TEXTE
116/2022

Abschlussbericht

Analyse der Auswirkungen von Klappenauspuffanlagen

Teil 1 Marktübersicht

von:

Frank Schneider
TÜV-Verband e.V., Berlin

Michael Ebert, Fabian Rinske
TÜV SÜD, Garching

Michael Mieth, Can-Polat Gürses
FAKT GmbH, Heimertingen

Gerald Mlinski
TÜV NORD, Essen

Michael Schmitt
TÜV Rheinland, Köln

Enrico Wagner, Rayko Glowa
DEKRA, Klettwitz

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 116/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 54 101 1

FB000854

Abschlussbericht

Analyse der Auswirkungen von Klappenauspuffanlagen

Teil 1 Marktübersicht

von

Frank Schneider
TÜV-Verband e.V., Berlin

Michael Ebert, Fabian Rinske
TÜV SÜD, Garching

Michael Mieth, Can-Polat Gürses
FAKT GmbH, Heimertingen

Gerald Mlinski
TÜV NORD, Essen

Michael Schmitt
TÜV Rheinland, Köln

Enrico Wagner, Rayko Glowa
DEKRA, Klettwitz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
TÜV-Verband e.V.
Friedrichstraße 136
10117 Berlin

Abschlussdatum:
Juni 2022

Redaktion:
Fachgebiet I 2.3 Lärmminderung im Verkehr
Dr. Lars Schade

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Analyse der Auswirkungen von Klappenauspuffanlagen

Im Forschungsvorhaben „Analyse der Auswirkungen von Klappenauspuffanlagen“ findet eine detaillierte Analyse von Abgasklappen bzw. Akustikklappen und weitere Möglichkeiten des Sound-Designs, wie Soundgeneratoren oder Ansauganlagen statt, um in einem Folgevorhaben Handlungsoptionen für den Gesetzgeber aufzuzeigen und mit Messdaten zu unterlegen. Dazu werden zuerst die Bauformen, Funktionsweisen und Verwendungsgründe der genannten Komponenten dokumentiert. Ergänzend dazu werden die Vorgaben des Kraftfahrt-Bundesamtes für die Erteilung einer Genehmigung für solche Komponenten beschrieben. Anhand von verschiedenen Beispielfahrzeugen wird ein Überblick über die Marktlage und die unterschiedlichen Verwendungsgründe gegeben. Mit den Erfahrungswerten der Technischen Dienste und der Auswertung der KBA-Zulassungsstatistik erfolgt eine grobe Annäherung, wie viele der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge über eine Auspuffklappe verfügen. Anhand von zwei Beispielfahrzeugen werden praktische Geräuschmessungen durchgeführt, um die Herstellerangaben zu überprüfen und einen ersten Ausblick über die Anforderungen an ein tiefergehendes Messprogramm zu geben. Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens werden die aktuell gültigen Regelungen zur Geräuschmessung der UNECE aufgeführt, auf Grauzonen untersucht sowie die darin aus Sicht der Technischen Dienste erkennbaren Verbesserungsmöglichkeiten beschrieben. Der Abschluss der Arbeit richtet einen Blick in die Zukunft, in der durch neue Antriebs- und Mobilitätsformen, wie zum Beispiel Elektromobilität und das Autonome Fahren, neue Herausforderungen für die Geräuschentwicklung und deren Vorschriftsmäßigkeit entstehen.

Abstract: “Analysis of the effects of flap exhaust systems”

The research project "Analysis of the effects of flap exhaust systems" provides a detailed assessment of exhaust flaps or acoustic flaps and other sound design options, such as sound generators or intake systems. This analysis is intended to indicate legislative options for action in a follow-up project and to substantiate these options with measurement data. For this purpose, the designs, modes of operation and reasons for use of the components mentioned will initially be documented. In addition, the requirements of the Kraftfahrt-Bundesamt (German Federal Motor Transport Authority) for granting approval for such components will be described. A number of exemplary vehicles illustrate both the current market situation and the various applications. Taking into account the experiences of the technical services and the evaluation of the KBA registration statistics, a rough approximation for the number of vehicles registered in Germany that are equipped with an exhaust flap is provided. Two sample vehicles will be used to carry out practical noise measurements in order to verify the manufacturer's data and to provide a first indication of the requirements for a more in-depth measurement program. In the second part of the research project, the currently valid regulations for noise measurement of the UNECE are listed. These regulations are reviewed for gray areas and, from the perspective of the technical services, identifiable opportunities for improvement are described. The conclusion of the work takes a look into the future. New forms of propulsion and mobility, such as electromobility and autonomous driving, are creating new challenges for sound design and its compliance with regulations.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 6
Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 9
Abkürzungsverzeichnis 10
Zusammenfassung 12
Summary 17
1 Aufgabenstellung 22
2 Geräuschemissionen im Straßenverkehr 23
3 Möglichkeiten des Sounddesigns 24
3.1 Luftansaugung 24
3.1.1 Luftfilter 24
3.1.2 Saugmodul 25
3.2 Motorsoftware 25
3.3 Klappenanlagen 26
3.3.1 Bauarten und Funktionsweisen 27
3.3.2 Verwendungsgründe 30
3.3.3 Typgenehmigungsverfahren 34
3.3.4 Beispielfahrzeuge 36
3.3.5 Marktanteile 38
3.4 Soundaktuatoren 42
3.4.1 Bauarten 42
3.4.2 Funktionsweise 43
3.4.3 Verwendungsgründe 45
3.4.4 Typgenehmigungsverfahren 46
3.4.5 Marktanteile und Beispielfahrzeuge 47
4 Sounddesign in der Praxis 48
4.1 Luftansaugung 48
4.2 Abgasanlage mit Akustikklappe 49
4.3 Weitergehende Untersuchungen 51
5 Vorschriften zur Reglementierung der Geräuschemissionen 53
5.1 Rückblick 53
5.2 Aktuelle Vorschriften 57
5.2.1 UN-Regelung Nr. 51.03 57

5.2.2 Entwurf UN-Regelung Nr. 51.03 Ergänzung 9 63
5.2.3 UN-Regelung Nr. 41.04 64
5.2.4 UN-Regelung Nr. 41.05 66
5.2.5 UN-Regelung Nr. 138 66
5.3 Grauzonen 68
5.3.1 UN-Regelung Nr. 51.03 68
5.3.2 UN-Regelung Nr. 138 73
5.4 Verbesserungsmöglichkeiten 74
5.4.1 UN-Regelung Nr. 51.03 74
5.4.2 UN-Regelung Nr. 138 78
6 Ausblick 79
6.1 Verbrennungsmotoren 79
6.2 Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb 79
7 Zusammenfassung der Ergebnisse 80
8 Quellenverzeichnis 83
A KBA Informationsschreiben 86
A.1 Info-Schreiben des KBA zum Thema Klappenabgasanlagen 86
A.2 Info-Schreiben des KBA zum Thema Soundaktuatoren 88
B Messergebnisse 91
B.1 VW Golf R 91
B.2 VW Arteon R 92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Offener Sportluftfilter 24
Abbildung 2: Saugmodul 25
Abbildung 3: Schalldämpfer mit den gängigen Wirkprinzipien 26
Abbildung 4: Einflutige Abgasanlage 27
Abbildung 5: Auspuffklappe an einem Endrohr eines Nachschalldämpfers 27
Abbildung 6: Passive Auspuffklappe 28
Abbildung 7: Aktive Auspuffklappe mit Unterdruckverstellung 28
Abbildung 8: Aktive Auspuffklappe mit elektrischem Stellmotor 29
Abbildung 9: Auswahlmöglichkeiten verschiedener Fahrprofile 30
Abbildung 10: Variable Akustikklappe an einem Nachschalldämpfer 31
Abbildung 11: Mündungspegel einer Abgasanlage mit Akustikklappe 31
Abbildung 12: Klappenstellung in Abhängigkeit von der Motordrehzahl 32
Abbildung 13: Abgaskreislauf der Abgasrückführung 33
Abbildung 14: Abgasklappe der Abgasrückführung eines Dieselmotors 34
Abbildung 15: Fahrzeugklassen in Deutschland 2021 38
Abbildung 16: Fahrzeugsegmente in Deutschland 2020 39
Abbildung 17: Verbrennungsarten PKW in Deutschland 2021 40
Abbildung 18: Emissionsgruppen PKW in Deutschland 2021 41
Abbildung 19: Einteilung der Krafträder nach Hubraum 41
Abbildung 20: Innengeräusch-Soundaktuator 43
Abbildung 21: Aktiver Schalldämpfer 44
Abbildung 22: Außengeräusch-Aktuator mit Abgasstrang 45
Abbildung 23: Optimiertes Saugmodul 48
Abbildung 24: Maße des Geräuschmessfeldes 55
Abbildung 25: Charakteristische Linien im Geräuschmessfeld 56
Abbildung 26: Mikrofonpositionierung für Standgeräuschmessung 56
Abbildung 27: Ein-Gang Messung Typ A und Typ B 60
Abbildung 28: Zwei-Gang Messung Typ A und Typ B 60
Abbildung 29: Standgeräuschmessung bei mehreren Auspuffendrohren 62
Abbildung 30: Grenzbedingungen RD-ASEP 64
Abbildung 31: Position des Fahrzeugs im Messfeld 68
Abbildung 32: Mechanische und elektronische Gaswegbegrenzung 70
Abbildung 33: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit des PMR 72
Abbildung 34: Abhängigkeiten des Reifenrollgeräuschs 77
Abbildung 35: Einflussfaktoren auf Standgeräuschmessung 78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zulassungszahlen Fahrzeuge mit Akustikklappe 39
Tabelle 2: Ergebnisse Fahrgeräuschmessung VW Golf R 49
Tabelle 3: Ergebnisse Standgeräuschmessung VW Arteon R 49
Tabelle 4: Mögliche Klappenstellungen im Fahrbetrieb 51
Tabelle 5: Übersicht der Grenzwerte ab 1938 54
Tabelle 6: Grenzwerte Vorbeifahrt Kraftfahrzeuge 57
Tabelle 7: Kontrollbereich RD-ASEP 63
Tabelle 8: Grenzwerte Vorbeifahrt Kraftrad 65
Tabelle 9: Minimum Pegel Anforderungen für AVAS 67

Abkürzungsverzeichnis

AA'	Linie, die senkrecht zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs verläuft und den Beginn des Messbereichs angibt
AGR	Abgasrückführung
ASEP	Additional Sound Emissions Provision
a_{urban}	Zielbeschleunigung, die die Beschleunigung des Stadtverkehrs darstellt
AVAS	Akustisches Fahrzeug-Warnsystem (Acoustic Vehicle Alerting System)
a_{wot}	Beschleunigung bei komplett geöffneter Drosselklappe
$a_{wot\ ref}$	Referenzbeschleunigung für die Prüfung mit komplett geöffneter Drosselklappe
BB'	Senkrecht zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs verlaufende Linie, die 10 m hinter der Linie PP' liegt
BGBl	Bundesgesetzblatt
CAN	Controller Area Network
CC'	Fahrlinie des Fahrzeugs durch die in ISO 10844 definierte Prüffläche
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
ECE	Economic Commission for Europe
EG	Europäische Gemeinschaft
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
ggü.	gegenüber
ISO	Internationale Organisation für Normung
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
k-Faktor	Ganggewichtungsfaktor
Kfz	Kraftfahrzeug
k_p-Faktor	Teillastfaktor
Krad	Kraftrad
L_{crs}	Schalldruckpegel des Fahrzeugs bei Prüfung mit konstanter Geschwindigkeit
LKW	Lastkraftwagen
L_{urban}	Angegebener Schalldruckpegel des Fahrzeugs im Stadtbetrieb
l_{veh}	Länge des Fahrzeugs
L_{wot}	Schalldruckpegel des Fahrzeugs bei komplett geöffneter Drosselklappe
m_{ro}	Masse im fahrbereiten Zustand
m_t	Testgewicht des Fahrzeugs
$n_{AA'}$, $n_{PP'}$, $n_{BB'}$	Motordrehzahl des Fahrzeugs, wenn der Bezugspunkt Linie AA‘, PP‘ oder BB' passiert

NFZ	Nutzfahrzeug
n_{idle}	Leerlaufdrehzahl des Motors
NO_x	Stickoxide
OBD	On Board Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
PKW	Personenkraftwagen
PMR	power-to-mass ratio (Leistungs-Masse-Verhältnis)
P_n	Nennleistung des Motors
PP'	Linie, die senkrecht zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs verläuft und die Position der Mikrofone anzeigt
RD-ASEP	Real Driving Additional Sound Emission Provisions
RSA	Reference Sound Assessment
S	Nenndrehzahl des Motors
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SUV	Sport Utility Vehicle
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UN	United Nations
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UN-R	United Nations Regulation
v. H.	Von Hundert
v_{AA}, v_{PP}	Fahrzeuggeschwindigkeit, wenn der Bezugspunkt die Linie AA' oder PP‘ passiert
v_{BB}	Geschwindigkeit des Fahrzeugs, wenn der Bezugspunkt oder das Heck des Fahrzeugs die Linie BB' passiert

Zusammenfassung

„Das Auto ist die sichtbar gemachte Seele des Mannes“ sagte einst der Philosoph Manfred Hinrich. Dabei verkörpern Fahrzeuge neben rationalen Faktoren, wie die Mobilität und Unabhängigkeit, auch emotionale Aspekte, wie Statussymbol, Lifestyle und Individualität. Allerdings befindet sich die Automobilbranche seit kurzem in einem starken Wandel.

Durch das in Politik und in der Gesellschaft immer stärker werdende Umweltbewusstsein ist die Automobilbranche gefordert, die Schadstoff- und auch Geräuschemission kontinuierlich zu reduzieren. Lärm ist in der heutigen Zeit ein großes Umweltproblem und der Straßenverkehr ist dabei eine der gewaltigsten Geräuschquellen. Das Bundesverkehrsministerium hat bereits 2008 ein Nationales Verkehrslärmschutzpaket II erarbeitet, das eine Reduzierung des Straßenverkehrslärms um 30 % bis zum Jahr 2020 vorgesehen hat. Die Verkehrsministerkonferenz hat sich – zuletzt 2019 – dafür ausgesprochen, das Nationale Verkehrslärmschutzpaket aus dem Jahre 2008 erneut zu aktualisieren, um effektiv den Verkehrslärmschutz in Deutschland weiter auszubauen. Diese politischen Prozesse sind derzeit noch nicht abgeschlossen. Es besteht deshalb weiterhin Handlungsbedarf.

Um Geräuschemissionen im Straßenverkehr zu regeln, existieren gesetzliche Grenzwerte für Fahrgeräusche, die bei der Fahrzeugtypgenehmigung sowie bei der Serienüberprüfung (conformity of production) im Zwei-Jahres Rhythmus einzuhalten sind. Hierzu werden bereits seit 1938 Messungen des Fahrgeräuschs an Fahrzeugen und Krafträdern durchgeführt. Die entsprechenden Regularien sind international harmonisiert und werden in regelmäßigen Abständen überarbeitet. Dabei werden einerseits die Grenzwerte neu festgelegt, andererseits aber auch das Prüfprozedere überarbeitet. Im Jahr 2016 wurden im internationalen Vorschriftenwerk der UNECE umfangreiche Änderungen in Kraft gesetzt. Sie sorgen dafür, dass die gemessenen Geräuschpegel einen größeren Teil der Pegel im realen Straßenverkehr abbilden. Gleichzeitig wurden Grauzonen eingeschränkt oder geschlossen, welche zuvor durch Hersteller ausgenutzt werden konnten, um besonders laute Fahrzeuge legal in den Verkehr zu bringen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Entwicklungen der Geräuschgrenzwerte aufgezeigt und die wichtigsten aktuell geltenden Regelungen für Fahr- und Standgeräuschmessungen an Kraftfahrzeugen im Detail erläutert. Während Verschärfungen der Grenzwerte für die kommenden Jahre durch die aktuell geltende Regelung UN-Regelung Nr. 51.03 bereits festgelegt worden sind, werden in naher Zukunft zusätzlich erhebliche Erweiterungen der Prüfszenarien eingeführt. Der Fokus dieser Untersuchungen richtet sich besonders auf Klappenabgasanlagen und Soundaktuatoren. Um den sportlich orientierten Fahrzeughaltern einen „markanten Sound“ zu bieten, hat sich um diese Komponenten ein florierendes Marktsegment entwickelt, welches Regelungslücken der bestehenden Geräuschrichtlinien ausnutzt. Diese Grauzonen und Lücken wurden in der Arbeit aufgezeigt und Möglichkeiten beschrieben, diese zu verringern oder gar zu schließen.

Für dieses Forschungsvorhaben wurden folgende Möglichkeiten des Sounddesigns untersucht:

- Luftansaugung (Luftfilter, Saugmodul)
- Motorsoftware
- Klappenanlagen
- Soundaktuatoren

Bei der Luftansaugung können beispielsweise durch geschickte Auslegung der Konstruktion der Luftfilter oder der Ansaugkanäle die Geräuschemissionen nachteilig beeinflusst werden.

Auch der neue Tuningtrend der Softwareoptimierung wurde betrachtet. Bei diesem „Trend“ wird z. B. durch die Deaktivierung der Schubabschaltung in Verbindung mit der veränderten Kraftstoffzufuhr und Änderung des Zündzeitpunktes eine gezielte Fehlzündung im Abgastrakt ausgelöst, welche unter dem Begriff „Schubknallen“ bekannt ist.

Aufgrund der zum Teil hohen Komplexität der Klappenanlagen wurden im ersten Schritt die einzelnen Komponenten, der prinzipielle Aufbau einer Abgasanlage sowie die unterschiedlichen baulichen Ausführungen und Techniken von Klappenanlagen beschrieben. Die verschiedenen Bauformen, wie aktive oder passive Ausführung, und die verschiedenen elektrischen und pneumatischen Ansteuerungsmöglichkeiten lassen die Vielzahl der Verwendungs- und Einsatzmöglichkeiten erkennen.

Eine dieser Verwendungsmöglichkeiten ist das Sound-Design, welches vielen Fahrern und Fahrerinnen eines Sportwagens sehr am Herzen liegt, allerdings vielen Passantinnen und Passanten im Straßenverkehr eher ein Ärgernis ist. So konnte zum Beispiel durch das gezielte Umleiten des Abgasstroms in einen ungedämpften Kanal des Schalldämpfers der Abgasanlage der Geräuschpegel in einem Versuch um bis zu 10 dB(A) erhöht bzw. gesenkt werden. Ebenso hat die Auspuffklappe eine geringfügige Auswirkung auf die Motorleistung. Durch das Öffnen der Klappe bei hohen Geschwindigkeiten bzw. hoher Motordrehzahl konnte der Abgasgegendruck nach einem Versuch um etwa 80 mbar gesenkt und die Motorleistung bzw. das Motordrehmoment um bis zu 2 % bis 3 % erhöht werden.

Eine gewisse Sonderstellung nehmen Auspuffklappen bei Motorrädern ein. Diese wurden ursprünglich zur besseren Fahrbarkeit im unteren Drehzahlbereich und zur Drehmoment-Modulation verwendet. Auspuffklappen werden allerdings heute auch zum Sound-Design im Zweiradsektor verwendet.

Um die immer strenger werdenden Abgasnormen einzuhalten, dienten Auspuffklappen, sogenannte Abgasklappen, vor ein paar Jahren auch zur Schadstoffreduzierung. Durch die Platzierung der Klappe direkt nach den schadstoffmindernden Komponenten, wie Katalysator und Partikelfilter, kann neben der bereits vorhandenen Hochdruck-Abgasrückführung eine Niederruck-Abgasrückführung erfolgen. Dabei wird der Abgasstrom bei teilweiser oder ganz geschlossener Auspuffklappe gestaut und über ein Bypass-Ventil dem Ansaugtrakt wieder zugeführt. Durch diese thermischen und chemischen Prozesse kann somit auch der Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) reduziert werden.

Im Nutzfahrzeugbereich, wie Lastkraftwagen oder Bussen, kann durch eine Motorstaubremse – auch Auspuffklappenbremse genannt – die Motorbremswirkung erhöht werden, indem der Fahrzeugführer über ein Bedienelement, wie z. B. ein zusätzliches Pedal, die Klappe im Auspuff teils oder komplett verschließt. Dadurch bildet sich ein hoher Abgasgegendruck, und die Verdichtungsarbeit wird in Bremsleistung umgewandelt. Zugleich stellt die Einspritzpumpe die Kraftstoffversorgung auf Nullförderung um, und es kommt zu einer Schubabschaltung.

Nachdem die Fahrzeughersteller und Ausrüster verstärkt Zusatzsysteme, wie Klappenanlagen oder Soundgeneratoren, angeboten haben, veröffentlichte das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) im Juli 2019 unter Mitarbeit des TÜV-Verbands ein Informationsrundschreiben (IST 05-19). Gerichtet an Technische Dienste und Fahrzeughersteller wurden darin die Prüfanforderungen an Klappenauspuffanlagen im Rahmen der Typprüfung beschrieben. Danach muss der Hersteller auch das Verhalten der Klappe im Fehlerfall und bei Manipulation detailliert beschreiben.

Um einen groben Überblick über die Verwendung von Auspuffklappen zu erlangen, wurden diese in verschiedene Fahrzeugkategorien unterteilt und anhand von Beispielfahrzeugen dargestellt. Als repräsentative Beispielfahrzeuge wurden folgende Fahrzeugmodelle ausgewählt:

- BMW M135i
- Audi RS3
- Mercedes A-Klasse 220 CDI
- BMW S 1000 XR

Die Hersteller bewerben die beiden erstgenannten Beispielfahrzeuge auf Grund der Abgasanlage als leistungsstark und sportlich. Für die Verwendung zur Abgasrückführung wurde die Mercedes A-Klasse 220 CDI ausgesucht, die über eine Auspuffklappe nach den schadstoffmindernden Komponenten verfügt und einzig der Einhaltung der Schadstoffnorm Euro 5 dient. Als Beispiel für die Fahrzeugklasse Motorrad fiel die Wahl auf die BMW S 1000 XR, bei der typisch für Motorräder die Auspuffklappe vor dem Schalldämpfer angeordnet ist. Auch in diesem Beispiel warb BMW mit einem rennsportartigen Sounderlebnis.

Auspuffklappen als Motorstaubremse finden hingegen in nahezu allen Nutzfahrzeugen mit Druckluftbremse Verwendung und wurden in diesem Segment nicht sonderlich von den Fahrzeugherstellern beworben.

Aus keiner der bekannten Statistiken konnte abgeleitet werden, wie groß die Anzahl der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge mit verbauter Auspuffklappe ist. Vor diesem Hintergrund wurden basierend auf den Erfahrungen und Einschätzungen der am Projekt beteiligten Technischen Dienste zunächst die Fahrzeugklassen beschrieben, bei denen der Verbau von Auspuffklappen bekannt bzw. erwartbar war. In Kombination mit den offiziellen Zulassungsstatistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes wurden folgende erste Abschätzungen zu den Stückzahlen abgeleitet. Demnach waren im Jahr 2020 in Deutschland rund 48,5 Millionen PKW im Straßenverkehr zugelassen. Aus dieser Anzahl wurden die Fahrzeugsegmente Sportwagen, Mittelklasse, Kompaktklasse, Oberklasse, SUV und Geländewagen als repräsentativ für Akustikklappen eingestuft, da in anderen Segmenten wie z. B. Kleinstwagen oder Van eine Verwendung von Akustikklappen eher unüblich ist. Eine grobe Schätzung ergab einen Anteil von Akustikklappen bei Sportwagen von ca. 15 % und in den anderen Segmenten von ca. 2 %.

Dies entsprach für das Bezugsjahr 2020 einer Gesamtanzahl von rund 680.600 Fahrzeugen, die nach erster Einschätzung über eine Akustikklappe verfügen.

Nach der Zulassungsstatistik des KBA war der Anteil von dieselbetriebenen PKW bei ca. 30 % bezogen auf die Gesamtanzahl an zugelassenen PKW. Davon waren ca. 65 % mit der Abgasnorm Euro 5 oder Euro 6 konform. Da Fahrzeuge der Abgasnorm Euro 4 oder niedriger noch nicht über eine Abgasklappe für die Abgasrückführung verfügen, ergibt sich ein Anteil von ca. 20 % für dieselbetriebene Personenkraftwagen mit einer Abgasnorm von Euro 5 oder höherwertigere in Deutschland für 2021. Vor dem Hintergrund, dass manche Dieselfahrzeuge – insbesondere mit Harnstoffeinspritzung (AdBlue) – ohne Abgasklappe auskommen, konnte der Anteil auf rund 10 - 15 % reduziert werden. Somit waren im Bezugsjahr 2021 ca. 4,9 bis 7,3 Millionen Fahrzeuge mit Dieselantrieb und Abgasrückführungsklappe in Deutschland aktuell zugelassen.
Der Anteil an Krafträdern betrug im Kalenderjahr 2021 auf Deutschlands Straßen 4,8 Millionen Fahrzeuge. Nach Abzug der hubraumschwachen Typen ergab sich eine Anzahl von 3,6 Millionen Krafträdern. Nach eigenen Einschätzungen verfügen hier ca. 10 % über eine Auspuffklappe, weshalb man von etwa 360.000 Motorrädern mit Auspuffklappe ausgehen konnte.

Da Lastkraftwagen nach der Ausstattungsvorschrift gemäß § 41 StVZO mit einer Dauerbremse (dazu zählt auch die Motorstaubremse mit Auspuffklappe) ausgerüstet sein müssen, lässt sich sagen, dass – abzüglich weniger Fahrzeuge, die von Teilen der StVZO § 41 ausgenommen sind – nahezu alle zugelassenen LKW mit Druckluftbremse in Deutschland mit einer Auspuffklappe ausgerüstet sind.

