth, C., Eberlei, G., & Liepert, M. (2019). Überprüfung der Geräuschemissionen von Motorrädern im realen Verkehr. *TEXTE 00/2019*. Umweltbundesamt.

ISO362-1. (2022). *Acoustics — Engineering method for measurement of noise emitted by accelerating road vehiclesPart 1: M and N categories*. Genf, Schweiz: International Organization for Standardization.

Jäggi, J., Heutschi, K., & Wunderli, J. M. (2022). *Herleitung eines Schwellenwerts für übermässig laute Fahrzeuge.* https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=71239&Load=true: Bundesamt für Umwelt BAFU.

Khomenko, S., Cirach, M., Barrera-Gomez, Jose, Pereira-Barboza, E., Lungman, T., . . . Jephcote, C. (2022). Impact of road traffic noise on annoyance and preventable mortality in European cities: A health impact assessment. *Environment internationalVolume 162, 107160*.

Kleffmann, P. (2024, 07 23). *NDR.* Retrieved from Die Nordreportage: Power, Poser und die Polizei: https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/die_nordreportage/Power-Poser-und-die-Polizei,sendung1265546.html

Kolingba, P. (2024). *Untersuchung zur Auffälligkeit von Vorbeifahrtgeräuschen im Realverkehr im Rahmen einer Pilotstudie.* Berlin: Technische Universität Berlin, Masterarbeit.

Mietlicki, C. (2021). *Frankreich Patent No. Systeme de localisation d'une source sonore, notamment de nuisances sonores provenant de vehicules. FR3131640B1.*

Mietlicki, C., & Mietlicki, F. (2018). Medusa. A new approach for noise management. *Euronoise* (pp. 727-730). Kreta: EAA.

Mietlicki, C., Mietlicki, F., & Bernfeld, D. (2022). Hydra: a noise radar to automatically track down excessively noisy vehicles in real traffic conditions. *Internoise .* Glasgow.

Mobilitätsmagazin. (2024, 09 06). *Autoposer: Welches Bußgeld droht bei illegalem Tuning?* Retrieved from Mobilitätsmagazin von bussgeldkatalog.org: https://www.bussgeldkatalog.org/autoposer/#bussgeldtabelle

Müller, M. (2015). *Fundamentals of music processing: Audio, analysis, algorithms, applications.* Springer.

Normung, D. I. (2009). *Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe*. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag.

Osses, A., García, L. R., & Kohlrausch, A. (2016). Modelling the sensation of fluctuation strength. *Proceedings of Meetings on Acoustics, 28, 1*.

WHO. (2009). *Health impacts of exposure to noise from transport*. Genf, Schweiz: World Health Organization.

WHO. (2018). *World Health Organization (2018). Noise guidelines for the European Region*. Kopenhagen, Dänemark: World Health Organization.

Zwicker, E. (2017). ISO 532-1. Acoustics—Methods for Calculating Loudness—Part 1: Zwicker Method. *International Organisation for Standardization (ISO) Geneva, Switzerland*.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Die verschiedenen Komponenten des Lärmblitzers "Hydre". Abbildung von der Website von Bruitparif mit deutscher Übersetzung. URL: https://www.bruitparif.fr/le-radar-sonore-hydre, Zugriff am 10.12.2024 10

Abbildung 2: Beispielkonfiguration mit dem Hydre-System. Der Fokuspunkt liegt an der Spitze des roten Dreiecks. Abbildung von der Webseite von Bruitparif. https://www.bruitparif.fr/le-radar-sonore-hydre, Zugriff am 10.12.2024 11

Abbildung 3: Versuchsaufbau am Kurfürstendamm, Berlin. Der Lärmblitzer ist durch ein schwarzes Quadrat gekennzeichnet, der schwarze Pfeil stellt die Aufnahmerichtung der Kamera dar. Die grünen Pfeile stellen die Wege der Fahrzeuge dar, deren Erfassung erwünscht ist, während die roten Pfeile die Wege der Fahrzeuge darstellen, deren Erfassung unerwünscht ist. 12

Abbildung 4: Boxplots der Lautheitswerte N_5 nach Fahrzeugklassen nach Medianwerten absteigend sortiert. 16

Abbildung 5: Boxplots zu den psychoakustischen Werten nach den zusammengefassten Fahrzeugklassen leichte Kraftfahrzeuge (LF), Krafträder (Krad) und schwere Kraftfahrzeuge (SF). Von links oben nach rechts unten: Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonalität, Psychoakustische Lästigkeit nach (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016) 17