Ein weiteres bei Herstellern beliebtes Mittel zum Sound-Design sind sogenannte Soundaktuatoren. Hierbei handelt es sich um Systeme, die Motorgeräusche – bei Bedarf – völlig unabhängig von einem Verbrennungsmotor erzeugen können. Sie werden bereits seit etwa 2010 von vielen Fahrzeugherstellern serienmäßig bei einigen Fahrzeugtypen eingesetzt. Soundaktuatoren sind in verschiedene Bauformen und Anwendungsfälle zu unterscheiden. So existieren einerseits Systeme, die ausschließlich auf die Veränderung des Innenraumgeräuschs abzielen. Deutlich größere Herausforderungen für diese Arbeit stellten jedoch Aktuatoren dar, welche zur Veränderung und infolgedessen üblicherweise zur Erhöhung des Außengeräuschs eingesetzt werden. Für diese unterscheidet sich die Anwendung bei Verbrennern und Elektroautos erheblich. So muss beachtet werden, dass sie gemäß UN-Regelung Nr. 138 für alle Fahrzeuge verpflichtend sind, die – wenn auch nur zeitweise – rein elektrisch fahren können. Die Funktionsweise wie auch die verschiedenen Bauformen, in denen Innen- und Außengeräuschaktuatoren auftreten können, werden in dieser Arbeit erläutert. Außerdem werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz bei Verbrennern wie auch Elektrofahrzeugen beschrieben.

Auf Grund des fehlenden Motorgeräuschs und der daraus folgend verminderten Wahrnehmbarkeit bei elektrischer Fahrt, erfüllen Soundaktuatoren – in diesem Kontext „Acoustic Vehicle Alerting System“ (AVAS) genannt – hier einen sehr wichtigen Zweck. Im Geschwindigkeitsbereich bis 20 km/h erzeugen sie ein künstliches Geräusch, durch welches das Fahrzeug von Passanten deutlich besser gehört werden kann. Durch die Beschaffenheit des Geräuschs kann zudem erkannt werden, ob das Fahrzeug beschleunigt oder verzögert.

Für verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge, ohne die Möglichkeit rein elektrisch zu fahren, sind Aktuatoren allerdings nicht vorgeschrieben. Hier erfüllen sie lediglich den Zweck des Sound-Designs. Fahrzeuge, deren Verbrennungsmotor auf Grund umfangreicher Abgasnachbehandlung nicht die gewünschte Klangkulisse erzeugen oder auch Dieselmotoren, können so mit einem beliebigen Motorklang ausgestattet werden. Außerdem können Klangcharakter und Lautstärke in Abhängigkeit von Fahrmodus, Geschwindigkeit, Drehzahl und Last gesteuert werden. Auf diese Weise ist auch das Einhalten von besonders strengen Geräuschgrenzwerten möglich, insofern der Hersteller das Prüfprozedere kennt.

Für diesen Teil des Forschungsvorhabens wurden durch erste messtechnische Voruntersuchungen die Argumente der Fahrzeughersteller auf Stichhaltigkeit überprüft. Dazu stand ein VW Golf R mit 221 kW mit geänderter Luftansauganlage und ein VW Arteon R mit 235 kW mit einer werkseitigen Auspuffklappenanlage zur Verfügung. Der VW Golf R war aufgrund seines Baujahrs noch nach der ehemaligen Geräuschvorschrift UN-Regelung Nr. 51.02 typgeprüft. Die Fahrgeräuschmessung ergab, dass sich der Typprüfwert, also der Geräuschpegel unter Typprüfbedingungen, durch die Umbaumaßnahme um 2 dB(A) erhöhte. Eine Veränderung des Standgeräusches konnte nicht festgestellt werden, da die Geräuschpegelerhöhung nur durch das veränderte Ansauggeräusch bei Volllastbeschleunigung zustande kam.

Der VW Arteon R hingegen wurde schon nach der „neuen“ Geräuschvorschrift UN-Regelung Nr. 51.03 typgeprüft und verfügte über verschiedene Fahrprofile, die der Fahrer über das Dashboard im Innenraum auswählen kann. Da die beiden Akustikklappen an den jeweiligen Endrohren des linken und rechten Nachschalldämpfers lagen, konnten die Klappenstellungen

hier augenscheinlich wahrgenommen werden. Eine Standgeräuschmessung sollte dazu Aufschluss geben, wie sich die Klappen bei den unterschiedlichen Fahrprofilen verhalten. Dabei konnte festgestellt werden, dass in den beiden Fahrprofilen „Comfort“ und „Sport“ während der Messung im Stand die Klappen bis zur vorgeschriebenen Prüfdrehzahl des Motors komplett geschlossen waren. Erst durch die Auswahl des Kennfeldes „Race“ öffneten sich diese und es entstand eine Geräuschpegelerhöhung um 6 dB(A).

Aktuell konnten noch keine belastbaren Daten zu Verfügung gestellt werden, wie sich Auspuffklappen im Fahrbetrieb auf Motorleistung und Abgasverhalten auswirken, da hierzu keine Messdaten vorlagen. Um diese Auswirkungen zu quantifizieren, bedarf es einer detaillierten messtechnischen Untersuchung, die nicht Gegenstand dieses Forschungsauftrages war.

In einem Ausblick wurden mögliche Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen für elektrische Fahrzeuge und solche mit Verbrennungsmotor erörtert. So ist durch den Einzug des autonomen Fahrens in den öffentlichen Straßenverkehr eine Verringerung der Geräuschemissionen zu erwarten. Hierzu könnten auch strenger werdende Abgasregularien einen Teil beitragen, da zusätzliche Komponenten meist eine schalldämpfende Wirkung haben. Nicht zuletzt ist durch die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs eine weitere Minderung des Straßenlärms zu erwarten. Im Rahmen dieser Elektrifizierung ist jedoch gleichzeitig auch eine zunehmende Verbreitung von Soundaktuatoren zu erwarten, um die Bedürfnisse der Kunden nach „emotionalem“ Klang auch bei diesen Fahrzeugen befriedigen zu können. Die Begleitung der AVAS-Regulierung erscheint angeraten, um Art und Umfang der dabei verwendeten Töne nicht zu einer weiteren „Lärmbelästigung“ ausufern zu lassen.

Summary

“The car is the man's soul made visible” the philosopher Manfred Hinrich famously put it. In this regard, vehicles do not only epitomize rational factors, such as mobility and independence, but also emotional aspects, such as status symbol, lifestyle and individuality. However, the automotive industry has recently been undergoing a major transformation.

Environmental consciousness, growing ever stronger in politics and in society, challenges the automotive industry to continuously reduce pollutant and noise emissions. Noise is a major environmental problem of our time, and road traffic is one of the most powerful sources of noise. As early as 2008, the German Federal Ministry of Transport drew up a National Traffic Noise Protection Package II, which envisaged a 30 % reduction in road traffic noise by 2020. The Conference of Transport Ministers has advocated – most recently in 2019 – that the National Traffic Noise Protection Package from 2008 needs to be updated again in order to effectively enhance traffic noise protection in Germany. These political processes have not yet been completed at present. Hence, there is still a need for action.

For the regulation of noise emissions in road traffic, there are legal limits for driving noise that have to be met in the vehicle type approval and in the conformity of production every two years. Since 1938, measurements of the driving noise of vehicles and motorcycles have been carried out for this purpose. The corresponding regulations are internationally harmonized and are reviewed at regular time intervals. On the one hand, the limit values are redefined, and on the other hand, the test procedure is reviewed. In 2016, substantial changes to the international regulations of the UNECE came into force. The changes ensure that the measured noise levels reflect a larger proportion of the levels in real road traffic. At the same time, gray areas that could previously be used by manufacturers to bring particularly loud vehicles onto the market legally were restricted or closed.

In this paper, the developments of the noise limits were illustrated. The most important currently applicable regulations for driving and stationary noise measurements on motor vehicles were discussed in detail. Although tightening of the limit values for the coming years has already been established by the currently applicable UN Regulation No. 51.03, additional significant extensions of the test scenarios will be introduced in the near future. The focus of these tests will be particularly on flap exhaust systems and sound actuators. A flourishing market segment has developed around these components, which takes advantage of regulatory loopholes in the existing noise directives in order to offer sporty vehicle owners a "distinctive sound". In this work, these gray areas and gaps were identified and options to reduce or even close these gaps were described.

For this research project, the following sound design options were considered:

- Air intake (air filter, intake module).
- Engine software
- Flap systems
- Sound actuators

With regard to air intake, for example, noise emissions can be adversely affected by sophisticated design of the air filters or intake ducts.

The new tuning trend of software optimization was also considered. This “trend” involves, for example, deactivating the overrun cutoff in conjunction with the changed fuel supply and

alteration of the ignition timing to trigger a targeted misfire in the exhaust tract, which is known as “overrun popping”.

In view of the partly high complexity of flap systems, the individual components, the basic design of an exhaust system and the different structural designs and technologies of flap systems were described in the first step. The various designs, such as active or passive versions, and the different electrical and pneumatic control options reveal the wide range of possible uses and applications.

Sound design is one of these possible areas of application, which is very close to the hearts of many drivers of sports cars, but is more of an annoyance to many people passing by in traffic. For example, by deliberately diverting the exhaust flow into an undamped channel of the exhaust system's muffler, the noise level could be increased or reduced by up to 10 dB(A) in a test. Similarly, the exhaust flap has a minor effect on engine performance. By opening the flap at high speeds or high engine speeds, the exhaust backpressure was reduced by around 80 mbar after one test and the engine output or engine torque was increased by up to 2 % to 3 %.

Exhaust flaps on motorcycles have a certain special status. Originally, such flaps were used to improve drivability in the lower engine speed range and for torque modulation. However, exhaust flaps have also been used today for sound design in the two-wheeler sector.

A few years ago, in order to meet increasingly stricter emissions standards, exhaust flaps, so-called exhaust gas flaps, were also used to reduce pollutants. By placing the flap directly downstream of the pollutant-reducing components, such as the catalytic converter and particulate filter, low-pressure exhaust gas recirculation can be implemented in addition to the existing high-pressure exhaust gas recirculation. In this case, the exhaust gas flow is dammed with the exhaust flap partially or fully closed and fed back to the intake tract via a bypass valve. Due to these thermal and chemical processes, the emission of nitrogen oxides (NO_x) can consequently also be reduced.

In commercial vehicles such as heavy goods vehicles or buses, the engine braking effect can be increased by an exhaust brake in which the vehicle driver partially or completely closes the flap in the exhaust using an operating element such as an additional pedal. This creates a high exhaust backpressure, and the compression work is converted into braking power. At the same time, the injection pump switches the fuel supply to zero delivery, and thrust cutoff occurs.

After vehicle manufacturers and equipment suppliers increasingly offered additional systems, such as flap systems or sound generators, the Federal Motor Transport Authority (KBA) published an information circular (IST 05-19) in July 2019 with the cooperation of the TÜV Association. Addressed to technical services and vehicle manufacturers, it described the test requirements for damper exhaust systems as part of type testing. According to this, the manufacturer must also describe in detail the behavior of the flap in the event of a fault and in the event of tampering.

In order to obtain a rough overview of the use of exhaust flaps, the flaps were divided into different vehicle categories and illustrated using representative example vehicles. The following vehicle models were selected as representative example vehicles:

- BMW M135i
- Audi RS3
- Mercedes A-Class 220 CDI
- BMW S 1000 XR

The manufacturers advertise the first two mentioned example vehicles as powerful and sporty due to the exhaust system. The Mercedes A-Class 220 CDI was chosen for use in exhaust gas recirculation, which has an exhaust flap downstream of the pollutant-reducing components and serves solely to comply with the Euro 5 emissions standard. As an example for the vehicle class motorcycle the choice fell on the BMW S 1000 XR, with which typically for motorcycles the exhaust flap is arranged before the muffler. In this example, BMW also advertised a racing-like sound experience.

Exhaust flaps as exhaust brakes, on the other hand, are used in almost all heavy-duty vehicles with air brakes and were not particularly advertised by vehicle manufacturers in this segment.

The number of vehicles registered in Germany with installed exhaust flaps could not be derived from any of the known statistics. Bearing this in mind, and based on the experience and estimates of the technical services involved in the project, the first step was to describe the vehicle classes in which the installation of exhaust flaps was known or could be expected. In combination with the official registration statistics of the Federal Motor Transport Authority, the following initial estimates of unit numbers were derived. According to these, around 48.5 million passenger cars were registered on the roads in Germany in 2020. From this number, the vehicle segments sports cars, mid-size cars, compact cars, luxury cars, SUVs and off-road vehicles were considered to be representative of acoustic flaps, as the use of acoustic flaps is rather uncommon in other segments such as subcompact cars or vans. A rough estimate showed a share of acoustic flaps in sports cars of around 15 % and in the other segments of around 2 %.

According to initial estimates, this corresponded to a total number of around 680,600 vehicles equipped with acoustic flaps for the reference year 2020.

According to the registration statistics of the KBA, the share of diesel-powered passenger cars was around 30 % in relation to the total number of registered passenger cars. Approximately 65 % of these vehicles were compliant with the Euro 5 or Euro 6 emissions standard. Since vehicles with an exhaust gas standard of Euro 4 or lower do not yet have an exhaust gas flap for exhaust gas recirculation, this results in a share of approx. 20 % for diesel-powered passenger cars with an exhaust gas standard of Euro 5 or higher in Germany for 2021. Considering that some diesel vehicles - especially those with urea injection (AdBlue) – do not have an exhaust gas flap, the share could be reduced to approx. 10 % to 15 %. Hence, in the reference year 2021, around 4.9 to 7.3 million vehicles with diesel drive and exhaust gas recirculation flap were currently registered in Germany.

Motorcycles accounted for 4.8 million vehicles on Germany's roads in calendar year 2021. After deducting the low-displacement types, the number of motorcycles was 3.6 million. Based on the company's own estimates, around 10% of these vehicles have an exhaust flap, meaning that around 360,000 motorcycles with an exhaust flap could be assumed.

Since trucks must be equipped with a continuous brake (this also includes the exhaust brake with exhaust flap) according to the equipment regulation under § 41 of the German Road Traffic Licensing Regulations (StVZO), this means that – minus a few vehicles that are exempt from parts of the StVZO § 41 – almost all registered trucks with air brakes in Germany are equipped with an exhaust flap.

Sound actuators are another popular sound design tool used by manufacturers. These are systems that can generate engine sounds – if required – completely independently of an internal combustion engine. They have been used by many vehicle manufacturers as standard equipment in some vehicle types since around 2010. Sound actuators can be divided into different designs and applications. On the one hand, there are systems that are aimed exclusively at modifying

interior noise. However, actuators that are used to change and consequently usually increase the exterior noise posed significantly greater challenges for this work. For such actuators, the application differs significantly between internal combustion and electric cars. Indeed, it should be noted that, according to UN Regulation No. 138, they are mandatory for all vehicles that can drive – even if only temporarily – purely electrically. The mode of operation as well as the various designs in which interior and exterior noise actuators can appear are explained in this paper. In addition, the legal framework for their use in both internal combustion and electric vehicles is described.

Due to the lack of engine noise and the resulting reduced perceptibility during electric driving, sound actuators – called "Acoustic Vehicle Alerting System" (AVAS) in this context – fulfill a very important purpose in this regard. In the speed range up to 20 km/h, these systems generate an artificial noise that makes it much easier for people passing by to hear the vehicle. The nature of the sound also makes it possible to detect if the vehicle is accelerating or decelerating.

However, actuators are not mandatory for vehicles powered by internal combustion engines, without the option of driving purely electrically. In these cases, the actuators merely serve the purpose of sound design. Vehicles whose internal combustion engines do not produce the desired soundscape due to extensive exhaust aftertreatment, or even diesel engines, can thus be equipped with any engine sound. In addition, sound character and volume can be controlled as a function of driving mode, speed, engine speed and load. In this way, it is also possible to comply with particularly stringent noise limits, provided the manufacturer is aware of the test procedure.

For this part of the research project, the arguments of the vehicle manufacturers were tested for validity by means of preliminary metrological investigations. A VW Golf R with 221 kW with a modified air intake system and a VW Arteon R with 235 kW with a factory exhaust system were available for this purpose. Based on its year of manufacture, the VW Golf R was still type-approved according to the former noise regulation UN Regulation No. 51.02. The driving noise measurement showed that the type test value, i.e. the noise level under type test conditions, increased by 2 dB(A) as a result of the conversion measure. A change in the stationary noise could not be determined, as the noise level increase was only due to the changed intake noise at full load acceleration.

The VW Arteon R, on the other hand, was already type-tested according to the "new" noise regulation UN Regulation No. 51.03 and had various driving profiles that the driver could select via the dashboard in the interior. Since the two acoustic flaps were located at the respective tailpipes of the left and right rear silencers, the flap positions could be visually perceived in this case. A stationary noise measurement served to provide information on how the flaps behave under different driving profiles. The results showed that in both the "Comfort" and "Sport" driving profiles, the flaps were completely closed up to the prescribed engine test speed during the stationary measurement. Only by selecting the "Race" map opened, resulting in a noise level increase of 6 dB(A).

Currently, it is not possible to provide any reliable data on the effect of exhaust flaps on engine performance and exhaust gas behavior during driving, as no measurement data is available. In order to quantify these effects, a detailed metrological investigation is required, which was not the subject of this research contract.

Looking ahead, the possible effects of future developments for electric vehicles and those with internal combustion engines were discussed. The advent of autonomous driving in public road traffic, for example, is expected to reduce noise emissions. Stricter emissions regulations could also play a part in this, as additional components usually have a sound-absorbing effect. Finally,

a further reduction in road noise can be expected as a result of the increasing electrification of traffic. However, in the context of this electrification, an increasing spread of sound actuators can be expected at the same time, allowing customers' desires for “emotional” sound to be satisfied in these vehicles as well. Accompanying AVAS regulation seems recommended in order to prevent the nature and extent of the sounds used in this process from escalating into a further “noise nuisance”.

1 Aufgabenstellung

Geräuschemissionen entstehen beim Betrieb eines jeden Kraftfahrzeugs und sind in Abhängigkeit von den Betriebszuständen und der vorhandenen Antriebsart unterschiedlich. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungstechnologie ist der Motor eine wesentliche Emissionsquelle. Maßgeblich beeinflusst wird Höhe und Klangbild der Geräusche durch die Abgasanlage und die darin verbauten Schalldämpfer. In der Vergangenheit wurden die Fahrzeuge in Bezug auf die Geräuschemission nahezu ausnahmslos mit passiven Abgassystemen ausgerüstet. Seit den 2000er Jahren finden vermehrt aktive Anlagen Verwendung. Dazu zählen variable Geometrien, wie zum Beispiel Klappenabgasanlagen oder elektronische Soundgeneratoren. Die Systeme sollen dem Nutzer ein „emotionales Sounderlebnis“ bescheren und werden sowohl von den Fahrzeugherstellern ab Werk verbaut als auch für den Aftermarket als Nachrüstlösung angeboten.

Bei einer Typgenehmigung ist der Fahrzeughersteller verpflichtet nachzuweisen, dass sein zu genehmigender Fahrzeugtyp bestimmte gesetzliche Geräuschpegelwerte nicht überschreitet. Die Höhe dieser Geräuschpegel für das fahrende Fahrzeug beschreiben international harmonisierte Regelwerke. Für das stehende, in Betrieb befindliche Fahrzeug sind lediglich Messverfahren definiert – Grenzwerte sind jedoch derzeit nicht gesetzt. Die Ermittlung eines sogenannten Standgeräusches verfolgt nur den Zweck, sowohl den im Rahmen der Verkehrsüberwachung tätigenden Stellen wie z. B. der Polizei als auch den Prüforganisationen für die periodisch technische Überwachung von Kraftfahrzeugen einen Referenzwert zur Verfügung zu stellen.

In diesem Forschungsvorhaben sollen nun umfassende Informationen von Auspuffklappenanlagen und Soundgeneratoren zusammengetragen und untersucht werden, ob die aktuellen Geräuschrichtlinien den Anforderungen genügen, aktive Abgassysteme vollumfänglich zu überprüfen. Oder gibt es doch diverse Grauzonen, welche Fahrzeughersteller gezielt nutzen könnten, um gesetzliche Grenzwerte zu umgehen?

Die zentralen Fragen sind folgende:

- Welche Technologien und Steuerungskonzepte für das Sound-Design kommen zum Einsatz?
- Welche technische Relevanz haben Auspuffklappen (z. B. Abgasgegendruck) in Abhängigkeit vom Antrieb (z. B. Aufladung, Abgasnachbehandlung)?
- Wie werden Auspuffklappen und Soundgeneratoren beworben, also welche Eigenschaften werden ihnen zugesprochen?
- Welche Verbreitung findet welche Klappentechnologie und Soundgeneratoren in den verschiedenen Fahrzeugklassen?
- Welche Trends sind zu beobachten und zu erwarten?

2 Geräuschemissionen im Straßenverkehr

Straßenverkehrslärm entsteht durch die Geräuschemission von Fahrzeugen. Die von Fahrzeugen ausgehenden Geräusche sind hauptsächlich das Antriebsgeräusch (z. B. Ansaugung, Auspuff, Motor) sowie das Reifenabrollgeräusch. Durch die Verschärfung der gesetzlichen Grenzwerte der EU-Richtlinien und der UN-Regelungen für Fahrzeugfahrgeräusche soll die Lärmemission stetig gemindert werden, allerdings haben Messungen ergeben, dass diese Maßnahmen nur eine marginale Verbesserung der Geräuschemissionen im Straßenverkehr bewirken. Ausschlaggebend dafür ist, dass die Prüfvorgaben in der Typprüfung die realen Fahrgeräuschemissionen nicht optimal abbilden.

Durch eine Untersuchung im Rahmen der EU-Umgebungslärmrichtlinie im Jahre 2017 konnte festgestellt werden, dass etwa 2,3 Millionen Menschen in Deutschland tagsüber einem Geräuschpegel von mehr als 65 dB(A) und nachts etwa 2,6 Millionen Menschen einem Geräuschpegel von mehr als 55 dB(A) ausgesetzt sind, allein durch Straßenverkehr verursacht. [1]

Die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind gravierend. Eine akute oder chronische Belastung durch Straßenverkehrslärm kann zu Schlafstörung, Schädigung des Hörorgans oder zu Erkrankung des Herz-Kreislauf-Systems führen. Ebenso kann die Lebensqualität unter Straßenlärm leiden, da dadurch der Mensch an der Ausübung seiner geschätzten Tätigkeiten, wie Spielen, Feiern oder Wandern, gehindert wird. [2]

3 Möglichkeiten des Sounddesigns

Das Design des Fahrzeuggeräuschs spielt neben den gewohnten Eigenschaften wie Qualität, Leistung und Ästhetik eine immer stärker werdende Rolle bei der Fahrzeugneuanschaffung. Konnte früher nur ein sportliches Kraftfahrzeug mit der entsprechenden hohen Motorleistung für einen satten „Sound“ sorgen, gibt es heutzutage eine Vielzahl an Alternativen für leistungsschwache Kraftfahrzeuge, das Sounddesign entsprechend zu optimieren. Als positiver Nebeneffekt ist nicht zu vernachlässigen, dass die folgenden Möglichkeiten der Soundoptimierung zusätzlich zu einer Leistungssteigerung führen können und somit für den Endverbraucher in vielerlei Hinsicht attraktiv wirken. Die häufigsten Möglichkeiten sind nun nachfolgend beschrieben.

3.1 Luftansaugung

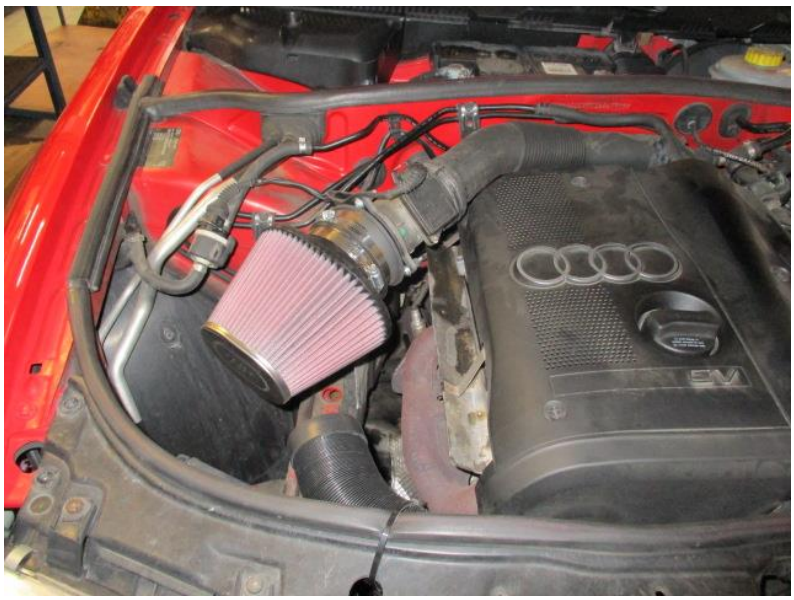
Die Geräuschentwicklung von Kraftfahrzeugen entsteht nicht erst im Motor oder in der Auspuffanlage. Selbst das Ansaugsystem – bestehend aus Ansaugkanal, Luftfilter und Saugmodul – hat einen nicht unerheblichen Anteil daran. Dabei gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten der konstruktiven Auslegung durch den Entwickler. Besonders die Tuningszene hat mittlerweile verstärkt einen Fokus daraufgelegt und bietet eine Vielzahl an Nachrüstmöglichkeiten an, die teilweise sogar mit Teilegutachten in Verkehr gebracht werden.

3.1.1 Luftfilter

Neben der Reinigung der angesaugten Luft wirkt ein Luftfilter geräuschdämpfend. Die Dämpfung erfolgt durch den doppelten Querschnittssprung an der Ein- und Austrittsseite des Luftfilters. Umso größer das Volumen oder der Querschnittssprung des Luftfilters, desto größer die Geräuschdämpfung. Somit ist die Auslegung des Volumens, des Querschnittssprungs, aber auch die Wahl des Werkstoffes (z. B. Metallgeflecht, Schaumstoff) auf die Geräuschentwicklung ausschlaggebend. [3]

In Abbildung 1 ist dazu exemplarisch ein Motor eines Audi A4 mit einem offenen Sportluftfilter dargestellt, welcher vom Fahrzeughalter nachgerüstet wurde.

Abbildung 1: Offener Sportluftfilter



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.1.2 Saugmodul

Das Saugmodul besteht aus einem Luftsammler und den Saugrohren. Während der Luftsammler als Reservoir verwendet wird, verteilen die Saugrohre die Ansaugluft auf die einzelnen Zylinder. Das Zusammenspiel von Sammlern und Saugrohren hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Ladungswechsel des Verbrennungsmotors, weshalb hier in der Konstruktion ein erhöhtes Augenmerk gelegt wird. Durch eine Veränderung der Geometrie der Ansaugkanäle, wie größere bzw. längere Rohrdurchmesser, um z. B. den Luftdurchsatz zu erhöhen, wird nicht nur die Motoraufladung, sondern ebenfalls auch das Ansauggeräusch erhöht. [3]

In Abbildung 2 ist dazu eine Ansauganlage aus dem Aftermarket mit leistungsoptimierten Rohrverlauf für einen Audi TT RS dargestellt.

Abbildung 2: Saugmodul

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.2 Motorsoftware

Eine gänzlich neue Möglichkeit des Sounddesigns hat sich durch die bewusste Einflussnahme auf die Motorsoftware aufgetan. Durch die Änderung des Kennfelds der Motorsoftware, wie Zündung, Schaltpunkt des Automatikgetriebes und Einspritzung, kann neben der Motorleistung auch die Geräuschemission generell beeinflusst werden. Dabei wird z. B. die Schubabschaltung ganz oder teilweise deaktiviert und durch zeitgleichen Eingriff auf die Kraftstoffzufuhr und Änderung des Zündzeitpunktes eine bewusste Fehlzündung im Abgastrakt ausgelöst, welches vermehrt im Straßenverkehr durch starkes Knallen aus dem Auspuff des vorbeifahrenden Fahrzeugs wahrgenommen werden kann. Das auch unter „Schubknallen“ oder „Schubblubbern“ bekannte Sounddesign ist manchmal bei Sportwagen schon ab Werk in der Motorsoftware hinterlegt. Des Weiteren bieten Tuninganbieter ebenfalls eine Veränderung der Motorsoftware als Nachrüstlösung an, die allerdings in der StVZO ohne vollumfängliche Geräusch- und Emissionsprüfungen nicht zulässig ist.

3.3 Klappenanlagen

Das Auspuffmündungsgeräusch ist neben dem Ansaug- und Motorgeräusch eine wichtige Quelle von Fahrzeuggeräuschemissionen. Zur besseren Verständlichkeit werden zuerst die generellen Aufgaben und Komponenten einer Abgasanlage erörtert.

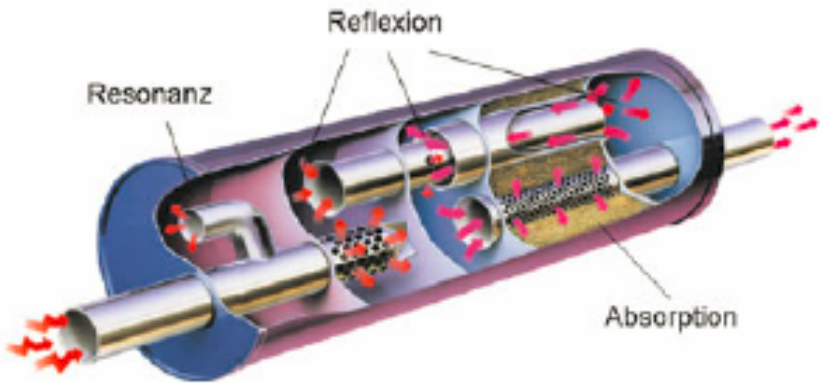
Allgemein werden folgende Anforderungen an eine Abgasanlage gestellt:

- Ableitung des Abgases des Verbrennungsmotors in die Fahrzeugumgebung
- Reinigung der schädlichen Anteile des Abgases
- Dämpfung des Abgasgeräusches

Dabei lässt sich eine Abgasanlage in folgende Bauteile untergliedern:

- Abgaskrümmer, zur Zusammenführung der austretenden Abgase der einzelnen Zylinder
- Abgasturbolader, zur Leistungssteigerung des Motors
- Abgasrückführung, zur Abgasreinigung
- Katalysator und Partikelfilter, zur Abgasreinigung und geringfügige Geräuschdämpfung
- Schalldämpfer, zur Dämpfung des Abgasgeräusches, welche in den Wirkprinzipien Absorption, Reflexion und Resonanz untergliedert werden kann (Abbildung 3)
- Verrohrung, zur Verbindung der einzelnen Komponenten
- Endrohr, zum Ausstoß des Abgases in die Umgebung [4]

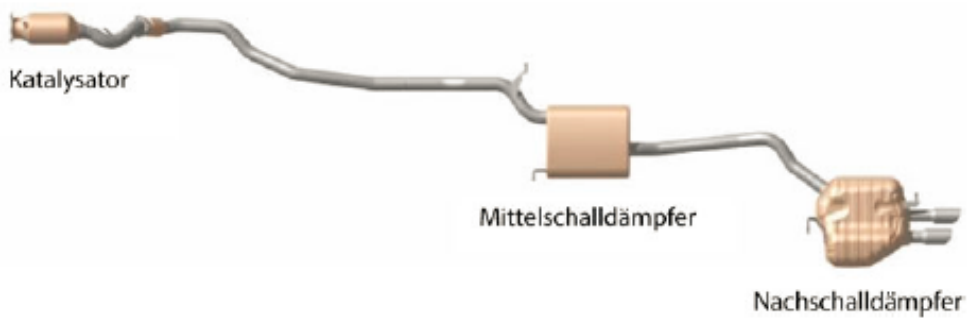
Abbildung 3: Schalldämpfer mit den gängigen Wirkprinzipien



Quelle: Handbuch Fahrzeugakustik, Zeller P., S. 358

In Abbildung 4 ist dazu eine schematische Darstellung einer Abgasanlage eines Reihenmotors, welcher in der Fahrzeugfront verbaut ist, dargestellt. Dabei sind die einzelnen Komponenten in einer Art Reihenschaltung angeordnet.

Abbildung 4: Einflutige Abgasanlage



Quelle: Handbuch Fahrzeugakustik, Zeller P., S. 353

3.3.1 Bauarten und Funktionsweisen

Allgemein lässt sich die Funktion einer Auspuffklappe wie folgt erklären:

Die Auspuffklappe ermöglicht dem Abgasstrom innerhalb eines gegebenen Bauraums in verschiedene Kanäle umgeleitet oder sogar kurzzeitig gestaut zu werden, weshalb Klappenabgasanlagen zu der Kategorie der aktiven Abgasanlagen gezählt werden können.

Eine Auspuffklappe wird dabei an einer Stelle der Verrohrung verbaut, welche von dem jeweiligen Verwendungsgrund abhängig ist. Die gängigsten Einbauorte sind dabei:

- Zwischen den emissionsmindernden Komponenten (Katalysator, Partikelfilter) und den Schalldämpfern, zur Abgasrückführung bei Dieselmotoren
- Vor dem Schalldämpfer, bei Motorrädern zur Drehmoment-Modulation
- Nach dem Schalldämpfer, zum Sound-Design (Abbildung 5)

Abbildung 5: Auspuffklappe an einem Endrohr eines Nachschalldämpfers

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

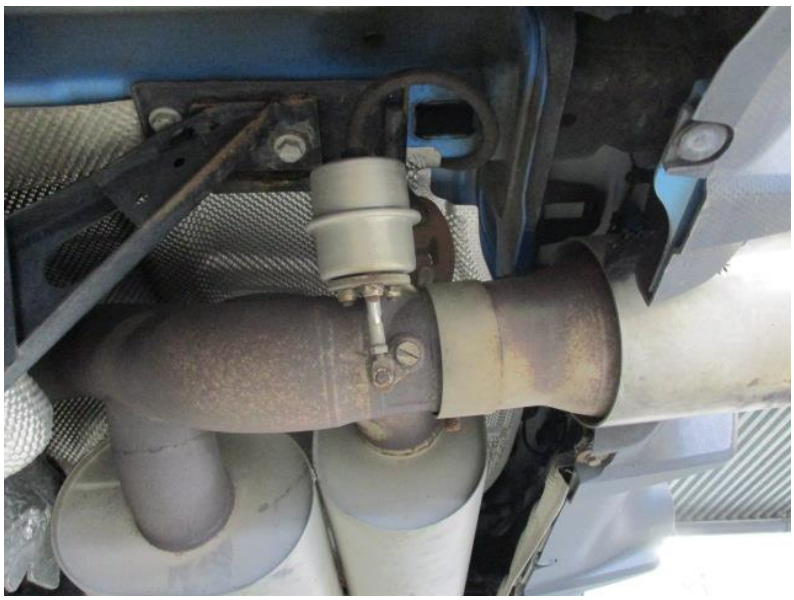
Die Verstellung der Auspuffklappe kann entweder durch eine externe Ansteuerung (aktive Klappe) oder durch eine Selbststeuerung (passive Klappe) erfolgen. Eine selbstgesteuerte Auspuffklappe verfolgt das Wirkprinzip, dass sich die Klappe bei einem zu hohem Strömungsdruck des Abgases entgegen einer Federkraft öffnet und sich somit der Abgasdruck verringert (Abbildung 6). Diese Bauweise erfordert keinen hohen technischen Aufwand und ist deshalb eher bei Fahrzeugen im niedrigeren Preissegment einzuordnen.

Abbildung 6: Passive Auspuffklappe

Quelle: Eberspächer GmbH & Co. KG

Deutlich aufwändiger ist eine externe Ansteuerung der aktiven Auspuffklappe. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten der Ansteuerung. Bei einer pneumatischen Ansteuerung wird durch Unter- oder Überdruck die Auspuffklappe verstellt (Abbildung 7).

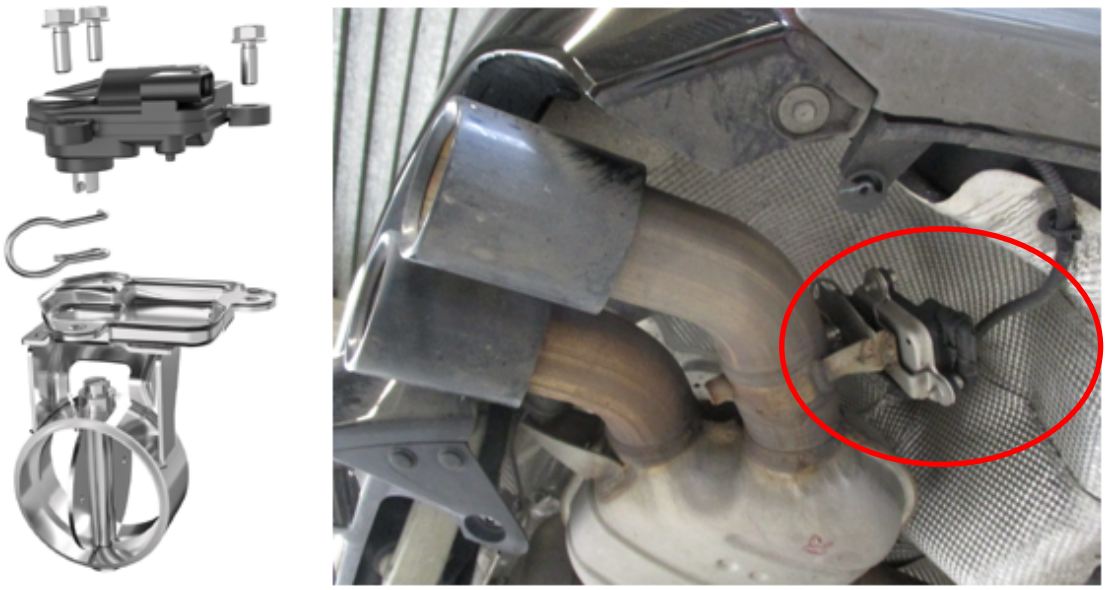
Abbildung 7: Aktive Auspuffklappe mit Unterdruckverstellung



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Da es bei dieser Variante auf Grund von Verschleiß zu einer Leckage und einem damit verbundenen Ausfall der Auspuffklappe kommen kann, geht der Trend aktuell vermehrt zur elektrischen Ansteuerung, welche mittels Stellmotoren (Abbildung 8) erfolgt. Obwohl mit dieser Technik außer der vollständig geöffneten und geschlossenen Stellung auch problemlos Zwischenstellungen möglich sind, wird durch die Hersteller hiervon in der Praxis bei Akustikklappen bisher kaum Gebrauch gemacht. Bei Fahrzeugen mit mehreren Auspuffklappen werden teilweise leicht unterschiedliche Öffnungsparameter festgelegt, um so eine stufenweise Erhöhung der Lautstärke zu erreichen. Außerdem wird zwischen den Zuständen Fahrt und Stillstand unterschieden. Zudem kann bei einer elektrischen Ansteuerung leichter eine Fehlerdiagnose über die On-Board-Diagnose (OBD) erfolgen.

Abbildung 8: Aktive Auspuffklappe mit elektrischem Stellmotor



Quelle: Boysen GmbH & Co. KG (Bild links) – Eigene Darstellung, TÜV Süd (Bild rechts)

Die beiden genannten Möglichkeiten der externen Ansteuerung erfolgen kennfeldbasiert über die Motorelektronik in Abhängigkeit von Gangwahl, Motordrehzahl, Geschwindigkeit und Last (Fahrpedalstellung). Zusätzlich bieten vielfältige Fahrprogramme, wie z. B. „Comfort“ oder „Sport“ dem Fahrer die Auswahl verschiedener Kennfelder (Abbildung 9). Die externe Ansteuerung ist dadurch deutlich vielseitiger in der Wahl des Umschaltpunktes der Auspuffklappe. [5]

Abbildung 9: Auswahlmöglichkeiten verschiedener Fahrprofile

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.3.2 Verwendungsgründe

Durch das breite Anwendungsspektrum von Klappenabgasanlagen existiert folglich eine Fülle von Verwendungsgründen.

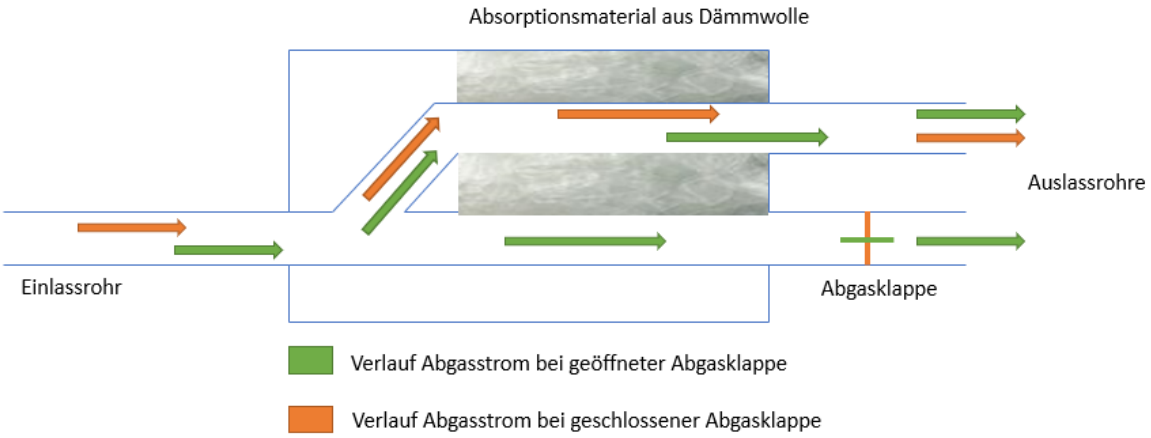
3.3.2.1 Sound-Design

Durch das Verwenden einer Akustikklappe kann das Mündungsgeräusch der Abgasanlage stark beeinflusst werden. Dabei kann je nach Konstruktion des Schalldämpfers bzw. der Lage der Auspuffklappe das Mündungsgeräusch erhöht oder abgesenkt werden.

In Abbildung 10 ist dazu eine vereinfachte Konstruktion eines Nachschalldämpfers mit Akustikklappe dargestellt. Ist die Auspuffklappe geschlossen, muss das ausströmende Abgas über ein Perforationsrohr, das mit Absorptionsmaterial (z. B. Glasfaserwolle) umwickelt ist, geführt werden. Folglich kommt es zu einer Geräuschdezimierung. Tieffrequente Mündungsgeräusche, welche überwiegend bei niedrigen Drehzahlen bzw. Lasten (z. B. Stadtfahrt) oder Schubbetrieb auftreten, können dadurch um bis zu 10 dB(A) reduziert werden. [5]

Möchte der Hersteller in einem bestimmten Fahrzustand oder Modus hingegen den Mündungsschall erhöhen, wird die Auspuffklappe geöffnet. Dadurch nimmt ein Teil des Abgases den direkten Weg im Schalldämpfer, welcher ohne Abzweigung oder schalldämpfende Materialien ausgelegt ist. Dementsprechend kommt es zu einer Erhöhung des Schallpegels.

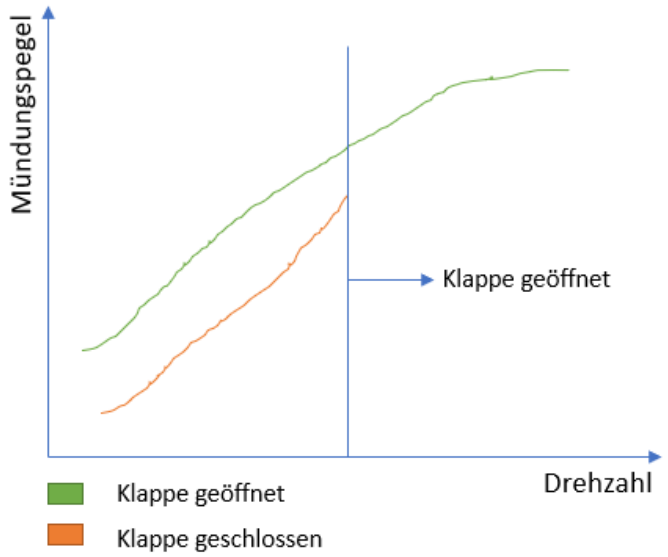
Abbildung 10: Variable Akustikklappe an einem Nachschalldämpfer



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

In Abbildung 11 ist dazu beispielhaft der Mündungspegel einer Abgasanlage mit variabler Auspuffklappe dargestellt. Ab einer mittleren Drehzahl von ca. 3500 min^{-1} ist die Auspuffklappe dauerhaft geöffnet, um einen zu hohen Abgasgegendruck und Leistungseinbußen laut Fahrzeughersteller zu vermeiden.

Abbildung 11: Mündungspegel einer Abgasanlage mit Akustikklappe



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.3.2.2 Leistung

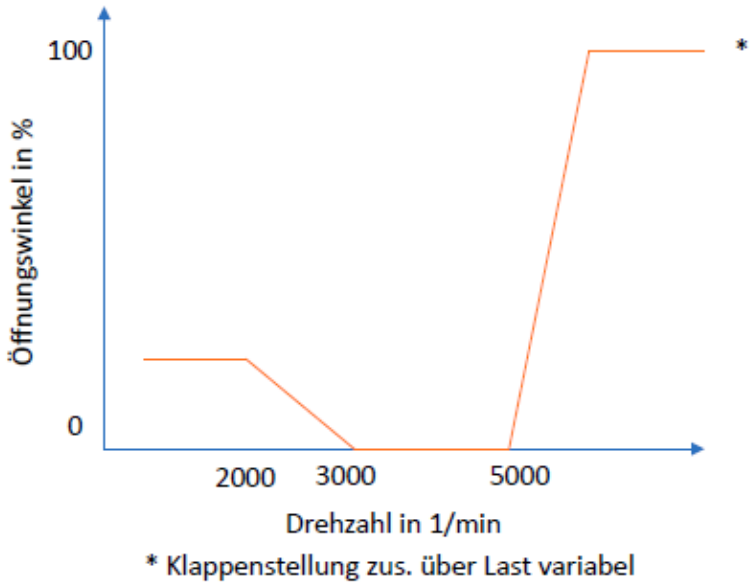
Bei hohen Geschwindigkeiten (z. B. Überland- oder Autobahnfahrten) überwiegen die Motor-, Wind- und Reifenabrollgeräusche und der Verbrennungsmotor ist auf hohe Leistung angewiesen. Dazu wird die in Abbildung 8 abgebildete Auspuffklappe geöffnet. Der Abgasgegendruck sinkt und die Abgase können leichter in die Fahrzeugumgebung abgeführt

werden. Somit erhöht sich die Motorleistung und der Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß verringern sich im geringen Maße. [5]

Ein exemplarischer Versuch hat ergeben, dass durch das Öffnen der Auspuffklappe der Abgasgegendruck bei einer Motordrehzahl von 6000 min^{-1} um ca. 80 mbar (Messstelle vor dem Mittelschalldämpfer) verringert werden kann und sich die Motorleistung bzw. Drehmoment um bis zu 2-3 % erhöht. [6]

Eine gewisse Sonderstellung nehmen Auspuffklappen bei Motorrädern ein, welche einen über die Motorlast und Drehzahl variablen Öffnungswinkel verfügen, während Akustikklappen bei Personenkraftwagen entweder komplett geöffnet oder geschlossen sind. Des Weiteren sind die Auspuffklappen bei Motorrädern schon vor dem Schalldämpfer in der Verrohrung angeordnet. Dies begründet sich in der Tatsache, dass im unteren Drehzahlbereich des Motors die Abstände des Abgasaustritts der einzelnen Zylinder zu groß sind und es zu einem Drehmomentverlust und unrunden Motorlauf kommt. Durch das teilweise Schließen der Auspuffklappe entsteht ein höherer Staudruck und der Motor des Motorrades verfügt über ein besseres Ansprechverhalten. In Abbildung 12 ist dazu schemenhaft ein Graph des Öffnungswinkels der Auspuffklappe in Abhängigkeit von der Motordrehzahl dargestellt.

Abbildung 12: Klappenstellung in Abhängigkeit von der Motordrehzahl



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

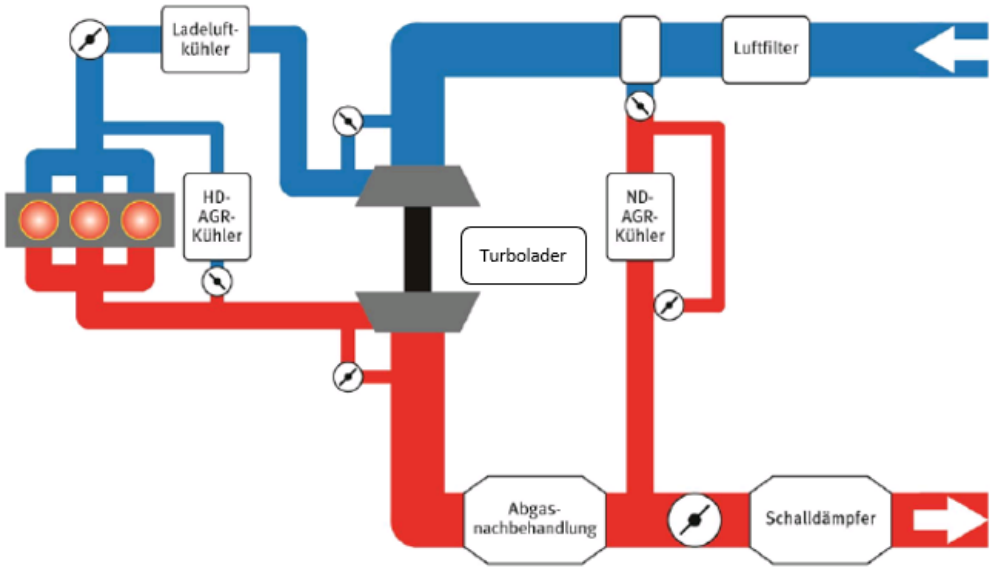
Diese Art von Klappensteuerung diente ursprünglich einzig der Drehmoment-Modulation und hat keinen bzw. einen geringen Einfluss auf das Geräuschverhalten, wenn der nachgeordnete Schalldämpfer nur über eine einfache Absorptionskammer verfügt. Seit geraumer Zeit wird dieses Funktionsprinzip der vorgeschalteten Klappe allerdings auch von Motorradherstellern verwendet, um die Geräuschemission gezielt zu beeinflussen. Dazu werden Schalldämpfer wie in Abbildung 10 dargestellt verbaut, die über eine zusätzliche Kammer verfügen und somit das Sound-Design zusätzlich zum Motordrehmoment beeinflussen.

3.3.2.3 Schadstoffemission

Neben dem Sound-Design kann eine Abgasklappe einen Beitrag zur Minimierung des Schadstoffausstoßes leisten. Durch eine geschickte Regelung der Klappenstellung besteht die Möglichkeit, das thermische Verhalten der Abgase zu beeinflussen. Durch das Schließen der Abgasklappe bei Motorstart erhöht sich durch einen Rückstau der Abgase die Abgastemperatur und folglich werden der Motor und die emissionsmindernden Komponenten, wie Katalysator und Partikelfilter, auf eine höhere Betriebstemperatur gebracht. Der Schadstoffausstoß – besonders bei Kaltstart – kann sich dadurch verringern.

Abgasklappen können zusätzlich bei Dieselmotoren zur Abgasrückführung (AGR) verwendet werden. Diese Abgasrückführung dient zur Minderung von Stickoxiden (NO_X) im Abgas. Dazu wird ein Teil der Abgase wieder der Ansaugluft zugeführt, wodurch im Brennraum die Abgasmoleküle die Oxidation der Kraftstoffmoleküle behindern. Gegenüber der Hochdruck-Abgasrückführung, bei der das Abgas bereits nach dem Auslasskrümmer abgeführt wird, wird bei der Niederdruck-Abgasrückführung das Abgas erst nach dem Partikelfilter entnommen und dem Ansaugsystem zugeführt. In Abbildung 13 ist dazu der Abgaskreislauf der beiden Abgasrückführungen schematisch dargestellt.