Abbildung 6: Lineare Regressionsgeraden für den Zusammenhang der Größen zur Quantifizierung der Lautstärke (Lautheit und Schalldruckpegel) für die zusammengefassten Fahrzeugklassen leichte Kraftfahrzeuge, Krafträder und schwere Kraftfahrzeuge. Lautheit (N_{max} in phon) über Schalldruckpegel (L_{AFmax} in Dezibel (A-bewertet)). 18

Abbildung 7: Boxplot der Werte der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) nach Fahrzeugklassen nach Medianwerten absteigend sortiert. 18

Abbildung 8: Medianwerte (absolut) der einzelnen Beiträge (w_S, w_R, w_{FS}, w_T) zum PA-Wert nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016). Die einzelnen Werte geben an, wie der PA-Wert durchschnittlich durch ausgewählte psychoakustische Parameter über die Lautheit hinaus erhöht wird (siehe exakte Berechnung der psychoakustischen Lästigkeit im Anhang). 19

Abbildung 9: Zusammenhang zwischen dem maximalen Schalldruckpegel L_{AFmax} (in Dezibel (A-bewertet)) und der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) für alle erfassten Kraftfahrzeuge. In rot (linear) und orange (quadratisch) sind Regressionsmodelle eingezeichnet, die den mathematischen Zusammenhang von maximalen Schalldruckpegel und psychoakustischer Lästigkeit exemplarisch approximieren. 21

Abbildung 10: Ausreißer, das heißt besonders auffällige Vorbeifahrten, in der Fahrzeugklasse Pkw. Dargestellt sind die prozentualen Anteile der ermittelten Lärmursache 22

Abbildung 11: Lineare Regression zwischen psychoakustischer Lästigkeit und Motorleistung in Kilowatt (oben) und Hubraum in Kubikzentimetern (unten). Es ist jeweils die lineare Regressionsgerade eingezeichnet 23

Abbildung 12: Der Graph stellt einerseits die absolute Häufigkeit der erfassten übermäßig lauten Kraftfahrzeuge über den Tag dar (rot) sowie die Mittelwerte der psychoakustischen Lästigkeit nach Di et al. (2016) (grün). 24

Abbildung 13: Spezifische Lautheit pro Frequenzgruppe in Bark. Vergleich der spezifischen Lautheiten von erfassten lauten Kraftfahrzeugen zwischen Regentagen (in blau) und normalen Tagen (in rot). 25

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1. Übersicht über eingesetzte Lärmblitzer (Jäggi, Heutschi, & Wunderli, 2022) 8

Tabelle 2: Auflistung der psychoakustischen Ausprägungen über Fahrzeugklassen. Dargestellt sind jeweils der arithmetische Mittelwert (AM) und die Größe des Interquartilbereiches (IQR) ermittelt für sämtliche Vorbeifahrten in der jeweiligen Fahrzeugklasse. 15

Tabelle 3: Verteilung der Antworten in einer Befragung mit 7 Teilnehmenden. Die Kategorie ”Lärmprovozierend” umfasst die Antworten ”Beschleunigen”, ”Bremsen” und ”H/N-tourig (Hoch-Niedertourig)” und ”Gasstoß im Leerlauf”, aber nicht „hupen“. 27

Tabelle 4: Medianwerte und Interquartilsabstände (IQR) der psychoakustischen Parameter Lautheit (N), Schärfe (S), Rauigkeit (R), Schwankungsstärke (FS), Tonhaltigkeit (K) und psychokustische Lästigkeit (PA) analysiert nach Fahrweise. 28

ANHANG

Psychoakustische Lästigkeit (PA) nach Di et al. (Di, Chen, Song, Zhou, & Pei, 2016)

$$PA_{Di2016} = N \cdot (1 + \sqrt{w_S^2 + w_{FR}^2 + w_T^2}$$

Die spezifischen Gewichte der psychoakustischen Parameter sind wie folgt definiert:

$$w_s = \begin{cases} (S - 1{,}75) \cdot 0{,}25 log_{10}(N + 10) & wenn\, S > 1{,}75 \\ 0 & wenn\, S \leq 1{,}75 \end{cases}$$

$$w_{FR} = \frac{2{,}18}{N^{0{,}4}} \cdot (0{,}4F + 0{,}6R)$$

$$w_T = \frac{6{,}41}{N^{0{,}52}} \cdot T$$

Senatsverwaltung
für Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt

BERLIN

Öffentlichkeitsarbeit
Am Köllnischen Park 3
10179 Berlin

www.berlin.de/sen/mvku

Berlin, 01/2025