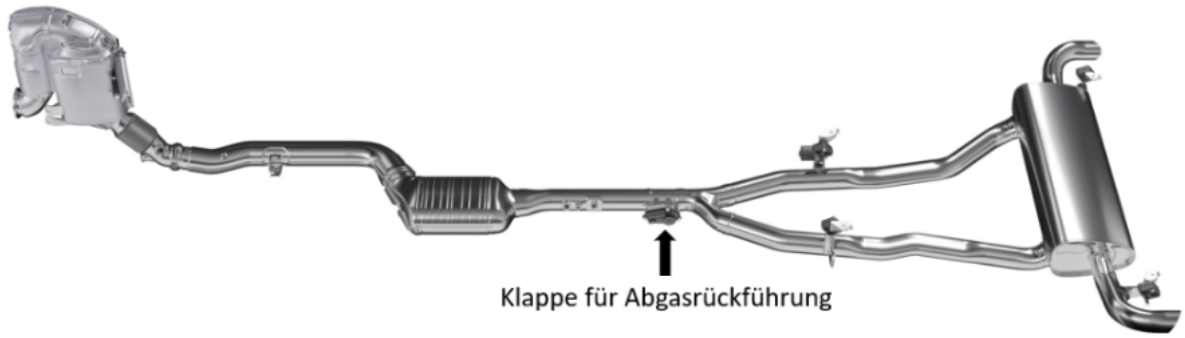
Abbildung 13: Abgaskreislauf der Abgasrückführung



Quelle: Boysen GmbH & Co. KG

Eine Abgasklappe in der Verrohrung der Abgasanlage hinter dem Partikelfilter (Abbildung 14) wird teilweise geschlossen und folglich verengt sich der Querschnitt des Abgasrohrs. Dadurch entsteht ein hoher Abgasdruck. Über ein Abgasrückführventil, welches durch die Motorelektronik angesteuert wird, kann ein Teil des Abgasstroms wieder der Luftansaugung zugeführt werden.

Abbildung 14: Abgasklappe der Abgasrückführung eines Dieselmotors



Quelle: Boysen GmbH & Co. KG

Um die Effizienz der Niederdruck-Abgasrückführung und der damit verbundenen Abgasklappe qualitativ und quantitativ beurteilen zu können, müssten umfängliche Abgasmessungen mit aktivierter bzw. deaktivierter Abgasrückführung durchgeführt werden.

3.3.2.4 Motorstaubremse

Im Nutzfahrzeugbereich, wie bei Lastkraftwagen oder Bussen, kann durch eine Motorstaubremse – oder auch Auspuffklappenbremse genannt – die Motorbremswirkung erhöht werden, indem der Fahrzeugführer über ein Bedienelement, wie z. B. ein zusätzliches Pedal, die Klappe im Auspuff teils oder komplett verschließt. Somit entsteht ein hoher Abgasgegendruck und die Verdichtungsarbeit wird in Bremsleistung umgewandelt. Zugleich stellt die Einspritzpumpe die Kraftstoffversorgung auf Nullförderung um und es kommt zu einer Schubabschaltung. [7]

3.3.3 Typgenehmigungsverfahren

Nachdem Fahrzeughersteller verstärkt auf Zusatzsysteme wie Klappenanlagen oder Soundgeneratoren setzen, gab das Kraftfahrbundesamt (KBA) im Juli 2019 unter Mitarbeit des TÜV-Verbands ein Informationsrundschreiben (IST 05-19) an die Technischen Dienste und Fahrzeughersteller heraus, welches einer nationalen Regelung entspricht und nur in Deutschland anzuwenden ist.

In dem genannten Informationsrundschreiben wurden folgenden Beschlüsse zur Typgenehmigung festgehalten:

- Das Fahrzeug muss unter normalen Betriebsbedingungen der Vorschrift entsprechen (z. B. Korrosionsfestigkeit, Verhalten bei Fahrzeugvibrationen etc.)
- Wirken sich die Zusatzsysteme in den unterschiedlichen Fahrmodi auf das Geräuschverhalten aus, muss eine Worst-Case-Bewertung durchgeführt werden. Anschließend ist der Modus mit dem höchsten Geräuschpegel auszuwählen.
- Es muss eine Vergleichsmessung mit ein- und ausgeschaltetem Zusatzsystem durchgeführt werden, falls eine separate Schaltung durch den Fahrzeugführer möglich ist.
- Ist das Zusatzsystem nicht abschaltbar, ist im Konzept zur Antimanipulation und im Fehlerfall zu beschreiben, ob und wie das Zusatzsystem abschaltet und welche Auswirkungen sich auf das Geräuschverhalten des Fahrzeugs ergeben.

- Das Standgeräusch muss in allen Modi geprüft und dokumentiert werden.
- Es ist nur genehmigt, was in der Genehmigung dokumentiert ist. Abweichungen, die einen Einfluss auf das Geräuschverhalten haben, stellen eine Konformitätsabweichung dar.
- Neben dem Schalldämpfersystem muss der Hersteller die Zusatzsysteme beschreiben. Dazu zählen z. B. Zeichnung, Teilenummer, grundlegende Funktion, Softwarekennzeichnung.
- Sämtliche Änderungen an Hard- und Software müssen dem KBA in Form einer Genehmigungserweiterung mitgeteilt werden.
- Der Hersteller muss eine zusätzliche Erklärung abgeben, dass ein außergewöhnliches Geräuschverhalten des Zusatzsystems (z. B. Sprungverhalten) – auch außerhalb von ASEP – nicht zu erwarten ist.
- Der Hersteller muss ein Konzept zur Antimanipulation und Fehlerfall vorweisen. Darin muss beschrieben werden, wie Manipulation der Hard- und Software durch Dritte erschwert wird und wie die Fehlerdiagnose durch das Motormanagementsystem erfolgt. [8]

Nachfolgend werden Beispiele genannt, wie die Herstellererklärung bezüglich Fehlerfall und Antimanipulation aussehen könnte.

3.3.3.1 Fehlerfall Geräuschverhalten

Der Hersteller erklärt, dass sich das Geräusch bei auftretenden Fehlerfällen wie folgt verhält:

- Fall A – Klappe geschlossen: Im niedrigen Drehzahlbereich kann es zu geringen Pegelverringerungen und -erhöhungen kommen. Im oberen Drehzahlbereich kann es, je nach Fahrzustand, zu stärkeren Pegelverringerungen oder -erhöhungen kommen.
- Fall B – Klappe geöffnet: Im niedrigen Drehzahlbereich kann es zu deutlichen Pegelerhöhungen kommen. Im oberen Drehzahlbereich kann es zu geringen Pegelverringerungen und -erhöhungen kommen.
- Fall C – Klappe in undefinierter Position: Eine Aussage ist wegen der Vielzahl an Möglichkeiten nicht zu treffen.

3.3.3.2 Fehlerdiagnose

Der Hersteller versichert, dass es zu einem Fehlerspeichereintrag im Motorsteuergerät kommt, wenn folgende Defekte vorliegen:

- Unterbrechung der elektr. Leitung
- Kurzschluss nach Masse oder Plus
- Klappe klemmt
- Klappe dauerhaft geöffnet / geschlossen

Eine Manipulation der Klappenmechanik kann einem Defekt gleichgesetzt werden und führt folglich zu einem Fehlerspeichereintrag mit zusätzlicher Aktivierung der Motorkontrolllampe.

3.3.3.3 Antimanipulation

Der Hersteller verhindert durch folgende Maßnahmen eine Antimanipulation:

- Erschwerter Zugang zur Hardware (z. B. Steuergeräte, Stellmotoren)

- Fehlerspeichereintrag im Motorsteuergerät bei hardwareseitiger Manipulation
- „Flashen“ (z. B. Stellgliedjustage) der Klappen ist nicht mit handelsüblichen On-Board-Diagnosegeräten möglich

Trotz aller Maßnahmen zur Verhinderung von Manipulation der Auspuffklappen seitens der Hersteller sind im Tuningsektor Lösungen vorhanden, mit denen die Akustikklappen manuell gesteuert werden können. Dabei handelt es sich meist um kleine elektrische Module, die an einer CAN-Bus Schnittstelle des Fahrzeugs angeschlossen werden. Nach erfolgreicher Montage kann der Fahrer des Fahrzeugs durch Betätigung von bereits vorhandenen Schaltern im Fahrzeuginnenraum, wie z. B. zweimaliges Tippen eines Schalters, der normalerweise eine andere Funktion steuert, wie z. B. das Stabilitätsprogramm, oder durch eine eigens entwickelte Handy-App die Auspuffklappe öffnen oder schließen. Dabei wird die On-Board-Diagnose der Motorsteuerung umgangen und es kommt zu keinem Fehlerspeichereintrag. Nachdem die Hardware des Fahrzeugs unberührt bleibt, ist es nahezu unmöglich, im Rahmen einer periodischen technischen Überwachung oder Verkehrskontrolle diese Nachrüstung zu erkennen.

3.3.4 Beispielfahrzeuge

Klappenanlagen finden heutzutage in nahezu allen Fahrzeugklassen und Preissegmenten Verwendung. Um einen besseren Überblick zu erreichen, werden für dieses Forschungsvorhaben verschiedene Fahrzeugkategorien betrachtet, die sich in der Klappentechnologie und in der Werbung unterscheiden. Zu jeder Fahrzeugkategorie werden ein bis zwei repräsentative Beispielfahrzeuge dargestellt.

3.3.4.1 Personenkraftwagen mit Akustikklappe

Auspuffklappen finden in Personenkraftwagen mit Ottomotor Verwendung, um eine Lösung des Konflikts zwischen Mündungsschall (Geräusch) und Abgasgegendruck (Leistung) zu ermöglichen und außerdem in geringfügigem Maß die Schadstoffemission durch schnelleres Aufheizen des Katalysators zu mindern.

Als Beispielfahrzeuge dienen dazu sportliche Mittelklassemodelle, die das tägliche Straßenbild bestimmen.

- BMW M135i

  Die 1er Reihe ist nach der 3er Reihe das meistverkaufte Modell des Herstellers BMW im Kalenderjahr 2020.

  Dabei verfügt das Spitzenmodell M135i über eine Akustikklappenauspuffanlage. Der M135i besitzt einen direkteinspritzenden 4-Zylinder Ottomotor mit einer Leistung von 225 kW und einem Hubraum von 2 Liter. Der Hersteller bewirbt das Fahrzeug u. a. folgendermaßen: „Auf der Straße gibt der BMW M135i xDrive den Ton an“ und „Der M TwinPower Turbo 4-Zylinder Benzinmotor wurde mit ...einer M Abgasanlage mit Klappensteuerung ausgestattet und ist besonders leistungsstark“. [9]

  Auffallend ist in diesem Beispiel, dass der Hersteller die Auspuffklappenanlage nur als Leistungsoptimierung bewirbt.

- Audi RS3

  Die A3 Familie gehört zu den großen Verkaufsschlagern der Audi AG. Das Spitzenmodell RS 3 verfügt über einen quer eingebauten 5-Zylinder Ottomotor mit einer Motorleistung von

294 kW und einem Hubraum von 2,5 Liter mit einer TFSI-Direkteinspritzung und Auspuffklappen an den Endrohren des Nachschalldämpfers. Audi bewirbt den RS 3 u. a. folgendermaßen: „Mit … der RS-Sportabgasanlage wird Performance zum Erlebnis“. [10]

Zusätzlich kann sich der Fahrzeuginteressent auf der zugehörigen Webseite Klangbeispiele der knallenden Abgasanlage anhören. Hier ist deutlich erkennbar, dass Audi einen hohen Stellenwert auf ein rassiges, kerniges Abgasgeräusch legt.

3.3.4.2 Personenkraftwagen mit Auspuffklappe für Abgasrückführung

Zur Umstellung der Grenzwerte von Euro 4 auf Euro 5 im Jahre 2009 konnten die NO_x-Grenzwerte mit Hilfe der üblichen Abgasnachbehandlung, wie Speicherkatalysator und Hochdruck-Abgasrückführung nicht mehr eingehalten werden. Somit wurde zusätzlich die Niederdruck-Abgasrückführung mit zugehöriger Abgasklappe bei Fahrzeugen mit Dieselmotor eingeführt. Durch das Zusammenspiel von Hochdruck- und Niederdruck-AGR kann in allen Betriebszuständen die richtige Rate an Abgasrückführung umgesetzt werden.

- Mercedes-Benz A220 CDI

  Als Beispielfahrzeug dient die Mercedes-Benz A-Klasse, die ab ihrer 3. Generation die Grenzwerte der Norm Euro 5 erfüllt. Die Variante A220 CDI verfügt über einen quer eingebauten 4-Zylinder Dieselmotor mit einer Leistung von 125 kW bei einem Hubraum von 2,1 Liter. Um die Abgasgrenzwerte einzuhalten, führte der Hersteller die doppelte Abgasrückführung ein. In einer Pressemitteilung benannte der Konzern im Jahre 2012 dafür folgenden Grund: „Um die Emission von Stickoxiden (NO_x) weiter zu reduzieren, ist…A 220 CDI mit einer so genannten Mehrwege-Abgasrückführung (AGR) ausgerüstet.“ [11]

3.3.4.3 Motorräder

Da Motorräder überwiegend sehr leistungsstark ausgelegt sind und beengte Bauraumkapazitäten aufweisen, sind Auspuffklappen bei Motorrädern überwiegend zur Motordrehmoment-Modulation (bessere Fahrbarkeit), Ladungswechselverhalten und zur Minimierung von Größe und Gewicht des Schalldämpfers, neben dem Sound-Design, in Verwendung.

- BMW S 1000 XR

  Die BMW S 1000 XR wird dazu als Beispielfahrzeug ausgewählt, welches über eine Motorleistung von 121 kW bei 1 Liter Hubraum verfügt. Die Auspuffklappe sitzt – typisch für Motorräder – in dem Einlassrohr vor dem Schalldämpfer.

  BMW bewirbt auf seiner Internetseite die Abgasanlage folgend: „… liefert einen beeindruckend satten Sound und ist optisch wie akustisch ein klares Bekenntnis zum Rennsport“. [12]

  Ebenfalls kommt der Interessent via Soundfile in den „Genuss“ der Auspuffgeräusche und kann sich somit ein Bild über den „satten Sound“ machen.

3.3.4.4 Lastkraftwagen

Neben der im vorherigen Unterpunkt genannten Abgasrückführung kommen Auspuffklappen in Lastkraftwagen zusätzlich als Motorstaubremse zum Einsatz. Somit kann die Betriebsbremse entlastet werden und es kommt bei starken Gefällen zu keinem Bremsfading (Nachlassen der Bremswirkung bei Überhitzung).

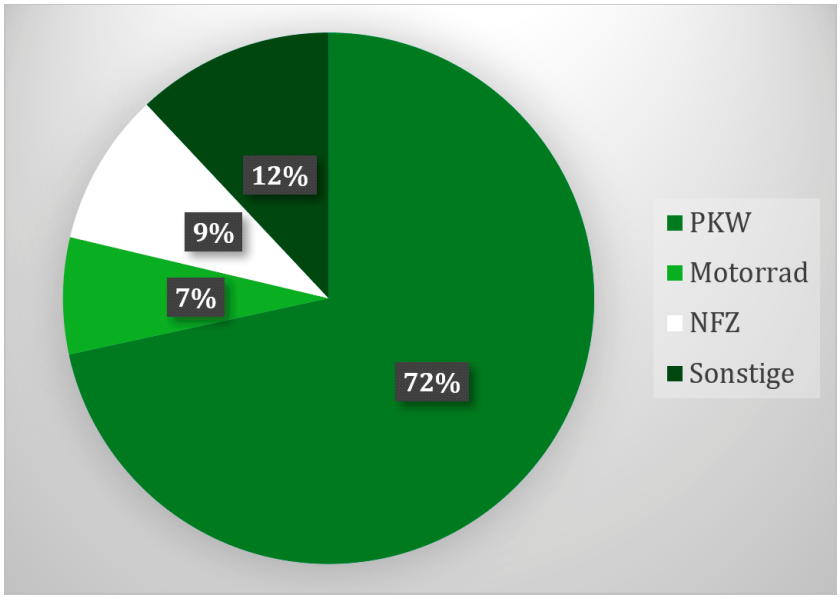
Die Motorstaubremse ist im Lastkraftwagenbereich unerlässlich und findet in nahezu allen Fahrzeugtypen Verwendung, gehört neben anderen Sicherheitssystemen zur Serienausstattung hinzu und wird deshalb von Herstellern heutzutage nicht mehr groß beworben. Als Beispiel kann hier der Mercedes-Benz Actros erwähnt werden.

3.3.5 Marktanteile

Zur Feststellung der Marktanteile werden die Zulassungsstatistiken des Kraftfahrbundesamtes herangezogen. Die Anteile der Fahrzeuge mit Auspuffklappen in den einzelnen Fahrzeugsegmenten muss mit Hilfe des Erfahrungsschatzes der technischen Dienste geschätzt werden.

In Deutschland waren zum 01. Januar 2022 rund 67,7 Millionen Fahrzeuge zugelassen. Davon entfällt der größte Anteil mit rund 48,5 Millionen Fahrzeuge (72 %) auf die Fahrzeugklasse der PKW, ca. 4,8 Millionen (7 %) entfallen auf die Motorräder und etwa 6,3 Millionen (9 %) auf die Nutzfahrzeugklasse (Abbildung 15). [13]

Abbildung 15: Fahrzeugklassen in Deutschland 2021



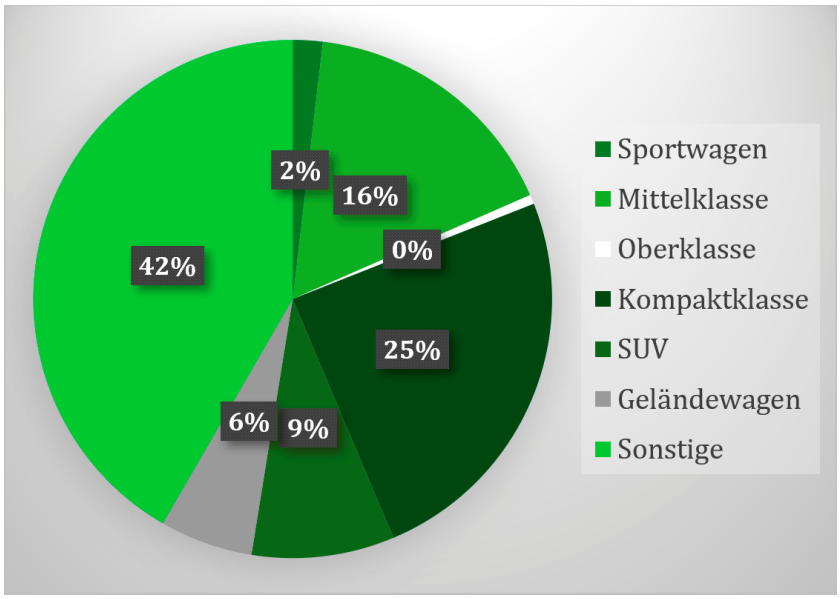
Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.3.5.1 Personenkraftwagen mit Akustikklappe

Die Verwendung einer Akustikklappe im PKW-Bereich ist aktuell nur eher sportlichen Fahrzeugen vorbehalten, weshalb der Marktanteil eher gering anzusehen ist. Um einen groben Überblick dieses Marktanteiles zu bekommen, wird auf die Zulassungsstatistik des Jahres 2020 des Kraftfahrt-Bundesamtes zurückgegriffen. Danach waren ca. 900.000 Sportwagen, 8 Millionen Mittelklassewagen, 11,9 Millionen Kompaktklassewagen, 280.000 Oberklassewagen, 4,3 Millionen SUV und 2,8 Millionen Geländewagen in Deutschland zugelassen (Abbildung 16). [14]

Diese genannten Segmente werden als repräsentativ für Akustikklappen angesehen, da in anderen Segmenten, wie Kleinst- bzw. Kleinwagen oder Van eine Verwendung von Akustikklappen den Verfassern nicht bekannt ist.

Abbildung 16: Fahrzeugsegmente in Deutschland 2020



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Geht man davon aus, dass nicht alle Fahrzeugtypen und darüber hinaus nur die Spitzenmotorisierung eines Fahrzeugtyps über eine Akustikklappe verfügen, kann man den Anteil derer im Sportwagensegment auf ca. 15 % und in den anderen relevanten Fahrzeugsegmenten auf ca. 2 % schätzen.

Somit ergeben sich in etwa 680.600 PKW mit einer Akustikklappe im Jahr 2020 (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zulassungszahlen Fahrzeuge mit Akustikklappe

Fahrzeugsegment	Anzahl	Akustikklappe
Sportwagen	900.000	135.000
Mittelklasse	8.000.000	160.000
Oberklasse	280.000	5.600
Kompaktklasse	11.900.000	238.000
SUV	4.300.000	86.000
Geländewagen	2.800.000	56.000
Gesamt	28.180.000	680.600

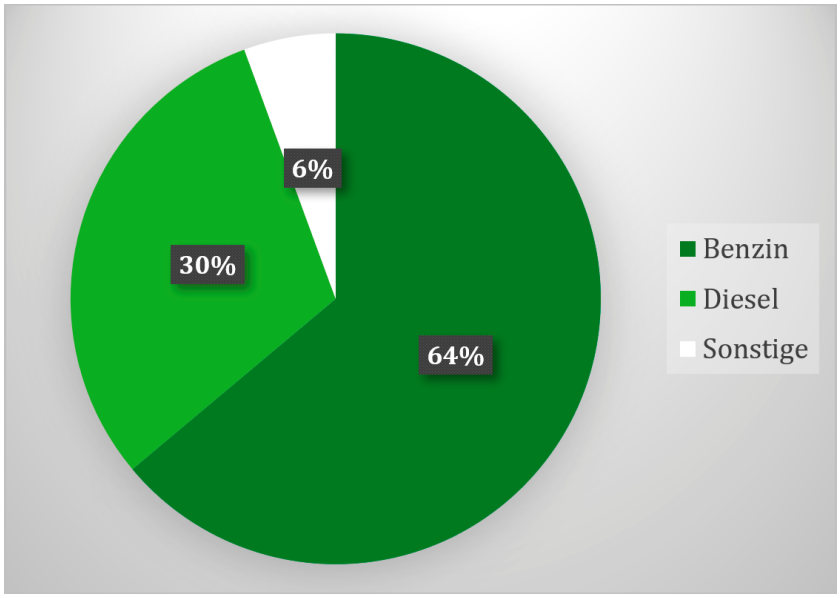
Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Eine Auswertung der KBA Statistik des Jahres 2021 liegt zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Berichts nicht vor, wird allerdings dem aktuellen Trend nach deutlich höher eingeschätzt. Besonders in der Kompaktwagenklasse ist festzustellen, dass die Fahrzeughersteller vermehrt auf Abgasklappen zum Sound-Design setzen, um leistungsschwachen Fahrzeugen einen sportlichen Charakter zu verleihen.

3.3.5.2 Personenkraftwagen mit Auspuffklappe für Abgasrückführung

Der Anteil der dieselbetriebenen Personenkraftwagen zum 01. Januar 2022 betrug auf Deutschlands Straßen 30 % (Abbildung 17).

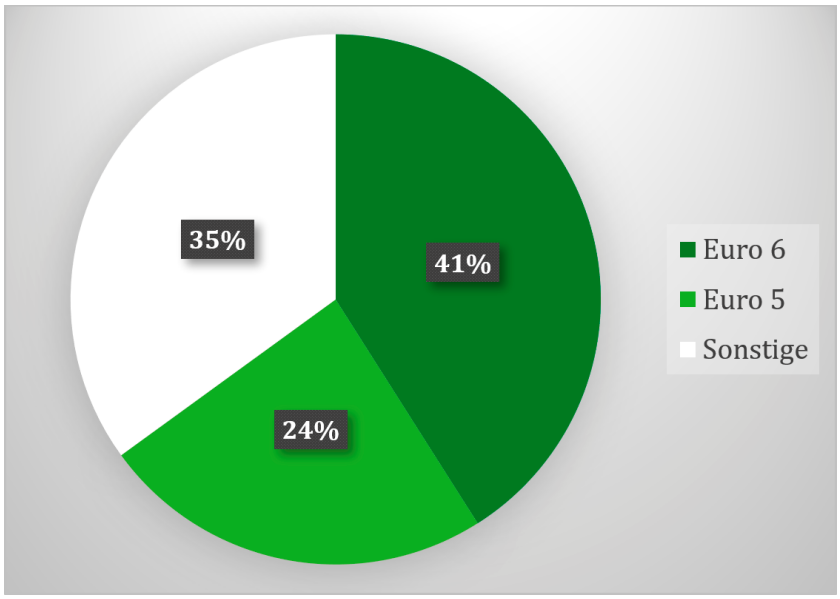
Abbildung 17: Verbrennungsarten PKW in Deutschland 2021



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Davon waren ca. 65 % mit einer Abgasnorm Euro 5 oder Euro 6 ausgerüstet (Abbildung 18). Da die Abgasnorm Euro 4 oder niederwertigere noch nicht über eine Auspuffklappe für die Abgasrückführung verfügen, ergibt sich ein Anteil von ca. 20 % für dieselbetriebene Personenkraftwagen mit einer Abgasnorm von Euro 5 oder höherwertigere in Deutschland für 2021. Nachdem allerdings manche Dieselfahrzeuge – insbesondere welche mit Harnstoffeinspritzung (AdBlue) – ohne Auspuffklappe auskommen, kann final der Anteil auf 10 % bis 15 % reduziert werden. Somit sind ca. 4,9 bis 7,3 Millionen Fahrzeuge mit Dieselantrieb und Abgasrückführungsklappe in Deutschland aktuell zugelassen. [13]

Abbildung 18: Emissionsgruppen PKW in Deutschland 2021

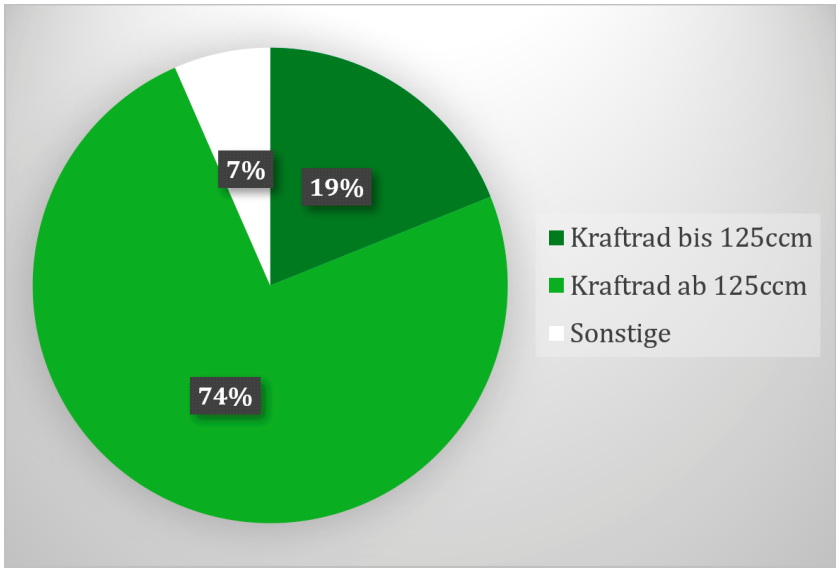


Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

3.3.5.3 Motorräder

4,8 Millionen Motorräder waren im Januar 2022 in Deutschland zugelassen, welche in verschiedene Hubraumklassen unterteilt werden können, wie in Abbildung 19 dargestellt ist. Zieht man davon Krafträder bis 125 ccm Hubraum ab, da diese im seltensten Fall über Auspuffklappen verfügen, ergibt sich eine Gesamtzulassung von ca. 3,6 Millionen Motorrädern, die potenziell eine Auspuffklappe verbaut haben könnten. [15]

Abbildung 19: Einteilung der Krafträder nach Hubraum



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Nach eigenen Einschätzungen lässt sich der Anteil derer, die tatsächlich über eine Auspuffklappe verfügen, auf ca. 10 % einordnen. Somit ergibt sich eine ungefähre Anzahl von Motorrädern mit Auspuffklappe von 360.000 auf deutschen Straßen.

3.3.5.4 Lastkraftwagen

Lastkraftwagen müssen nach StVZO § 41 mit einer Dauerbremse ausgerüstet sein, worunter auch die Motorstaubremse mit Auspuffklappe fällt. Somit lässt sich sagen, dass – abzüglich weniger Fahrzeuge, die von Teilen der StVZO § 41 ausgenommen sind – nahezu alle zugelassenen LKW mit Druckluftbremse in Deutschland mit einer Auspuffklappe ausgerüstet sind.

3.4 Soundaktuatoren

3.4.1 Bauarten

Beim Begriff „Soundaktuator“ handelt es sich um eine nicht klar definierte Nomenklatur. Häufig werden in diesem Zusammenhang auch die Ausdrücke „Soundbooster“ oder „Soundgenerator“ verwendet. Diese Bezeichnungen werden von den Fahrzeug- und Aftermarket-Herstellern wie auch von der Zuliefererindustrie für verschiedenartige Systeme verwendet. So können hier zwei grundlegende Anwendungsfälle unterschieden werden.

Innenraum-Soundaktuatoren bilden hierbei die erste Gruppe. Sie dienen der Erzeugung oder Verstärkung von Motorgeräuschen im Innenraum des Fahrzeugs ohne nennenswerten Einfluss auf das Außengeräusch. Auf dem Markt sind unterschiedliche Bauformen vertreten. So wird die Schallwiedergabe wahlweise über das bereits vorhandene Soundsystem des Fahrzeugs oder aber über separate Lautsprecher realisiert. Ein Steuergerät, auch „Soundsymposer“ genannt, errechnet anhand von Drehzahl und Last des Verbrennungs- oder Elektromotors ein wahlweise realitätsnahes oder künstliches Motorgeräusch, welches dem entsprechenden Verstärker zugespielt wird. Bei Verbrennungsmotoren ist auch eine Verstärkung des tatsächlichen Motorgeräusches möglich. Hierzu wird der Motorklang zum Beispiel im Motorraum oder Ansaugtrakt mit einem Mikrofon aufgenommen und in Echtzeit durch den Soundprozessor verarbeitet und dabei in der Lautstärke verändert. Weiterhin existieren Systeme mit Körperschallwandlern, wie in Abbildung 20 dargestellt. Durch Montage an der Fahrzeugkarosserie können nahezu beliebige Motorenklänge für die Insassen simuliert werden.

Abbildung 20: Innengeräusch-Soundaktuator

Quelle: www.kendrion.com [16]

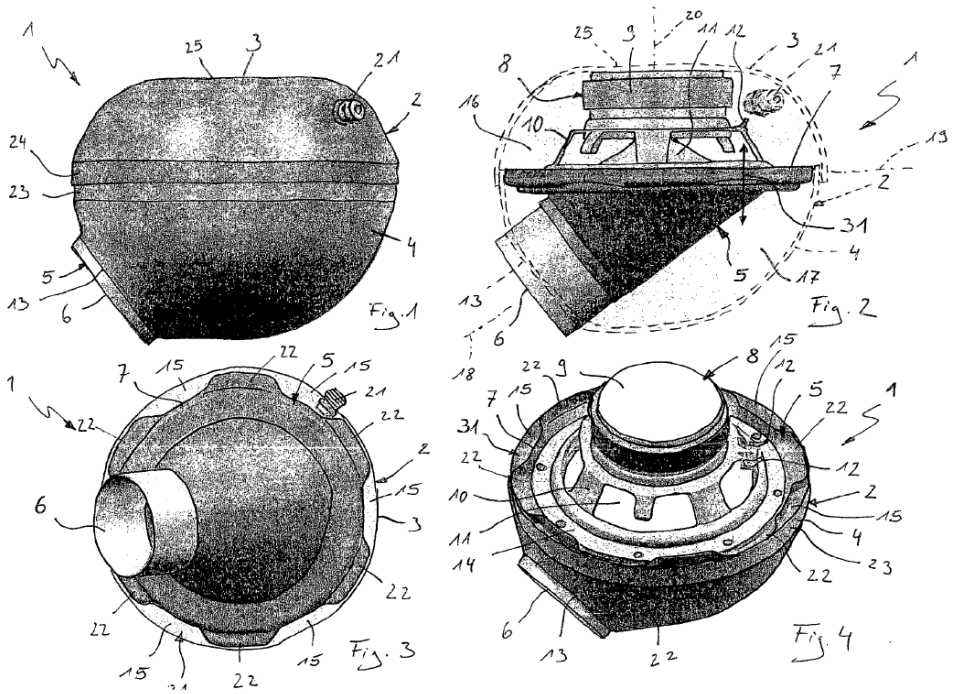
Außengeräusch-Soundaktuatoren bilden die zweite Gruppe. Sie zielen hingegen auf eine Veränderung des Klangcharakters oder eine Erhöhung des Pegels des äußeren Fahrgeräusches ab. Ein verändertes Innenraumgeräusch ist hierbei ein grundsätzlicher Nebeneffekt, welcher teilweise erwünscht, teilweise aber auch unerwünscht ist. Konstruktiv sind diese Aktuatoren ähnlich einem gewöhnlichen Lautsprecher aufgebaut. Durch stärkere Umwelt- und Temperatureinflüsse, speziell beim Verbau innerhalb der Abgasanlage, sind allerdings besonders widerstandsfähige Materialien nötig. Während bei rein elektrisch fahrenden Fahrzeugen meist eine künstliche Geräuschkulisse erzeugt wird, ist bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren die Erzeugung eines verbrennungsmotorischen Geräusches üblich. Bei elektrischen Fahrzeugen werden hierzu Lautsprecher in der Fahrzeugfront und/oder dem Fahrzeugheck jeweils hinter den Stoßfängern verbaut. Wie verschiedene Patente [17] [18] zeigen, sind auch Körperschallwandler zur Nutzung als AVAS denkbar. Bei Verbrennern sind sowohl Lautsprecher im Motorraum als auch im Abgastrakt oder am hinteren Unterboden des Fahrzeugs geläufig.

3.4.2 Funktionsweise

Die verbreitetste Bauform von Außengeräusch-Soundaktuatoren basiert auf einem Patent der Firma Eberspächer aus dem Jahr 2009. Der ursprünglich angedachte Verwendungszweck der Konstruktion war eine aktive Schalldämpfung. [19] Hierzu wird durch eine Schnittstelle zum Motormanagement das jeweilige Auspuffgeräusch errechnet. Durch phasenverschobene Wiedergabe bestimmter Frequenzen dieses Geräuschs wird dann eine Auslöschung oder Dämpfung dieser bewirkt. So kann eine gezielte und stark variierbare Minderung der Schallemissionen erreicht werden. Gleichzeitig baut das System bis zu 60 % kompakter als ähnlich leistungsfähige passive Schalldämpfer. Der so gewonnene Bauraum am Unterboden des Fahrzeugs kann wiederum für andere Komponenten sinnvoll genutzt werden. Zudem ergibt sich für eine derartige Abgasanlage eine erhebliche Gewichtsersparnis von bis zu 40 %. [20] Auf dem Fahrzeugmarkt hat sich diese Aktuator-Bauform sehr schnell etabliert. Allerdings wurde der Verwendungszweck umgekehrt. Statt einer Auslöschung wurden bestimmte Frequenzen

verstärkt, um den Eindruck eines sportlicheren Motorklangs zu erzeugen oder einem Dieselmotor den Klangcharakter eines Benziners zu geben.

Abbildung 21: Aktiver Schalldämpfer



Quelle: Patentschrift Nr. DE 10 2008 018 085 A1 [19]

Eine weitere Bauform sind Körperschallwandler. Statt einer klassischen Lautsprechermembran, werden hierbei Teile der Fahrzeugkarosse durch eine von einer Schwingspule angetriebenen Masse in Schwingung versetzt. Auf diese Weise können künstliche oder verstärkte Motorgeräusche direkt über die Karosserie wiedergegeben werden. Wandler zur Erzeugung von Außengeräuschen werden beispielsweise an einer geeigneten Stelle an der Innenseite der Motorhaube befestigt. Die Haube wird dann gezielt zum Schwingen gebracht. Diese Schwingung sorgt für die Wiedergabe des Motorgeräuschs an die Umgebung. Durch die Materialbeschaffenheit von Karosseriebauteilen erscheint das simulierte Motorgeräusch mechanischer und authentischer als bei vielen Aktuatoren mit Lautsprechermembran. In ihrer Beschaffenheit und Optik ähnelt diese Bauform stark den bereits in Abbildung 20 dargestellten Innengeräuschaktuatoren.

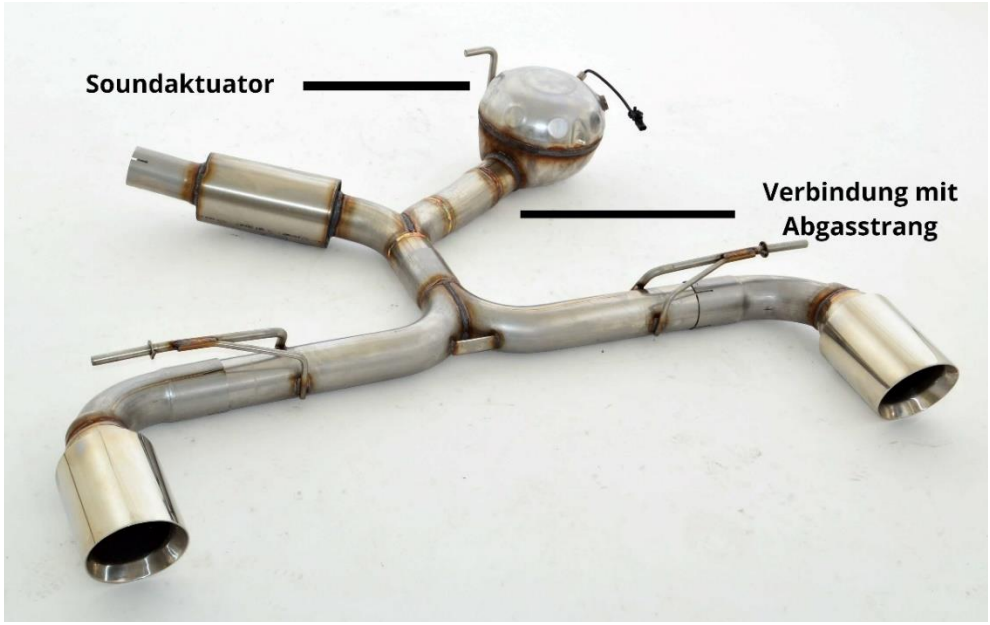
Zur Wiedergabe im Innenraum wird meist eine Einbauposition unterhalb der Windschutzscheibe gewählt. Der wiedergegebene Klang wird dadurch hauptsächlich über die Scheibe übertragen und scheint für die Fahrzeuginsassen somit aus dem Motorraum zu kommen. [16]

Zur Erzeugung von Außengeräuschen werden Wandler hingegen an der Innenseite der Motorhaube oder auch am Boden der Reserveradmulde im Fahrzeugheck verbaut. Besonders letztere Einbauposition hat den Vorteil, gleichermaßen Innen-, wie Außengeräusche erzeugen zu können.

Während werksseitig verbaute Systeme grundsätzlich über die vorhandenen Fahrmodi des Fahrzeugs angesteuert werden, verfügen Nachrüstlösungen meist über eine zugehörige Smartphone-App zur Einstellung von Lautstärke und Klangprofil des Aktuators. Es existieren

außerdem Lösungen, bei denen das Klangprofil durch Drücken von definierten bereits werksseitig im Fahrzeug verbauten Tasten, wie zum Beispiel der ESP-Taste, gewechselt werden kann. [21] Auch die Ansteuerung des werksseitig verbauten Aktuators über ein nachträglich zwischengeschaltetes Steuergerät ist möglich. Auf diese Weise ist es möglich, Klangcharakter und Lautstärke zu manipulieren, ohne ein zusätzliches Aktuator-Modul verbauen zu müssen. Die Steuerung der Klangfunktionen kann ebenfalls über originale Tasten des Fahrzeugs oder über eine zum Steuergerät gehörige Smartphone-App erfolgen. Durch die freie Ansteuerung des Systems können neben unterschiedlichen Klangcharakteren auch Motorstartgeräusche und künstliche Fehlzündungen abgespielt werden. [22] [23] Im Gegensatz zu nachrüstbaren Lösungen direkt vom Fahrzeughersteller oder einigen genehmigten Nachrüst-Aktuatoren aus dem Zubehör, kann in diesen Fällen das Einhalten der gesetzlichen Geräuschgrenzwerte nicht mehr gewährleistet werden.

Abbildung 22: Außengeräusch-Aktuator mit Abgasstrang



Quelle: www.active-sound.eu [23]

3.4.3 Verwendungsgründe

Bei elektrischen Fahrzeugen und Plug-In Hybriden werden während des elektrischen Fahrens nahezu keine Motorgeräusche und bei geringen Geschwindigkeiten nur minimale Abrollgeräusche abgegeben. Um bei diesen Fahrzeugen die Wahrnehmbarkeit gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern, insbesondere Fußgängern, zu verbessern, schreibt der Gesetzgeber für derartige Fahrzeuge ein AVAS vor. Es handelt sich dabei um ein System zur Erzeugung eines künstlichen Fahrgeräusches in der unmittelbaren Umgebung des Fahrzeugs im Geschwindigkeitsbereich von 0 km/h bis 20 km/h. Durch die vorgeschriebene Beschaffenheit des Geräusches (siehe Kap. 5.2.2) kann auch ein Beschleunigen oder Verzögern des Fahrzeugs erkannt werden.

Da bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen außerhalb des AVAS-Bereichs lediglich Reifenabrollgeräusche und geringfügige Geräusche vom elektrischen Antriebsstrang zu hören sind, werden diese Fahrzeuge allgemein als akustisch „unemotional“ empfunden. Einige Konzepte zielen daher auf eine Emotionalisierung des Fahrgeräuschs elektrischer Fahrzeuge ab.

Systeme, die den Geräuschpegel und Klangcharakter dieser Fahrzeuge verändern, sind bereits in Serienfahrzeugen verbaut und werden zum Beispiel „Sport-Sound“ oder „e-Sound“ genannt. Hierbei sorgen Innengeräuschaktuatoren für die Veränderung des emotionalen Empfindens der Insassen, während gleichzeitig oder auch alleinig verbaute Außengeräuschaktuatoren den sportlichen Charakter des Fahrzeugs gegenüber Passanten deutlich machen sollen.

Betrachtet man Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, so führen verschiedene Gründe zu dem Bedarf nach Veränderung des Klangs. Durch strenger werdende Emissionsgrenzwerte steigt bei allen Fahrzeugherstellern der Drang, die CO_2-Emissionen der eigenen Flotte zu senken. Eine Maßnahme zum Erreichen dieser Ziele war besonders zwischen den Jahren 2005 und 2013 der vermehrte Einsatz von Dieselmotoren auch in sportlichen und hochmotorisierten Fahrzeugen. In diesem Fall deckt sich der vorhandene Motorklang meist nicht mit den Erwartungen des Kunden an ein Fahrzeug dieser Kategorie. Durch Soundaktuatoren im Innenraum wie auch außen kann dieser „Missstand“ kompensiert werden. Ein weiterer Weg zur Verbrauchs- und Emissionsreduktion ist das sogenannte „Downsizing“ – das Verringern des Hubraums und der Zylinderanzahl unter Beibehaltung der Motorleistung durch Aufladung. Darüber hinaus sind auch Praktiken wie Zylinderabschaltungen zu beobachten, bei denen zum Beispiel ein Vierzylinder-Motor zeitweise zwei seiner Zylinder abschaltet. In Folge dieser Maßnahmen ergibt sich ein weniger aggressiver und vermindert bass-lastiger Klangcharakter. Soundaktuatoren sind in der Lage, diese Fahrzeuge wieder wie großvolumige Sportmotoren mit mehr Zylindern klingen zu lassen sowie Dröhn-Geräusche während aktiver Zylinderabschaltung zu beseitigen.

Nicht zuletzt tragen zusätzliche Baugruppen zur Abgasnachbehandlung, wie Partikelfilter und Katalysatoren, durch ihre schalldämpfende Wirkung zu einem leiseren und teilweise verwaschenen Klangbild bei. Auch hier lässt sich durch Aktuatoren wieder ein rauerer und dadurch subjektiv sportlicher Klang erzeugen sowie die Gesamtlautstärke auf ein gewünschtes Niveau anheben.

3.4.4 Typgenehmigungsverfahren

Für die Genehmigung von Fahrzeugen mit Soundaktuatoren oder die Erweiterung von bestehenden Genehmigungen beschreibt das Kraftfahrt-Bundesamt in einem gesonderten Informationsschreiben (siehe Anhang A.2) die Bedingungen für eine positive Begutachtung. Zum ersten wird eine umfassende Dokumentation des Zusatzsystems gefordert. So müssen Zeichnungen, Funktionsbeschreibungen wie auch Angaben über Hersteller und Teilenummern des Systems eingereicht werden. Darüber hinaus sind Angaben über die verwendete Software und deren Wirkung zu machen. Wie auch bei Auspuffklappen, muss der Hersteller ein Konzept zu Fehlerfällen und Antimanipulation erstellen. Hierbei wird beschrieben, wie der Zugang zur Gerätesoftware oder zur Signalübertragung erschwert oder verhindert wird. Im Fehlerfall muss das Zusatzsystem automatisch abgeschaltet werden.

Zur Überprüfung von Fahr- und Standgeräusch ist zunächst zu überprüfen, ob das Zusatzsystem separat durch den Fahrer geschalten werden kann oder ob es durch gegebenenfalls vorhandene Fahrmodi des Fahrzeugs gesteuert wird. In jedem Fall ist eine Geräuschmessung nach UN-Regelung Nr. 51.03 im „worst case“ durchzuführen. Dabei sind sowohl die Grenzwerte des Anhang 3 als auch Anhang 7 (ASEP) zu erfüllen. Weiterhin ist durch den Hersteller zu bestätigen, dass das Geräuschverhalten unter realen Prüfbedingungen nicht signifikant vom Verhalten innerhalb des zuvor geprüften Bereichs abweichen.

Die genannten Bedingungen zur Genehmigung gelten allerdings nur für werksseitig verbaute Soundaktuatoren. Gemäß § 30 der StVZO müssten Fahrzeuge so gebaut und ausgerüstet sein, „dass ihr verkehrsüblicher Betrieb niemanden […] mehr als unvermeidbar […] belästigt“. Da das

Nachrüsten eines solchen Systems nicht im Einklang mit diesen Anforderungen steht, wird eine Nachrüstung durch das KBA ausgeschlossen. Genehmigungen in anderen Ländern der vereinten Nationen sind von dieser Vorgabe allerdings nicht betroffen. Aus diesem Grund sind Nachrüstlösungen für Soundaktuatoren in Abhängigkeit von den jeweiligen nationalen Regelungen weiterhin umsetzbar.

3.4.5 Marktanteile und Beispielfahrzeuge

Schon seit dem Ende der 2000er Jahre kommen sowohl Innenraum- als auch Außengeräusch-Soundaktuatoren zum Einsatz. Verbaut werden Sie bereits werksseitig von den meisten namenhaften Fahrzeugherstellern. Vorreiter waren unter anderem der Hersteller Audi, welcher derartige Systeme bereits Anfang der 2010er Jahre in zahlreichen Modellen verschiedener Fahrzeugkategorien anbot. Außengeräuschaktuatoren kamen hierbei meist bei Diesel-Pkw wie zum Beispiel beim Audi S6 TDI zum Einsatz, während Innengeräuschaktuatoren besonders bei sportlich Fahrzeugen mit Downsizing-Ottomotoren – also Benzinmotoren mit relativ hoher Motorleistung aus geringem Hubraum – wie dem Audi S3 verbaut wurden. Da keine Statistiken zur Erfassung dieser Bauteile bekannt sind, kann der Anteil von werksseitig verbauten Soundaktuatoren im Bereich nicht elektrifizierter Fahrzeuge auf ca. 5 bis 10 % geschätzt werden.

Soundaktuatoren werden auch als Nachrüstlösungen von OEMs [24] sowie Aftermarket-Herstellern, wie zum Beispiel Eberspächer, für zahlreiche Fahrzeugmodelle angeboten. Die Fahrzeugpalette erstreckt sich hierbei über verschiedenste Modelle u. a. der Marken BMW, Mercedes-Benz, Audi und Volkswagen. [25] Offizielle Verkaufszahlen sind jedoch nicht bekannt. Die Zeitschrift Autobild Sportscars verlieh dem System „ActiveSound“ von Eberspächer im Jahr 2016 sogar den Preis für die „Innovation des Jahres“. [26]

Beworben werden diese nachrüstbaren Systeme u. a. als „die Innovation mit eingebautem Aha-Effekt“ [27] oder gar „Voluminös, brachial, brutal, phänomenal!“ [28], während die Automobilhersteller den Einsatz von Aktuatoren in ihren Serienfahrzeugen meist unerwähnt lassen. Es ist anzunehmen, dass kaum ein Hersteller seinen Kunden aktiv vor Augen führen möchte, dass der sportliche Klang des jeweiligen Fahrzeugs nicht vom Motor selbst stammt. Zu groß wäre wohl die Gefahr, dass sich der Kunde gegen den Kauf des Fahrzeugs entscheidet. Auf dem Nachrüstmarkt sieht dies selbstverständlich anders aus. Hier gilt es, das vom Kunden empfundene Defizit an Sportlichkeit oder Emotionalität im Motorklang zu kompensieren.

Auch Module zur Manipulation der werksseitig verbauten Aktuatoren sind auf dem freien Markt verfügbar. [22] Sie ermöglichen es, die Geräuschkulisse eines Fahrzeugs erheblich zu verändern, können dabei jedoch absolut unauffällig verbaut werden. So ist es im Rahmen von Verkehrskontrollen oder der periodischen Fahrzeugüberwachung kaum möglich, die illegale Manipulation zu erkennen.

4 Sounddesign in der Praxis

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die verschiedenen Möglichkeiten des Sounddesigns und die Verwendungsgründe der Auspuffklappen aufgezeigt wurden, sollen diese durch erste anfängliche messtechnische Untersuchungen auf Stichhaltigkeit der Argumente der Fahrzeughersteller überprüft werden.

Das Messfeld bzw. Messumgebung und die Prüfmittel entsprechen der UN-Regelung Nr. 51.03 – welche im Kapitel 5 näher erläutert wird – und wurden auf der hauseigenen Messstrecke des TÜV Süd in Garching bei München durchgeführt.

Zur Vorbereitung der Versuche wurden die Fahrzeuge betriebswarm gefahren und die Laufleistungen von über 10.000 km gewährleisten zusätzlich eine ausreichende Konditionierung der Abgasanlage.

4.1 Luftansaugung

Als Versuchsfahrzeug wird ein VW Golf R mit einer Motorleistung von 221 kW, welcher über ein nachträglich geändertes Ansaugmodul verfügt, ausgewählt (Abbildung 23). Durch die Vergrößerung des Rohrdurchmessers des Ansaugkanals und die Vermeidung von strömungsungünstigen Kanten soll der Luftdurchsatz verbessert werden. Der Hersteller des Saugmoduls preist dem Kunden eine höhere Motorleistung und ein verbessertes Ansprechverhalten an. Die Abgasanlage entspricht hingegen dem Originalzustand.

Abbildung 23: Optimiertes Saugmodul

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Das Prüffahrzeug besitzt werkseitig eine bestehende Homologation für das Geräuschveralten nach UN-Regelung Nr. 51.02 und die Messung erfolgt entsprechend im „Standard“ Modus, bzw. der Modus, welcher bei Motorstart aktiviert ist. Das Fahrgeräusch ist in der Betriebserlaubnis mit 72 dB(A) angegeben. Aufgrund des verbauten Automatikgetriebes erfolgt die Messung in Fahrstufe „D“.

Tabelle 2: Ergebnisse Fahrgeräuschmessung VW Golf R

Fahrprofil: Standard	Messung links	Messung rechts
1. Messung (Fahrstufe D)	74,2 dB(A)	75,1 dB(A)
2. Messung (Fahrstufe D)	74,8 dB(A)	75,0 dB(A)
Ergebnis	**74 dB(A)** *)	
Betriebserlaubniswert	72 dB(A)	
gesetzl. Grenzwert	74 dB(A)	
*) abzgl. 1 dB(A) Messtoleranz und mathematisch gerundet		

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Die Tabelle 2 zeigt die Messergebnisse der durchgeführten Fahrgeräuschmessungen. Daraus resultiert ein Ergebnis von 74 dB(A). Somit liegt das Fahrgeräusch des VW Golf R 2 dB(A) über dem des Serienzustands. Allerdings kann der gesetzliche Grenzwert eingehalten werden und das Fahrzeug kann – in diesem Fall – über eine Einzelabnahme an einer technischen Prüfstelle legal im Straßenverkehr betrieben werden.

Es ist bei der Messung auffällig, dass die Fahrgeräuscherhöhung subjektiv nur durch das erhöhte Ansauggeräusch bei der Volllastbeschleunigung zu Stande kommt. Eine Erhöhung des Standgeräuschwertes kann nicht festgestellt werden. Ebenfalls ist durch die Auswahl der verschiedenen Fahrprofile kein Unterschied feststellbar, was damit zu erklären ist, dass sich die Abgasanlage im Serienzustand befindet und über keine Akustikklappen verfügt.

4.2 Abgasanlage mit Akustikklappe

Als repräsentatives Versuchsfahrzeug wird dazu ein Volkswagen Arteon R ausgewählt. Das Fahrzeug verfügt über einen 4-Zylinder Ottomotor mit einer Leistung von 235 kW und einer Abgasanlage mit je einer Klappe am linken und rechten Nachschalldämpfer. Dem Fahrer stehen dabei drei unterschiedlichen Fahrprofile („Komfort“, „Sport“ und „Race“) zu Verfügung, welche bei einer Standgeräuschmessung untersucht werden sollen.

Das Versuchsfahrzeug besitzt eine Homologation bezüglich des Geräusches nach UN-Regelung Nr. 51.03. Die Prüfdrehzahl des Motors beträgt entsprechend der Richtlinie 3750 min^{-1}. In nachfolgender Tabelle 3 sind die ermittelnden Messergebnisse dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse Standgeräuschmessung VW Arteon R

Fahrprofil: Komfort	Endrohr links	Endrohr rechts	Klappe links	Klappe rechts
1. Messung	77,4 dB(A)	77,6 dB(A)	geschlossen	geschlossen
2. Messung	77,6 dB(A)	78,0 dB(A)	geschlossen	geschlossen
3. Messung	77,8 dB(A)	77,9 dB(A)	geschlossen	geschlossen
Ergebnis	**78 dB(A)** *)		**geschlossen**	
Betriebserlaubniswert	**83 dB(A)**			

Fahrprofil: Sport	Endrohr links	Endrohr rechts	Klappe links	Klappe rechts
1. Messung	77,8 dB(A)	78,1 dB(A)	geschlossen	geschlossen
2. Messung	77,7 dB(A)	78,0 dB(A)	geschlossen	geschlossen
3. Messung	78,1 dB(A)	78,0 dB(A)	geschlossen	geschlossen
Ergebnis	**78 dB(A)** *)		**geschlossen**	
Betriebserlaubniswert	83 dB(A)			

Fahrprofil: Race	Endrohr links	Endrohr rechts	Klappe links	Klappe rechts
1. Messung	83,9 dB(A)	83,2 dB(A)	geöffnet	geöffnet
2. Messung	83,6 dB(A)	83,5 dB(A)	geöffnet	geöffnet
3. Messung	83,6 dB(A)	83,7 dB(A)	geöffnet	geöffnet
Ergebnis	**84 dB(A)** *)		**geöffnet**	
Betriebserlaubniswert	83 dB(A)			

*) mathematisch gerundet

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

Während beide Fahrprofile „Komfort“ und „Sport“ bei der Standgeräuschmessung die Akustikklappen geschlossen sind, öffnen sie sich im Fahrprofil „Race“. Dabei ist ein Anstieg des Geräuschpegels von 6 dB(A) festzustellen. Der Wert des Standgeräusches ist in der Betriebserlaubnis mit 83 dB(A) angegeben und entspricht somit annähernd dem gemessen Wert des Versuchs.

Anhand dieses Versuches ist klar erkennbar, dass der Hersteller bei dem Modus „Race“ dem Fahrzeugbesitzer eine Geräuschpegelerhöhung ermöglicht, um eine Art „Motorsportfeeling“ aufkommen zu lassen. Bei der Homologation des Fahrzeuggeräusches wird dazu der Standgeräuschwert des lautesten Modus gewertet. Da aktuell keine gesetzlichen Grenzwerte für das Standgeräusch existieren, sind dem Fahrzeughersteller sämtliche Freiräume gegeben, das Ausmaß des Geräuschpegels im Stand zu gestalten.

Das Klappenkennfeld für den Fahrbetrieb wurde nicht untersucht und könnte wie in Tabelle 4 dargestellt aussehen.

Tabelle 4: Mögliche Klappenstellungen im Fahrbetrieb

Fahrprofil	Klappe links	Klappe rechts
Komfort	geschlossen	geschlossen
Sport	Motordrehzahl > 3700 min^{-1} und Last > 50 % – geöffnet	Motordrehzahl > 3300 min^{-1} und Last > 50 % – geöffnet
Race	Motordrehzahl > 3000 min^{-1} – geöffnet	Motordrehzahl > 1900 min^{-1} – geöffnet

Quelle: Eigene Darstellung, TÜV Süd

4.3 Weitergehende Untersuchungen

Aktuell können noch keine belastbaren Daten zu Verfügung gestellt werden, wie sich Auspuffklappen im Fahrbetrieb auf die Motorleistung und Abgasverhalten auswirken, da man im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht auf Messdaten zurückgreifen konnte. Insofern kann im Rahmen dieses Projektes lediglich eine grobe Abschätzung der Auswirkung abgegeben werden.

Um hier wissenschaftlich belastbare Aussagen zu erhalten, bedarf es einer detaillierten messtechnischen Untersuchung.

In diesem Messprogramm wäre zunächst der Ist-Zustand von geläufigen Klappensteuerungen zu untersuchen. Mittels Kameratechnik oder anderer geeigneter Messmethoden können dann Klappenstellungen in Abhängigkeit von Motordrehzahl, Motorlast und Fahrmodus aufgezeichnet werden. Durch die Überprüfung von Beispielfahrzeugen aus verschiedenen Fahrzeugkategorien, kann ein Bild der aktuell üblichen Schaltstrategien geschaffen werden. Aus diesen Daten könnten bereits erste Rückschlüsse auf die jeweiligen Verwendungsgründe der Akustikklappen als Komfortmerkmal oder zur Ausnutzung von Grauzonen innerhalb der Geräuschrichtlinien gezogen werden.

Weiterführend sollte untersucht werden, wie groß die Auswirkungen der verschiedenen Klappenstellungen auf das tatsächliche Geräusch- und Abgasverhalten sind. Hierzu können zunächst serienmäßig vorhandene Fahrmodi, welche einen Einfluss auf die Klappensteuerung haben, hinsichtlich dieser Kriterien in mehreren Fahrzuständen mit verschiedenen Klappenstellungen miteinander verglichen werden.

Für ein umfassendes Bild wären entsprechende Messungen mit manipulierten Klappen angezeigt, um Daten mit einem Mehrwert gegenüber bereits existierenden Messdaten zu generieren. Bei der Manipulation von Klappen ist zu beachten, dass Messungen mit permanent geschlossener Akustikklappe zwar wertvolle Erkenntnisse liefern würden, diese jedoch auf Grund des erhöhten Risikos von Motor- oder Komponentenschäden durch erhöhte Abgastemperaturen und Abgasgegendrücke nicht realisierbar sind. Des Weiteren ist nicht auszuschließen, dass die Manipulation durch die On-Board-Diagnose detektiert wird und das Fahrzeug in einen anderen Modus wechselt, der dann als Messergebnis jedoch nicht verwertbar wäre.

Durch verschiedene frei im Handel verfügbare Module zur Manipulation von serienmäßigen Klappenanlagen könnten aber Messungen mit dauerhaft geöffneten Akustikklappen durchgeführt werden. Für alle Last- und Drehzahlbereiche, in denen die werksseitig verbauten Klappen vollständig oder teilweise geschlossen sind, können so Vergleichswerte für das Geräusch- und Abgasverhalten geschaffen werden. Die Analyse des Abgasverhaltens erscheint

insofern interessant, als dass beispielsweise die von einigen Herstellern propagierte Notwendigkeit von Auspuffklappen zur Erhöhung des Abgasgegendrucks und infolgedessen zur Verbesserung der Abgasemissionen objektiv beurteilt werden kann. Bei Betrachtung des Geräuschverhaltens können die quantitativen Auswirkungen der Manipulation von Klappenanlagen untersucht werden. So würde sich zeigen, um welchen Faktor sich der Geräuschpegel in verschiedenen Fahrsituationen erhöht und folglich, wie groß die vermeidbare Lärmbelästigung ausfällt.

5 Vorschriften zur Reglementierung der Geräuschemissionen

Der folgende Abschnitt behandelt die Richtlinien für das Geräuschverhalten von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr. Es werden die Regelungen für Fahrzeuge mit Verbrennungs- und Elektromotor analysiert. Dazu werden die ersten Vorschriften und deren Änderungen mit der Zeit aufgezeigt. Anhand der ermittelten Grauzonen werden mögliche Verbesserungen aufgeführt. Die Regelungen für Motorräder werden hierbei verkürzt betrachtet. Die Abschnitte 5.2.2 und 5.2.3 geben einen kurzen Einblick in die nennenswerten Unterschiede zwischen Motorrad- und PKW-Messungen im Hinblick auf die aktuell gültigen gesetzlichen Regelungen. Eine ausführliche Abhandlung zu diesem Thema finden Sie in der Forschungsarbeit des Umweltbundesamtes „TEXTE 161/2020 – Überprüfung der Geräuschemissionen von Motorrädern im realen Verkehr“.

5.1 Rückblick

Die erste Reglementierung von Geräuschemissionen ist in der Straßenverkehrsordnung vom Jahre 1937 aufgeführt und am 01.01.1938 in Kraft getreten. Das erste Messfahren wurde bis 1966 angewandt. Es beinhaltet die „beschleunigte Konstantfahrt“ als Fahrgeräusch. Das Fahrzeug musste mit 40 km/h (ab 1959 mit 50 km/h) im direkten Gang unter Volllast und gleichzeitigem Bremsen, ohne schneller zu werden, gemessen werden. Die Standgeräuschmessung wurde mit einem Abstand von 20 m zum Fahrzeugheck durchgeführt. Ab 1966 galt das zweite Messverfahren. Beim Prozedere zur Ermittlung des Fahrgeräuschs wurde erstmalig eine beschleunigte Vorbeifahrt angewendet. Als Prüfgang wurde in Abhängigkeit von der Ganganzahl der zweite oder dritte Gang gewählt. Für die Standgeräuschmessung wurde die Entfernung von Auspuffmündung zum Messmikrofon auf 7 m verringert. Außerdem entfiel der zugehörige Grenzwert für den Standgeräuschpegel. In den Folgejahren wurden durch neue Regelungen der Europäischen Gemeinschaft weitere Verschärfungen der Grenzwerte sowie Veränderungen des Prüfprozederes durchgeführt. Ab 1981 wurde zudem die Nahfeldmessung für das Standgeräusch eingeführt. Diese wird mit kleinen Änderungen bis heute angewendet und gilt als Maßstab für die Überprüfung von Kraftfahrzeugen im Rahmen der technischen Überwachung z. B. bei Polizeikontrollen oder Hauptuntersuchungen.

Tabelle 5 zeigt, wie die Grenzwerte im Laufe der Zeit gesenkt wurden. Durch unterschiedliche Messverfahren, Prüfbedingungen und Ergebnis-Berechnungen führte dies allerdings nicht immer zu einer tatsächlichen Verringerung des Fahrgeräuschs. Auch ist aus diesem Grund nur bedingt eine Vergleichbarkeit gegeben. Bei nahezu allen Revisionen wurden außerdem Grenzwert-Aufschläge für z.B. Geländefahrzeuge, Diesel-PKW, behindertengerechte Umbauten und Sportwagen gewährt. Diese werden der Übersichtlichkeit halber hier nicht zusätzlich erwähnt. Während über die Jahre immer wieder kleine Änderungen am Prüfprozedere durchgeführt wurden, geht erst mit der dritten Änderungsserie der UN-Regelung Nr. 51 eine umfangreiche Abwandlung des Messverfahrens einher, welche in Abschnitt 5.2.1 erläutert wird.

Tabelle 5: Übersicht der Grenzwerte ab 1938

Vorschrift	Grenzwert Fahrgeräusch	Grenzwert Standgeräusch
§ 49 (38)	85 Phon	85 Phon
§ 49 (52)	88 Din-Phon	88 Din-Phon
§ 49 (53)	85 Din-Phon	85 Din-Phon
§ 49 (56)	85 Din-Phon	85 Din-Phon
§ 49 (57)	85 Din-Phon	85 Din-Phon
§ 49 (59)	82 Din-Phon	82 Din-Phon
§ 49 (66)	80 dB(A)	-
70/157/EWG	82 dB(A)	-
77/212/EWG	80 dB(A)	-
84/424/EWG	77 dB(A)	-
92/97/EWG	74 dB(A)	-
UN-Regelung Nr. 51.02	74 dB(A)	-

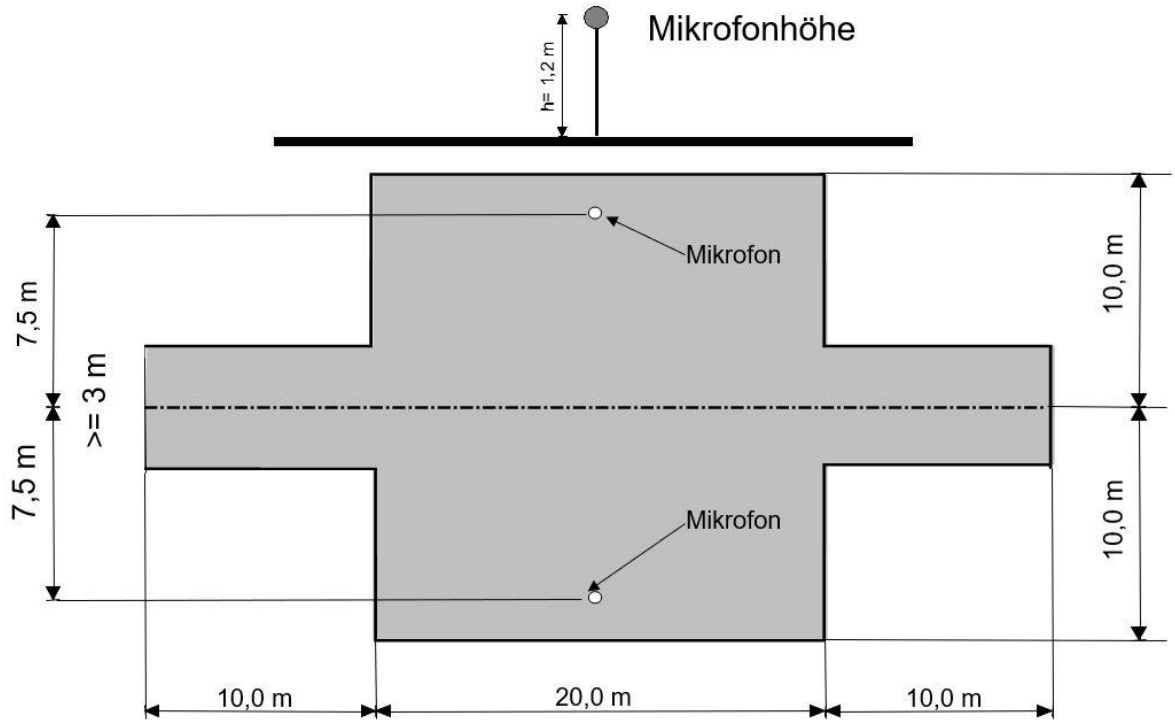
Quelle: eigene Darstellung, FAKT GmbH

Als Vorgänger zur aktuell gültigen UN-Regelung Nr. 51.03 bildete die UN-Regelung Nr. 51.02 für viele Jahre die Basis für Fahr- und Standgeräuschmessungen im Bereich der Vereinten Nationen. Sie spiegelt in weiten Teilen den Inhalt der Richtlinie 70/157/EWG wider, welche im Jahre 1970 erstmals europaweit Vorschriften für die Messung von Geräuschpegeln an Kraftfahrzeugen vereinheitlichte. Für eine regelkonforme Geräuschmessung müssen zahlreiche Messgrößen erfasst werden.

Messgeräte

- Präzisions-Schallpegelmesser der Klasse 1 gemäß IEC 61672-1:2002
- Schallpegelkalibrator der Klasse 1 gemäß IEC 60942:2003
- Drehzahlmessgerät (Genauigkeit ± 2 %)
- Geschwindigkeitsmessgerät (Genauigkeit ± 0,2 km/h)
- Temperaturmessgerät (Genauigkeit ± 1 °C)
- Windgeschwindigkeitsmessgerät (Genauigkeit ± 1.0 m/s)
- Barometer (Genauigkeit ± 5 hPa)
- Gerät zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit (Genauigkeit ± 5 %)
- Gerät zur Erfassung der Windrichtung

Abbildung 24: Maße des Geräuschmessfeldes

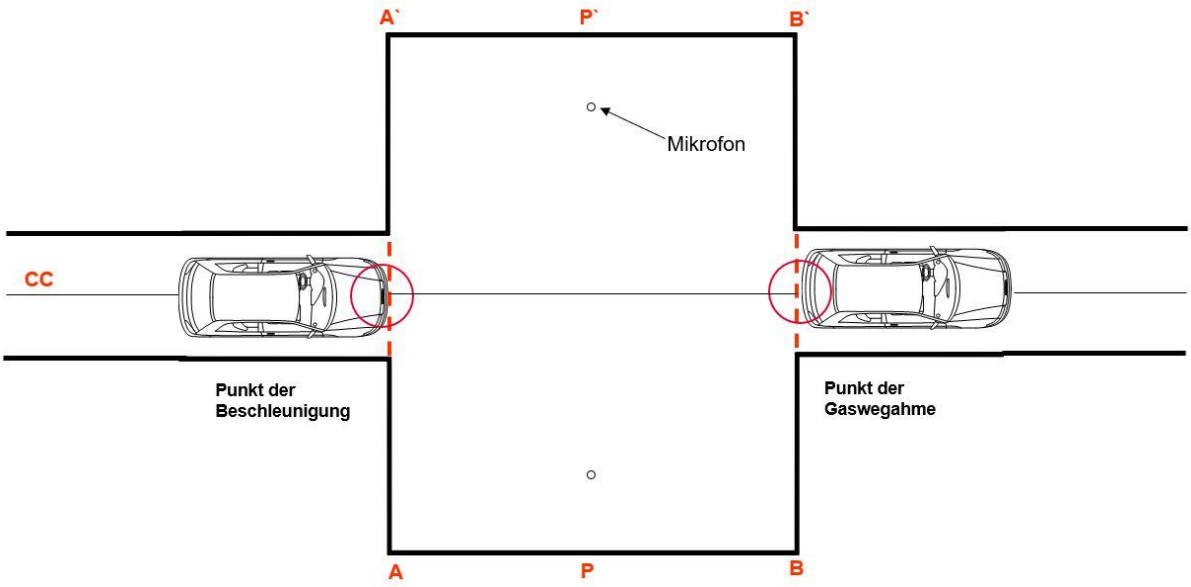


Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

Messungen dürfen ausschließlich auf einer genormten Messstrecke durchgeführt werden. Die DIN ISO 10844 gibt hierzu vor, wie der entsprechende Asphalt hinsichtlich Abmessungen, Schallabsorption und Struktur beschaffen sein muss, um für Geräuschmessungen geeignet zu sein. Eine Messung ist nur dann zulässig, wenn eine Reihe von Umgebungsbedingungen erfüllt sind. So muss eine Lufttemperatur zwischen 0 °C und 40 °C herrschen, während die Windgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Messung maximal 5 m/s betragen darf. Weiterhin ist vor und nach jeder Messung der Hintergrundpegel zu dokumentieren. Er muss mindestens 10 dB(A) geringer sein als die gemessenen Fahrgeräuschpegel. Messungen auf feuchtem Asphalt oder mit reflektierenden Gegenständen im unmittelbaren Umkreis des Messfelds sind unzulässig.

Abbildung 25 zeigt die relevanten Positionen des Fahrzeugs innerhalb des Messfelds. Die eigentliche Messung findet zwischen der Einfahrtslinie AA‘ und der Ausfahrtslinie BB‘ statt. Es müssen mindestens zwei Messungen mit beschleunigtem Fahrzeug pro Fahrzeugseite und Gang durchgeführt werden. Die Einfahrtgeschwindigkeit beträgt üblicherweise 50 km/h. Fahrzeuge mit vier oder weniger Gängen müssen in Gang 2 gemessen werden. Fahrzeuge, die mehr als vier Gänge haben, müssen in Gang 2 und Gang 3 gemessen werden. Zur Berechnung des Endergebnisses wird der Durchschnittswert der Messungen in Gang 2 und 3 gebildet. Außerdem wird von den gemessenen Geräuschpegeln grundsätzlich 1 dB(A) Messtoleranz abgezogen. Für besonders spurtstarke Fahrzeuge gilt zudem eine Sonderbedingung. Kann bei der Geräuschprüfung im dritten Gang eine Beschleunigung innerhalb des Messfelds auf über 61 km/h erreicht werden, so entfällt die Messung im zweiten Gang. Zudem erhöht sich der Grenzwert um 1 dB(A). Der Fahrgeräusch-Grenzwert für gewöhnliche PKW beträgt 74 dB(A), für Sportwagen 75 dB(A) in Folge des zuvor genannten Bonus.

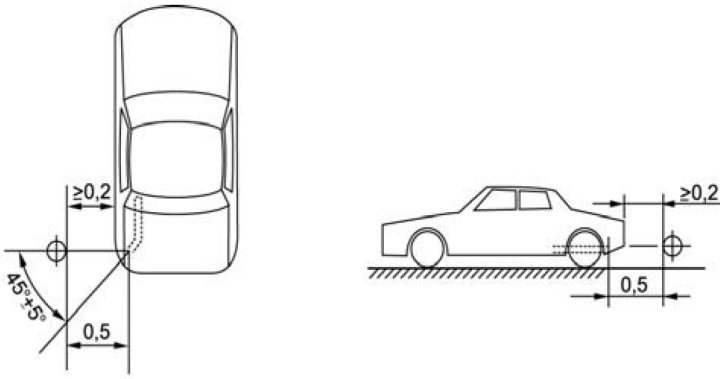
Abbildung 25: Charakteristische Linien im Geräuschmessfeld



Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

Anschließend ist eine Standgeräuschmessung durchzuführen. Hierzu wird das Mikrofon in einer Entfernung von 0,5 m ± 0,01 m vom Referenzpunkt am Auspuffendrohr in einem Winkel von 45° ± 5° positioniert. Die Höhe entspricht der Einbauhöhe der Endrohröffnung, wobei jedoch eine Mindesthöhe von 0,2 m über dem Boden einzuhalten ist. Die Zielmotordrehzahl für die Messung ist abhängig von der Nenndrehzahl des Fahrzeugs. Sie beträgt 75 % der Nenndrehzahl bei Fahrzeugen mit einer Nenndrehzahl bis einschließlich 5000 min^{-1}. Für Fahrzeuge mit einer Nenndrehzahl von über 5000 min^{-1} und unter 7500 min^{-1} beträgt sie 3750 min^{-1}. Fahrzeuge mit einer Nenndrehzahl von ab 7500 min^{-1} müssen bei 50 % ihrer Nenndrehzahl gemessen werden. Es gilt jeweils eine Toleranz von ± 5 % für die Prüfdrehzahl. Zur Messung wird die Drehzahl des Motors behutsam auf die Prüfdrehzahl gebracht und nach einer Sekunde schlagartig das Gaspedal in Ausgangsstellung gebracht. Insgesamt sind auf diese Weise drei Messungen durchzuführen, deren Durchschnittswert als maßgeblich zur Eintragung in die Fahrzeugpapiere gewertet wird. Ein Grenzwert gilt für Standgeräuschmessungen nicht. [29]

Abbildung 26: Mikrofonpositionierung für Standgeräuschmessung



Quelle: United Nations Regulation No. 51.02 [29]

5.2 Aktuelle Vorschriften

Nachfolgend werden die Regelungen UN-Regelung Nr. 51.03 und UN-Regelung Nr. 138 erläutert. Die UN-Regelung Nr. 51.03 beschäftigt sich mit der Genehmigung von Kraftfahrzeugen mit mindestens vier Rädern hinsichtlich ihrer Geräuschemission. Die UN-Regelung Nr. 138 erläutert einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung geräuscharmer Straßenfahrzeuge im Hinblick auf ihre verminderte Hörbarkeit. Es wird genau beschrieben, wie Messungen nach den jeweiligen Richtlinien durchzuführen sind. Die Darstellung beschränkt sich auf Fahrzeuge der Klasse M1, also PKW.

5.2.1 UN-Regelung Nr. 51.03

Im Einzelnen werden die Messungen in den Anhängen 3 und 7 (ASEP) der Regelung beschrieben.

Kraftfahrzeuge müssen zunächst nach Anhang 3 der Regelung gemessen werden. Dies beinhaltet beschleunigte und konstante Vorbeifahrten sowie Standgeräuschmessungen. Für das Fahrgeräusch von PKW gelten die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Grenzwerte. Für Nutzfahrzeuge gelten höhere Grenzwerte, welche hier jedoch nicht weiter betrachtet werden. Für das Standgeräusch existieren keine Grenzwerte. Es dient ausschließlich der Überprüfung von Fahrzeugen im Rahmen der regelmäßigen technischen Überwachung oder bei Verkehrskontrollen. Seit dem 01. Juli 2020 gelten für neue Typprüfungen von PKW die Grenzwerte nach Phase 2. Ab dem 01. Juli 2024 wird für diese Fahrzeuggruppen die Phase 3 in Kraft treten.

Tabelle 6: Grenzwerte Vorbeifahrt Kraftfahrzeuge

Fahrzeugklasse	Fahrzeuge für die Personenbeförderung	Grenzwerte [dB(A)]		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3
M1	PMR ≤ 120	72	70	68
	120 < PMR ≤ 160	73	71	69
	PMR > 160	75	73	71
	PMR > 200, Anzahl Sitzplätze ≤ 4, R-Punkt Höhe < 450mm vom Boden	75	74	72

Quelle: United Nations Regulation No. 51.03 [30]

Unter bestimmten Bedingungen werden Grenzwertzuschläge gewährt. So erhöht sich der Grenzwert um 1 dB(A) für Geländewagen der Klasse M1G mit zulässiger Gesamtmasse über 2 t. Für rollstuhlgerechte Fahrzeuge der Klasse M1 wird ein Zuschlag von 2 dB(A) gestattet. Gleiches gilt auch für gepanzerte Fahrzeuge.

Fahrzeuge müssen nach erfolgreicher Typgenehmigung außerdem einer Serienüberprüfung unterzogen werden. Dies wird durchgeführt, um sicherzustellen, dass auch die in Serie gefertigten Fahrzeuge die Grenzwerte einhalten. Der Hersteller muss diese Überprüfung einmal in zwei Jahren für das jeweilige typgenehmigte Fahrzeug durchführen lassen. Hierbei darf der jeweilige Grenzwert im Anhang 3 (siehe Tabelle 6) um maximal 1 dB(A) überschritten werden. Bei Serienüberprüfung nach Anhang 7 ist der Hersteller nicht verpflichtet, eine Messung durchzuführen. Er muss lediglich die Einhaltung des ASEP durch eine geeignete Methode, wie zum Beispiel eine Teileprüfung, nachweisen können.

Zur Messung müssen die gleichen Messdaten erfasst werden, wie bereits aus der UN-Regelung Nr. 51.02 bekannt. Auch die dort vorgegebenen Toleranzen bleiben unverändert. Für die Anforderungen an die Umgebungsbedingungen gilt folgendes:

Umweltbedingungen

- Umgebungsgeräuschpegel muss mindestens 10 dB(A) geringer sein, als der vom Fahrzeug emittierte Schallpegel (falls die Differenz zwischen 10 und 15 dB(A) beträgt, gibt es einen Korrekturfaktor gemäß Korrekturtabelle)
- Außentemperatur zwischen 5 °C und 40 °C (Messung unter 5 °C nur mit Herstellerfreigabe möglich)
- Windgeschwindigkeit ≤ 5 m/s

Das Messfeld bleibt in seiner Beschaffenheit wie auch in seinen charakteristischen Linien AA‘, PP‘, BB‘ und CC‘ ebenfalls bestehen. Die Linie AA‘ beschreibt die Einfahrtslinie und die Linie BB‘ die Ausfahrtslinie des Messfelds. Auf der PP‘-Linie ist rechts sowie links jeweils ein Mikrofon angebracht. Das Fahrzeug fährt mittig auf der CC‘-Linie. Sobald das Fahrzeug die Linie AA‘ überfährt, beginnt die Messung des Schallpegels und endet erst, wenn das Fahrzeugheck die Linie BB‘ + 20 m erreicht. Grund für diese Erweiterung des Messbereichs nach hinten ist der Wunsch nach einer Erfassung etwaiger „back-fire“-Geräusche. Dieses, zumeist künstliche, Geräusch von Fehlzündungen hat sich im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte bei Sportwagen zunehmend etabliert. Seit Inkrafttreten der Ergänzung 3 der Regelung im Oktober 2018 ist dieses auch mit in die Geräuschmessung aufzunehmen.

Vor jeder Messung ist der Fahrzeugbezugspunkt zu bestimmen. Hierfür ist die Motorposition entscheidend. Er ist entscheidend für den Punkt der Beschleunigung und den Messbeginn. Für ein Fahrzeug mit einem Frontmotor gilt der Bezugspunkt an der Front. Bei einem Mittelmotor befindet er sich in der Mitte des Fahrzeugs (l = ½ Fahrzeuglänge). Der Referenzpunkt für ein Fahrzeug mit Heckmotor befindet sich somit am Heck. Da insbesondere bei Elektrofahrzeugen häufig Motoren sowohl in der Front als auch im Heck des Fahrzeugs verbaut sind, gilt in diesen Fällen folgende Handhabe. Der Motor mit der größeren Nennleistung bestimmt den Referenzpunkt des Fahrzeugs.

Für die Messung nach Anhang 3 muss die Geschwindigkeit des Fahrzeugs an der Linie PP‘ 50 km/h ± 1 km/h betragen. An der Linie AA‘ muss das Gaspedal schnellstmöglich voll durchgedrückt werden. Eine zusätzliche Betätigung eines etwaigen „kickdown“-Widerstands am Ende des Gaspedalwegs ist jedoch nicht zulässig. Um eine stabile Beschleunigung innerhalb des

Messfelds zu gewährleisten, kann eine Vorbeschleunigung gewählt werden. Der Punkt der Gaspedalbetätigung wird hierbei um einige Meter vor die Linie AA‘ verlegt. Diese Maßnahme ist besonders bei turbogeladenen Motoren in aller Regel notwendig. Hier benötigt der Motor zunächst eine kurze Zeit, um den gewünschten Ladedruck aufzubauen. Sobald das Fahrzeugheck die BB‘-Linie erreicht, muss das Gaspedal schlagartig losgelassen werden. Es müssen mindestens vier beschleunigte sowie vier konstante Durchfahrten je Prüfgang durchgeführt werden. Je nach Beschleunigung der einzelnen Gänge kann es einen oder auch zwei Prüfgänge geben. Die Konstantfahrten werden im gleichen Gang wie in der beschleunigten Fahrt durchgeführt. Die Geschwindigkeit muss hierbei an den Linien AA‘, PP‘ und BB‘ bei 50 km/h ± 1 km/h liegen.

Um den zu prüfenden Gang für die beschleunigte Fahrt herauszufinden, müssen zunächst einige individuelle Größen berechnet werden. Der PMR beschreibt das Verhältnis zwischen Motorleistung und Leergewicht des jeweiligen Fahrzeugs. Anhand dieser Größe ergeben sich sowohl Grenzwerte als auch Ziel- und Referenzbeschleunigung. Grundsätzlich gilt: Je größer der PMR, desto höhere Werte ergeben sich auch für die prüfungs- und berechnungsrelevanten Größen a_{urban} und a_{wot_ref}.

Index des Leistungs-Masse-Verhältnisses:

$$PMR = \frac{P_N}{m_{ro}} * 1000\ \text{kg/kW}$$

Zielbeschleunigung:

$$a_{urban} = 0.63 * \log_{10}(PMR) - 0.09$$

Referenzbeschleunigung:

$$a_{wot_{ref}} = 1.59 * log_{10}(PMR) - 1.41 \qquad PMR \geq 25$$

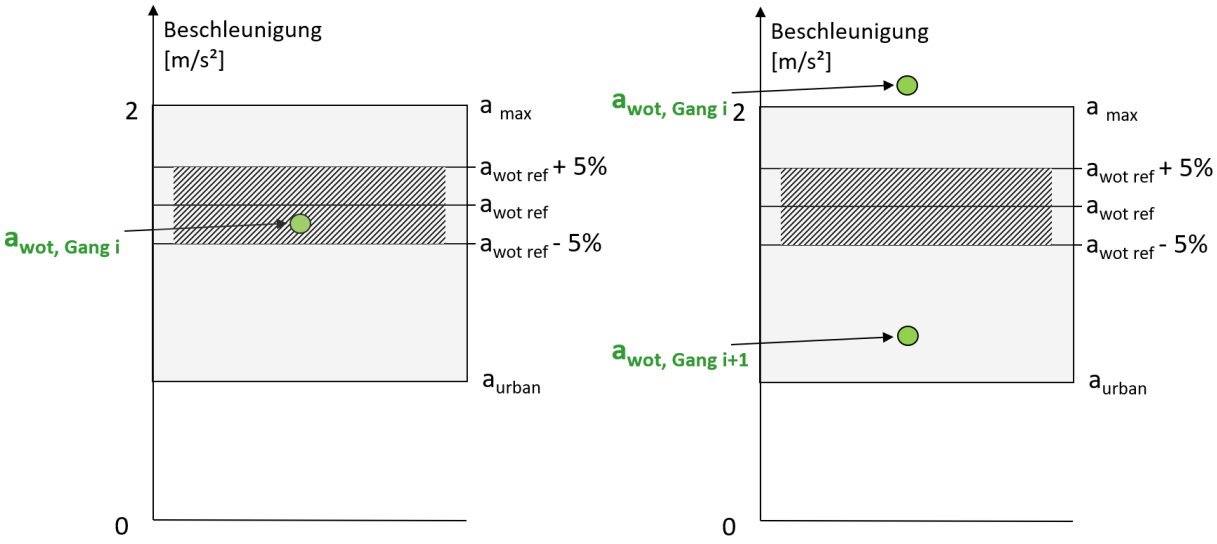
$$a_{wot_{ref}} = a_{urban} = 0.63 * log_{10}(PMR) - 0.09 \qquad PMR < 25$$

Das Ziel ist es, eine Beschleunigung in einem bestimmten Gang zu finden, die der ermittelten Referenzbeschleunigung entspricht oder möglichst nahekommt. Folgende Möglichkeiten bei der Wahl des Prüfgangs gibt es für manuelle Schaltungen und Automatikgetriebe mit gesperrten Gängen:

a) **Ein-Gang Messung Typ A:** Wenn mit einem Gang eine Beschleunigung im Bereich der Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} ± 5 % erreicht wird und die Beschleunigung nicht über 2 m/s² liegt, dann ist dieser Gang (i) als Prüfgang zu verwenden.

b) **Ein-Gang Messung Typ B:** Wenn kein Gang existiert, der eine Testbeschleunigung im Bereich der Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} ± 5 % oder darüber erreicht und dabei nicht über 2 m/s² beschleunigt, so ist der nächsthöhere Gang (i+1, ggf. i+n) als Prüfgang zu verwenden, der eine Beschleunigung unter 2 m/s² und unter a_{wot_ref} erreicht. Liegt die Beschleunigung dieses Prüfgangs nicht unter der Zielbeschleunigung a_{urban}, so ist der über 2 m/s² beschleunigende Gang (i) lediglich als „Zeugengang“ zu messen. Seine Ergebnisse sind jedoch nicht für die Kalkulation des Fahrgeräuschpegels heranzuziehen. Konstantfahrten im Zeugengang sind nicht notwendig.

Abbildung 27: Ein-Gang Messung Typ A und Typ B

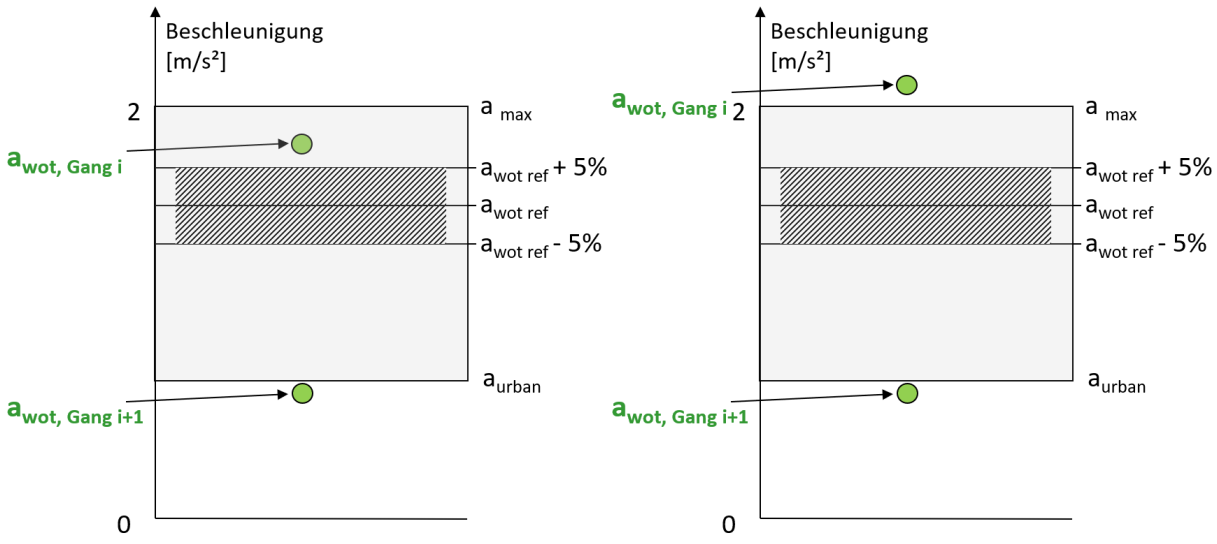


Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

c) **Zwei-Gang Messung Typ A:** Wenn kein Gang den Bereich der Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} ± 5 % erreicht, der nächstgeringere Gang (i) aber nicht über 2 m/s² beschleunigt, dann sind der nächsthöhere (i+1) sowie der nächstgeringere Gang (i) als Prüfgänge zu wählen:

d) **Zwei-Gang Messung Typ B:** Wenn kein Gang den Bereich der Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} ± 5 % erreicht, der nächstgeringere Gang (i) jedoch über 2 m/s² sowie der nächsthöhere Gang (i+1) unter a_{urban} beschleunigt, so sind ebenfalls beide als Prüfgänge zu verwenden.

Abbildung 28: Zwei-Gang Messung Typ A und Typ B



Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

Aus den durchgeführten Messfahrten wird das Fahrgeräusch L_{urban} errechnet. Dabei gehen Konstantfahrten und beschleunigte Fahrten jeweils anteilig in das Endergebnis ein. Die Größe des Anteils ergibt sich aus der durchschnittlichen Beschleunigung der beschleunigten Fahrten. Je größer die Differenz zwischen Zielbeschleunigung a_{urban} und Testbeschleunigung a_{wot_test}, desto größer ist der Anteil der Konstantfahrt-Pegel im Endergebnis. Die Gewichtung für eine Ein-Gang-Messung ergibt sich dann wie folgt:

$$\boldsymbol{L_{urban} = L_{wot_{rep}} - k_p * (L_{wot_{rep}} - L_{crs_{rep}})}$$

$$\text{mit: } k_p = 1 - \left(\frac{a_{urban}}{a_{wot_{test}}}\right)$$

Bei einer Zwei-Gang-Messung wird zudem die Beschleunigung der jeweiligen Gänge zueinander gewichtet. Je größer die Differenz zwischen Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} und Testbeschleunigung a_{wot_test} eines Gangs, desto geringer ist sein Anteil am Ergebnis. Für Zwei-Gang-Messungen ergibt sich somit:

$$\boldsymbol{L_{urban} = L_{wot_{rep}} - k_p * (L_{wot_{rep}} - L_{crs_{rep}})}$$

$$\text{mit: } L_{wot_{rep}} = L_{wot_{(i+1)}} + k * (L_{wot_{(i)}} - L_{wot_{(i+1)}})$$

$$L_{crs_{rep}} = L_{crs_{(i+1)}} + k * (L_{crs_{(i)}} - L_{crs_{(i+1)}})$$

$$k = \frac{a_{wot_{ref}} - a_{wot_{(i+1)}}}{a_{wot_{(i)}} - a_{wot_{(i+1)}}}$$

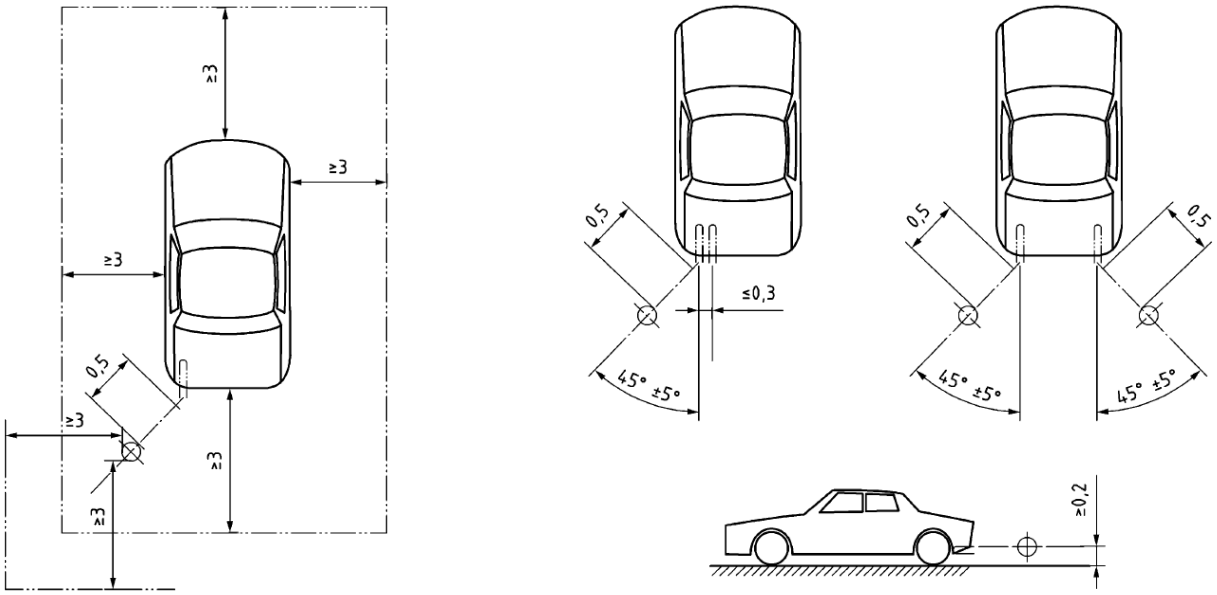
$$k_p = 1 - \left(\frac{a_{urban}}{a_{wot_{ref}}}\right)$$

Anschließend an die Fahrgeräuschmessung ist die zu Anhang 3 gehörige Standgeräuschmessung durchzuführen. Das Prozedere hierfür wurde seit der UN-Regelung Nr. 51.02 nicht nennenswert geändert. So ist die Prüfdrehzahl nach wie vor von der Nenndrehzahl des Motors abhängig.

a) 75 % der Motornenndrehzahl S für Fahrzeuge mit einer Motornenndrehzahl Drehzahl ≤ 5.000 min^{-1}
b) 3.750 min^{-1} für Fahrzeuge mit einer Motornenndrehzahl über 5.000 min^{-1} und unter 7.500 min^{-1}
c) 50 % der Motornenndrehzahl S bei Fahrzeugen mit einer Motornenndrehzahl Drehzahl ≥ 7.500 min^{-1}

Die Toleranz für das Halten der Prüfdrehzahl wurde auf ± 3 % verringert. Verfügt ein Fahrzeug über mehrere Auspuffendrohre mit einem Abstand von mehr als 30 cm, so sind separate Messungen für jedes Endrohr durchzuführen. Außerdem dürfen sich keine Personen im Umfeld von 3 m um das Messmikrofon sowie das Prüffahrzeug befinden. Die Haltezeit der Prüfdrehzahl beträgt mindestens 1 Sekunde. Die Messung endet, sobald die Drehzahl des Motors wieder bis auf Leerlaufdrehzahl abgefallen ist. Als Endergebnis gilt der Mittelwert aus drei Einzelmessungen.

Abbildung 29: Standgeräuschmessung bei mehreren Auspuffendrohren



Quelle: United Nations Regulation No. 51.03 [30]

Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor müssen zusätzlich den Anhang 7 der Regelung absolvieren. Unter bestimmten Bedingungen kann die Prüfung einzig für Nutzfahrzeuge entfallen. Die Messung nach Anhang 7 sollte auf derselben Teststrecke und unter den gleichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden, wie die Messung nach Anhang 3.

Das in diesem Abschnitt beschriebene ASEP ist eine Prüfung von Betriebsbedingungen des Fahrzeugs außerhalb der in Anhang 3 beschriebenen Bereiche. Es werden ausschließlich beschleunigte Fahrten unter Volllast durchgeführt, bei denen folgende Betriebsbedingungen einzuhalten sind:

ASEP Kontrollbereich	
► minimal zulässige Geschwindigkeit:	$v_{AA} \geq 20$ km/h
► Beschleunigung des Fahrzeugs:	$a_{wot} \leq 5$ m/s²
► maximal zulässige Motordrehzahl:	$n_{BB} \leq 2{,}0 * PMR^{-0{,}222} * S$
oder *(niedrigerer Wert ist zu verwenden)*:	$n_{BB} \leq 0{,}9 * S$
► maximal zulässige Geschwindigkeit:	$v_{BB} \leq 80$ km/h
oder *(alle Gänge außer erstem Prüfgang)*:	$v_{BB} \leq 70$ km/h

Innerhalb dieses Kontrollbereichs sind vier Prüfpunkte je Prüfgang anzufahren. Die Prüfpunkte sind gleichmäßig über den Prüfbereich verteilt und werden durch separate Formeln errechnet. Als Prüfgang gelten alle Gänge bis einschließlich des Ganges, der in Anhang 3 als Gang i ermittelt wurde *(Gang i = Gang, welcher eine Beschleunigung innerhalb des Toleranzbereichs der Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} oder höher aufweist)* und keine der oben genannten Kontrollbedingungen überschreitet.

Die Durchführung der beschleunigten Prüffahrten gleicht dem Anhang 3. Die Einfahrgeschwindigkeit ist durch den Prüfer so zu wählen, dass alle Bedingungen eingehalten und die errechneten Prüfpunkte mit einer Toleranz von ± 3 km/h erreicht werden.

Zusätzlich ist eine Referenz-Schallmessung (RSA) durchzuführen. Die zu wählende Einfahrtsgeschwindigkeit liegt bei 50 km/h ± 1 km/h. Wird hierbei jedoch die Ausfahrtsgeschwindigkeit von 61 km/h überschritten, dann ist die Einfahrtsgeschwindigkeit so zu wählen, dass die Ausfahrtsgeschwindigkeit 61 km/h ± 1 km/h erreicht. Für manuelle Getriebe und sperrbare Automatikgetriebe mit bis zu 5 Gängen ist die Messung in Gang 3 durchzuführen. Für Fahrzeuge mit mehr als 5 Gängen ist die Messung in Gang 4 durchzuführen. Falls die Beschleunigung bei der Prüffahrt 1,9 m/s² übersteigt, ist für die Messfahrt der nächsthöhere Gang zu wählen, der diese Beschleunigung nicht mehr überschreitet. [30]

Paragraf 6.2.3 der Regelung besagt weiterhin, dass Fahrzeuge, die gemäß Anhang 3 und 7 geprüft wurden, unter realen Fahrbedingungen nicht signifikant lauter sein dürfen. Zur Sicherstellung dieser Anforderung sind weitere Prüfbedingungen zu definieren. Eine Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission befasst sich momentan mit dieser Thematik und entwirft mögliche Formulierungen und Prüfbedingungen für anstehende Erweiterungen der bestehenden UN-Regelung Nr. 51.03.

5.2.2 Entwurf UN-Regelung Nr. 51.03 Ergänzung 9

In einem Entwurf der informellen Arbeitsgruppe „IWG ASEP“ wird aktuell ein etwaiger Inhalt eines Anhangs 9 der UN-Regelung Nr. 51.03 dargestellt. In dem hier beschriebenen RD-ASEP wurden Prüfbedingungen für eine Erweiterung der bestehenden ASEP Prüfprozedur festgelegt. So ist eine Ausweitung des Prüfbereichs auf folgende Grenzbedingungen angedacht.

Tabelle 7: Kontrollbereich RD-ASEP

Parameter	Minimum	Maximum
Geschwindigkeit v	> 0 km/h an Linie AA‘	100 km/h an Linie BB‘
Beschleunigung atest	0 m/s²	4 m/s²
Fahrleistung vBB*atest	0 m²/s³	35 m²/s³
Gangwahl	jeder Vorwärtsgang	
Fahrmodus	jeder Modus	
Drehzahl	nBB < 80 % der Nenndrehzahl	

Quelle: Vorschlag für Ergänzung 9 zu UN-Regelung Nr. 51.03 [31]

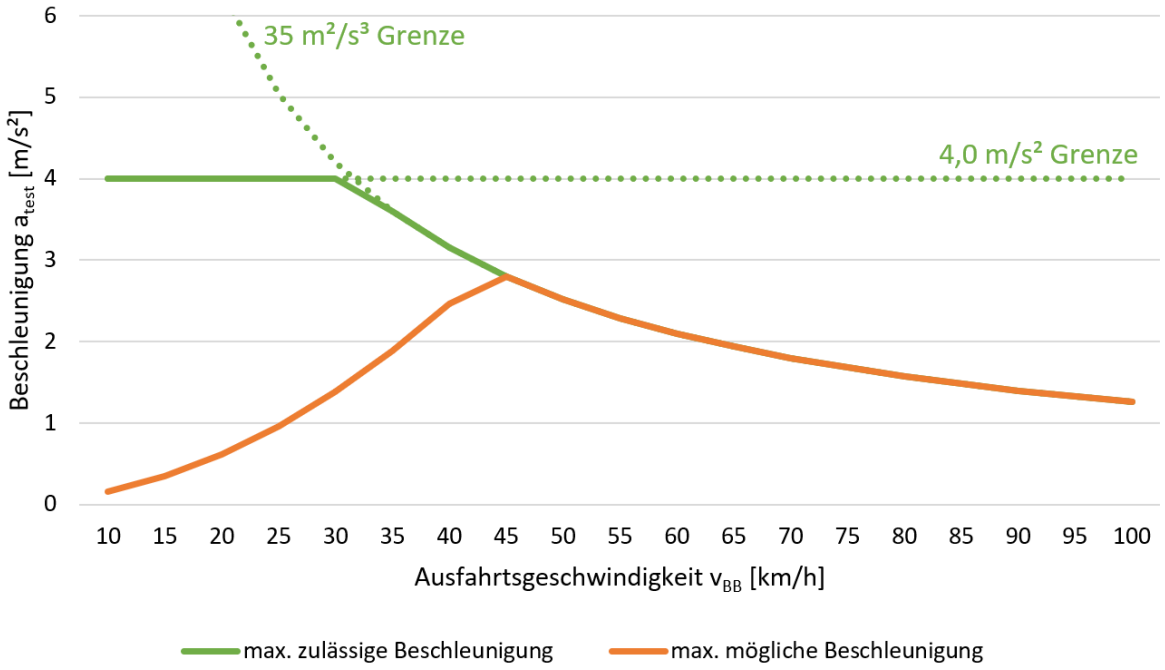
Insgesamt sind 15 Prüffahrten unter frei wählbaren Prüfbedingungen durchzuführen. Für Fahrzeuge mit Automatikgetriebe sind diese zudem in Fahrten mit gesperrten und nicht gesperrten Gängen aufzuteilen. Zur klaren Unterscheidung der Fahrten ist zudem der Grad der Gaspedalbetätigung in Abstufungen von 25 % anzugeben.

Im Gegensatz zu Anhang 7 der aktuell gültigen UN-Regelung Nr. 51.03 kann Anhang 9 der kommenden Regelung unter bestimmten Umständen auch Elektrofahrzeuge betreffen. Der Entwurf fordert hierzu, dass Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor von einer weiteren Geräuschprüfung nach Anhang 9 nur dann ausgeschlossen werden können, wenn der verbaute

Soundgenerator (AVAS) außerhalb des Messbereichs der UN-Regelung Nr. 138 nicht lauter ist als 66 dB(A) (Vergleichswert zu UN-Regelung Nr. 51 mit 7,5 m Mikrofonabstand) bzw. 75 dB(A) (Vergleichswert zu UN-Regelung Nr. 138 mit 2 m Mikrofonabstand) ist. Wie die Prüfung dieser Anforderung bzw. der Nachweis auszusehen hat, ist bisher nicht weiter erläutert.

Unklar scheint momentan auch die Angabe der maximalen Beschleunigung mit 4 m/s^2, da dieser Wert durch die gleichzeitige Begrenzung der Fahrleistung auf 35 m^2/s^3 überhaupt nicht erreicht werden kann. Die Berechnung der Fahrleistung ist definiert als Multiplikation der Geschwindigkeit an Linie BB‘ mit der Beschleunigung zwischen Linie PP‘ und Linie BB‘+Fahrzeuglänge. Abbildung 30 zeigt die technisch maximal mögliche Beschleunigung, wobei für Ausfahrtsgeschwindigkeiten bis 40 km/h bereits eine rein theoretische Einfahrtsgeschwindigkeit von 0 km/h herangezogen wurde. [31]

Abbildung 30: Grenzbedingungen RD-ASEP



Quelle: Eigene Darstellung, Fakt GmbH

Zur Kalkulation der Grenzwerte, wird ein sogenanntes „Sound Expectation Model“ herangezogen, bei dem unter Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem, Batterie- bzw. Wasserstoff-elektrischem sowie hybridischem Antrieb unterschieden wird. Weiterhin werden Reifenabrollgeräusche, Motorgeräusche und dynamische Geräusche differenziert. Die zulässigen Geräuschpegel ergeben sich in Abhängigkeit von Beschleunigung, Fahrleistung wie auch Drosselklappenstellung der jeweiligen Prüffahrt.

5.2.3 UN-Regelung Nr. 41.04

Die UN-Regelung Nr. 41.04 schreibt dieselben Bedingungen bezogen auf die Messinstrumente, Mikrofonpositionen, Wetterbedingungen, Teststrecke und Hintergrundgeräusche vor, wie die zuvor beschriebene UN-Regelung Nr. 51.03. Es sind ebenfalls Messungen nach Anhang 3 und Anhang 7 durchzuführen.

Im Anhang 3 sind beschleunigte und konstante Fahrten durchzuführen, sowie eine Standgeräuschmessung. Bei der Gangwahl für die beschleunigten Fahrten gibt es drei Möglichkeiten. Zunächst wird anhand des Leistungsgewichts (PMR) des spezifischen Kraftrads eine Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} errechnet. Gibt es zwei Gänge mit denen eine Beschleunigung innerhalb eines Toleranzbereichs von ± 10 % der Referenzbeschleunigung erreicht wird, ist der Gang zu wählen, der der Referenzbeschleunigung am nächsten liegt. Gibt es nur einen Gang, der eine Beschleunigung innerhalb dieses Toleranzbereichs erreicht, wird die Prüfung in diesem Gang absolviert. Gibt es keinen Gang, der eine Beschleunigung innerhalb des Toleranzbereichs erreicht, wird die Messung in dem Gang mit einer höheren Beschleunigung sowie in dem Gang mit einer niedrigeren Beschleunigung durchgeführt.

Die Standgeräuschmessung wird bei Krafträdern mit einer Nenndrehzahl bis maximal 5000 min^{-1} bei 75 % der Nenndrehzahl durchgeführt. Bei Krafträdern mit einer Nenndrehzahl von über 5000 min^{-1} wird bei 50 % der Nenndrehzahl gemessen. Wie bei der UN-Regelung Nr. 51, gelten auch hier keine Grenzwerte für das Standgeräusch.

Tabelle 8: Grenzwerte Vorbeifahrt Kraftrad

Kategorie	Leistungs-Masse-Verhältnis	Grenzwert für L_{urban} in dB(A)
erste Kategorie	PMR ≤ 25	73
zweite Kategorie	25 < PMR ≤ 50	74
dritte Kategorie	PMR > 50	77

Quelle: United Nations Regulation No. 41 [32]

Der Anhang 7 beschreibt das ASEP-Prozedere, welches bereits aus der Regelung für PKW bekannt ist. Es gilt nur für Krafträder der Kategorie L_3 mit einem PMR von mehr als 50. Der Prüfbereich für die durchzuführenden beschleunigten Geräuschmessungen mit vollständig geöffneter Drosselklappe wird hinsichtlich Geschwindigkeit und Drehzahl eingeschränkt. Die Einschränkungen unterscheiden sich jedoch in einigen Punkten von denen der UN-Regelung Nr. 51.03. So erfolgt beispielsweise keine Beschränkung der zulässigen Beschleunigung. Folgende Randbedingungen müssen bei allen Prüffahrten eingehalten werden:

ASEP Kontrollbereich

- minimal zulässige Geschwindigkeit: $v_{AA} \geq 20$ km/h
- maximal zulässige Geschwindigkeit: $v_{BB} \leq 80$ km/h
- minimal zulässige Beschleunigung: $n_{BB} \leq 0{,}85 * (S - n_{idle}) + n_{idle}$

  oder *(für PMR > 66)*: $n_{BB} \leq 3{,}4 * PMR^{-0{,}33} * (S - n_{idle}) + n_{idle}$

Es können bis zu zwei zusätzliche Prüfpunkte je Prüfgang innerhalb des Kontrollbereichs durch weitere beschleunigte Fahrten angefahren werden. Gemessen wird in den Gängen 2, 3 und 4, insofern sie die oben genannten Randbedingungen einhalten. Zu jeder Prüffahrt wird ein Grenzwert in Abhängigkeit der individuellen Ausfahrdrehzahl n_{BB} und dem Durchschnitt der Ausfahrdrehzahlen $n_{wot(i)}$ aus Anhang 3 berechnet. Die Berechnung unterscheidet sich deutlich von der ASEP-Grenzwertberechnung für Kraftfahrzeuge in der UN-Regelung Nr. 51.03. [32]

5.2.4 UN-Regelung Nr. 41.05

Die im November 2021 veröffentlichte Regelung UN-Regelung Nr. 41.05 beschreibt eine umfassende Änderung der Geräuschmessung. Die Anwendung dieser Regelung für die Genehmigung neuer Fahrzeugtypen ist ab dem 1. September 2024 verpflichtend. Zur Homologation von neuen Fahrzeugtypen kann die Regelung freiwillig jedoch schon ab dem 1. September 2023 angewendet werden. Die neue Regelung beschreibt ein RD-ASEP zur Erfassung realer Fahrgeräuschemissionen und erweitert den Kontrollbereich erheblich. So sinkt die minimale Geschwindigkeit von 20 km/h auf 10 km/h, während die Maximalgeschwindigkeit für Krafträder mit einem PMR über 150 (das betrifft Motorräder ab etwa 40 PS Motorleistung) von 80 km/h auf 100 km/h steigt. Die Bedingungen für Minimal- und Maximaldrehzahl werden nicht beziehungsweise nur minimal geändert. Ein erheblicher Unterschied ergibt sich bei der Gangwahl, da nun alle verfügbaren Gänge geprüft werden dürfen. Auch der Fahrmodus kann beliebig gewählt werden.

Weiterhin sind außer Volllastfahrten auch Teillast und Konstantfahrten möglich. Der Öffnungsgrad der Drosselklappe ist dabei für alle Fahrten zu dokumentieren. Eine Begrenzung der zulässigen Beschleunigung besteht im Gegensatz zum Entwurf des RD-ASEP für PKW nicht. (siehe 5.2.2) Tritt während der Prüffahrt Schlupf oder ein Abheben des Vorderrads auf, so ist eine geringere Prüfbeschleunigung in diesem Gang oder ein höherer Gang zu wählen. [33]

5.2.5 UN-Regelung Nr. 138

Die UN-Regelung Nr. 138 gilt für Elektrofahrzeuge der Klasse M und N, die in mindestens einem Modus oder Gang ohne Verbrennungsmotor betrieben werden können. Der Geräuschpegel des Fahrzeugs muss nach den Vorgaben des Anhangs 3 geprüft werden. Der Geschwindigkeitsbereich für die Messung liegt zwischen 3 km/h und 21 km/h.

Die Messung besteht aus Konstantfahrten, die vorwärts und rückwärts ausgeführt werden. Für die Konstantfahrten muss das Fahrzeug bei den Geschwindigkeiten vorwärts 5 km/h ± 2 km/h, 10 km/h ± 2 km/h, 15 km/h ± 1 km/h und 20 km/h ± 1 km/h, sowie rückwärts 6 km/h ± 2 km/h gemessen werden. Für jede Geschwindigkeitsstufe müssen vier Fahrten durchgeführt werden. Es gilt zunächst, die in Tabelle 9 aufgeführten Gesamtpegel einzuhalten. Weiterhin muss das Fahrzeug mit mindestens zwei 1/3 Oktavbändern die jeweiligen Minimalpegel erfüllen, wobei mindestens eine Frequenz unter 1600 Hz liegen muss.

Ist das Fahrzeug mit keinem AVAS-System ausgestattet, schafft es aber dennoch, die Minimalanforderungen der UN-Regelung Nr. 138 um mindestens 3 dB(A) zu übererfüllen, so muss das Fahrzeug die Bedingungen für die 1/3 Oktavbänder sowie die Frequenzverschiebung nicht erfüllen.

AVAS-Systeme müssen zudem eine Frequenzverschiebung aufweisen. Durch die Frequenzverschiebung soll sichergestellt werden, dass andere Verkehrsteilnehmer eine Änderung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs wahrnehmen können. Mindestens ein prägnanter Pegel muss seine Frequenz proportional zur Geschwindigkeit ändern. Im Geschwindigkeitsbereich von 5 km/h bis 20 km/h muss sich die Frequenz des Schallpegels bei der Vorwärtsfahrt um mindestens 0,8 % pro 1 km/h ändern. Der Maximalpegel des AVAS-Systems darf bei keiner Prüfgeschwindigkeit 75 dB(A) überschreiten. Die Serienüberprüfung des AVAS-Systems erfolgt einmal in zwei Jahren.

Tabelle 9: Minimum Pegel Anforderungen für AVAS

Frequenz in Hz		Konstantfahrt (10 km/h)	Konstantfahrt (20 km/h)	Rückwärtsfahrt
Gesamtpegel		**50**	**56**	**47**
1/3 Oktavbänder	160	45	50	
	200	44	49	
	250	43	48	
	315	44	49	
	400	45	50	
	500	45	50	
	630	46	51	
	800	46	51	
	1000	46	51	
	1250	46	51	
	1600	44	49	
	2000	42	47	
	2500	39	44	
	3150	36	41	
	4000	34	39	
	5000	31	36	

Quelle: United Nations Regulation No. 138 [34]

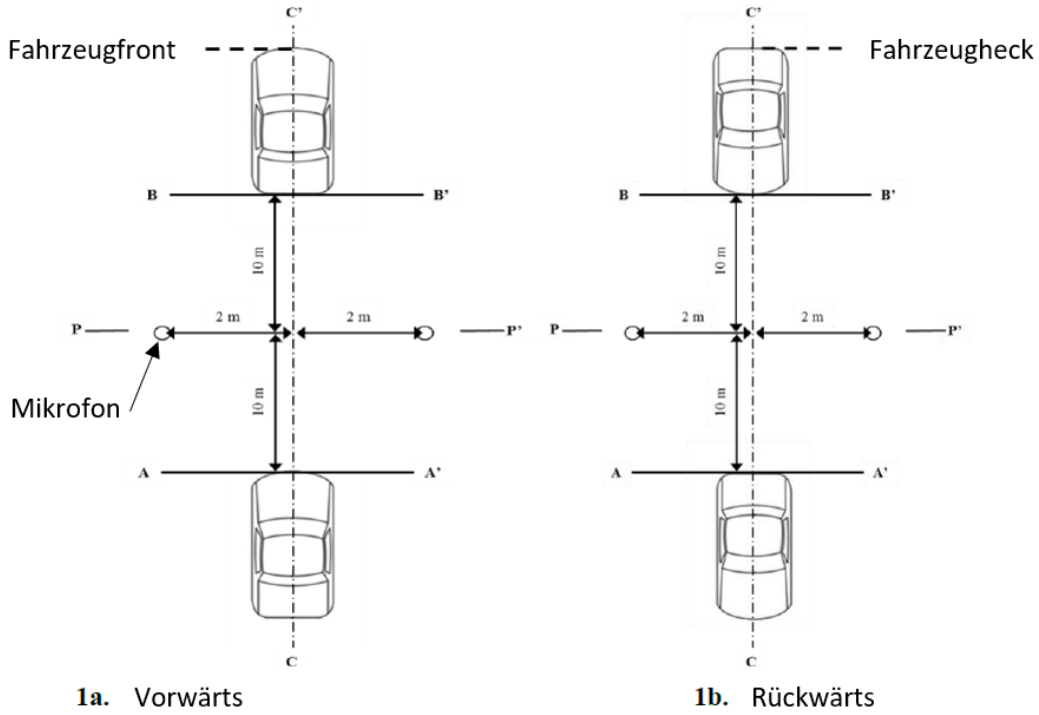
Die Anforderungen an benötigte Messgeräte und die Toleranzen der zu erfassenden Messgrößen sind identisch zu den bereits thematisierten Regelungen. Für die Prüfbedingungen gilt:

Umweltbedingungen

- Umgebungsgeräuschpegel muss mindestens 3 dB(A) geringer sein als der vom Fahrzeug emittierte Schallpegel. Ist die Differenz kleiner 10 dB(A) kann ein Korrekturfaktor angewendet werden, insofern der Abstand von Minimal- zu Maximalpegel der Hintergrundmessung nicht größer als 2 dB(A) ist.
- Außentemperatur zwischen 5 °C und 40 °C
- Windgeschwindigkeit ≤ 5 m/s

Die Messmikrofone sind in einem Abstand von 2 Metern links und rechts der CC‘-Linie sowie auf einer Höhe von 1,2 m ± 0,02 m positioniert.

Abbildung 31: Position des Fahrzeugs im Messfeld



Quelle: United Nations Regulation No. 138 [34]

Das Fahrzeug durchquert das Messfeld mittig auf der CC'-Linie. Nachdem das Fahrzeug die AA'-Linie überquert, wird die Messung ausgelöst und dauert an bis das Fahrzeug die Linie BB' überquert. Bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe ist die Gangstellung für normales Fahren auszuwählen. Bei Fahrzeugen mit einem manuellen Getriebe ist der höchste fahrbare Gang bei der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe zu wählen. [34]

5.3 Grauzonen

Der folgende Abschnitt der Forschungsarbeit behandelt mögliche Grauzonen in der UN-Regelung Nr. 51.03, die dazu führen können, dass besonders laute Fahrzeuge nicht erkannt werden. Es werden verschiedene Bereiche der Regelung aufgezeigt, die einen gewissen Spielraum für Hersteller von Klappenabgasanlagen und Fahrzeughersteller bieten. Des Weiteren wird die Regelung UN-Regelung Nr. 138 auf mögliche Grauzonen analysiert.

5.3.1 UN-Regelung Nr. 51.03

- Referenzpunkt bei Mittel- und Heckmotor-Fahrzeugen

  Da bei modernen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor der größte Teil der Schallemissionen über den Auspuff verursacht werden, ist der kritischste Bereich während der Messung des Vorbeifahrtgeräuschs, kurz nachdem die Endrohre die Mikrofone passieren. Besitzt ein Fahrzeug einen Referenzpunkt in der Fahrzeugmitte oder am Heck, so führt dies dazu, dass es an diesem Punkt im Messfeld erheblich langsamer ist als ein Fahrzeug mit dem

Referenzpunkt an der Front. Unabhängig von der Lage des Referenzpunktes wird die Beschleunigung in dem Moment beendet, in dem das Fahrzeugheck die Linie BB‘ überschreitet. Infolgedessen ist der Beschleunigungsweg bei Fahrzeugen mit Mittel- und Heckmotor um circa 2,5 m bis 5 m kürzer. Dies führt dazu, dass auch die maximale Geschwindigkeit sowie Drehzahl, die während der Messung erreicht werden, geringer sind. Diese ungleichen Bedingungen sorgen für eine Bevorzugung von Sportwagen.

- Anhang 3 – Gangwahl bei $a_{wot\_ref} > 2\ m/s^2$

  Für die beschleunigten Fahrten im Anhang 3 schreibt die Richtlinie eine Obergrenze von 2,0 m/s^2 vor. Das Fahrzeug darf im Prüfgang nicht stärker als diese Obergrenze beschleunigen. Ausnahmen bestehen nur bei einer Zweigang-Messung (siehe Abbildung 28). Fahrzeuge, deren Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} auf Grund eines besonders günstigen Leistungsgewichts PMR oberhalb dieser Grenze liegt, beschleunigen somit auch zwangsweise in Gang i über 2,0 m/s^2. Es kommt daher dazu, dass der Gang, welcher die Referenzbeschleunigung am besten repräsentiert dennoch nicht als Prüfgang herangezogen wird. Infolgedessen ergeben sich speziell bei sportlichen Fahrzeugen eher unrepräsentative Messungen mit praxisirrelevanten Beschleunigungen. OEMs sowie Aftermarket-Hersteller sind sich dieser Grenze bewusst und können problemlos ermitteln, in welchen Gängen ihr zu genehmigendes Fahrzeug über 2,0 m/s^2 beschleunigt. Eine entsprechende Ansteuerung von Akustikklappen kann dann zielgerichtet vorgenommen werden. So kann die Klappe im voraussichtlichen Prüfgang vollständig geschlossen werden, während in den nächstniedrigeren Gängen bereits eine teilweise Öffnung möglich ist. Einer solchen Vorgehensweise wird bei den Prüfungen nach Anhang 7 (ASEP) auch nur bedingt Einhalt geboten, da die Grenzwertkalkulation hier höhere Geräuschpegel erlaubt. In den für ein solches Fahrzeug üblichen innerstädtischen Gängen wäre ein derart ausgestattetes Fahrzeug demnach erheblich lauter als andere PKW im gleichen Gang oder Drehzahlbereich. In ausländischen Geräuschvorschriften wie z. B. der chinesischen GB1495-20xx (bisher nur Entwurfsfassung), welche an die UN-Regelung Nr. 51.03 angelehnt sind, kann man bereits eine Anhebung der Grenze auf 2,2 m/s^2 beobachten. Interessant ist auch der Vergleich zur aktuellen Regelung UN-Regelung Nr. 41.04 für Krafträder, bei der keine Obergrenze für die Beschleunigung existiert.

- Anhang 3 – Beschleunigungsbegrenzung durch Gaswegbegrenzung

  Bei der Auswahl der Gangkonstellation im Anhang 3 der Richtlinie kann es dazu kommen, dass das Fahrzeug selbst im höchsten bei 50 km/h fahrbaren Gang noch eine Beschleunigung über 2,0 m/s^2 hat. Gleiches trifft mangels schaltbarer Gänge auch für die meisten Elektrofahrzeuge zu. Die UN-Regelung Nr. 51.03 sieht für diese Fälle eine mechanische oder elektronische Begrenzung der Beschleunigung auf unter 2,0 m/s^2 vor. Die hierdurch zustande kommenden Teillastfahrten sind gewöhnlich erheblich leiser und widersprechen in gewisser Weise dem Ursprungsgedanken einer Prüfung mit vollständig geöffneter Drosselklappe („wide open throttle“).

  Auch bei dieser Sonderregel kann kritisiert werden, dass es zur Prüfung von praxisfernen Fahrsituationen kommt. Die Vergleichbarkeit mit ähnlichen Fahrzeugen sowie die Repräsentativität für das jeweilige Fahrzeug ist fragwürdig. Auch diese Grauzone kann gezielt durch den Einsatz einer entsprechenden Schaltstrategie (bei Automatikgetrieben) sowie durch Klappenabgasanlagen ausgenutzt werden. Ist einem Hersteller bewusst, dass sein Fahrzeug unter Volllast besonders laut ist, unter Teillast jedoch erheblich leiser, so kann

das Hochschalten des Automatikgetriebes in einen schwächer beschleunigenden Gang unterbunden werden. Die Folge wäre eine Teillastprüfung im nächstniedrigeren Gang. In Kombination mit Akustikklappen kann z. B. eine Implementierung mit geschlossenen Klappen bei Teillast und geöffneten Klappen bei Volllast im gleichen Gang erfolgen, ohne dass das Fahrzeug im Rahmen der beschleunigten Vorbeifahrt auffällig werden würde. Wie im zuvor beschriebenen Fall, wird in Anhang 7 (ASEP) zwar zusätzlich eine Prüfung mit Volllast durchgeführt, jedoch ergeben sich durch die Berechnungsmethode der Grenzwerte deutlich höhere zulässige Geräuschpegel als in Anhang 3. Dazu kommt, dass das genannte Phänomen üblicherweise bei besonders leistungsstarken Fahrzeugen mit einer Referenzbeschleunigung a_{wot_ref} von mehr als 2 m/s^2 auftritt. In einem solchen Fall würde die Prüfung nach Anhang 3 regulär beispielsweise in Gang 5 (Gang i+1) oder höher durchgeführt werden. Bei Ausnutzung der Grauzone würden begrenzte Fahrten in Gang 4 als Prüffahrten gewertet werden. Eine Prüfung von Gang 5 findet dann gar nicht statt, da auch in Anhang 7 nur bis einschließlich Gang 4 (Gang i) geprüft wird.

Abbildung 32: Mechanische und elektronische Gaswegbegrenzung

Quelle: Eigene Darstellung, Fakt GmbH

- Anhang 3 – Herunterschaltverhinderung bei nicht sperrbaren Gängen

  Bei Fahrzeugen mit nicht sperrbaren Gängen erlaubt die Regelung eine Verhinderung des Herunterschaltens in einen „nicht urbanen Gang“. Dies kann mittels elektronischer oder mechanischer Gaswegbegrenzung sowie durch die Wahl einer alternativen Position des Wählhebels geschehen. Kritisch hierbei ist, dass der Hersteller selbst definieren darf, welcher Gang „urban“ ist. Fahrzeuge, die im alltäglichen Fahrbetrieb beim Beschleunigen beispielsweise in den zweiten Gang zurückschalten, können durch diese Formulierung im dritten oder vierten Gang gemessen werden. Es wird somit kein realistisches Geräuschverhalten des Fahrzeugs abgebildet.

- Anhang 3 – Standgeräuschmessung ohne Motorstart

  Voraussetzung für eine zulässige Standgeräuschmessung ist ein betriebswarmer Motor. Hersteller nutzen diese Bedingung daher gern, um die Akustikklappen beim Motorstart sowie während der Warmlaufphase des Motors vollständig zu öffnen. Infolgedessen kommt es bei einigen Fahrzeugen zu einem besonders lauten Startgeräusch, durch das beispielsweise Anwohner und Passanten erheblich belästigt werden. Nach einigen Minuten wird die Akustikklappe dann automatisch geschlossen.

- Anhang 3 und 7 – Volllastfahrten

  Da sowohl in Anhang 3 als auch 7, außer im zuvor beschriebenen Fall mit Gasweg-begrenzung, ausschließlich Fahrten mit vollständig geöffneter Drosselklappe („wide-open-throttle“) durchgeführt werden, ist es für Hersteller einfach die Akustikklappen gezielt für diese Lastsituation zu schließen. Üblicherweise beschleunigen Fahrzeuge im urbanen Bereich allerdings meist bei Teillast, also mit nicht vollständig geöffneter Drosselklappe. Im Falle einer geöffneten Akustikklappe bei Teillast kann dies dazu führen, dass Fahrzeuge bei normaler Nutzung erheblich lauter sind als unter Volllast. Hersteller können dieses Schlupfloch daher nutzen, um unverhältnismäßig laute Fahrzeuge in den Straßenverkehr zu bringen. In einer zukünftigen Fassung der Regelung wird diesem Problem bereits begegnet. Hierbei werden Teillastfahrten in verschiedenen Gängen gefordert und das Schlupfloch so zumindest teilweise, durch die dort vorgesehene Beschränkung der Fahrleistung auf 35 m^2/s^3 jedoch nicht vollständig, geschlossen. (siehe Abbildung 30)

- Anhang 7 – Beschleunigungsbegrenzung

  In vielen Fällen wird der erste und teilweise der zweite Gang eines Fahrzeugs nicht geprüft, da dieser die Beschleunigungsgrenze von 5 m/s^2 überschreitet. Fahrzeuge mit Akustikklappen können daher in diesen Gängen legal beliebig laut sein. Da diese Gänge zumindest im Teillastbereich im urbanen Umfeld jedoch häufig verwendet werden, kann es zu einer unnötigen Lärmbelästigung kommen, wenn Klappensteuerungen entsprechend ausgelegt werden. Auch hier ist der Blick zur Regelung für Krafträder interessant. Dort unterliegt die Beschleunigung für ASEP-Fahrten keiner Begrenzung. Zwar eröffnet das kommende RD-ASEP im zukünftigen Anhang 9 der Regelung die Möglichkeit, Teillastfahrten in allen Gängen durchzuführen, jedoch sind diese durch die Beschränkungen der Fahrleistung auf 35 m^2/s^3 (siehe Abbildung 30) nicht mit entsprechenden ASEP-Fahrten in niedrigen Gängen vergleichbar.

- Anhang 7 – kein ASEP für e-Fahrzeuge

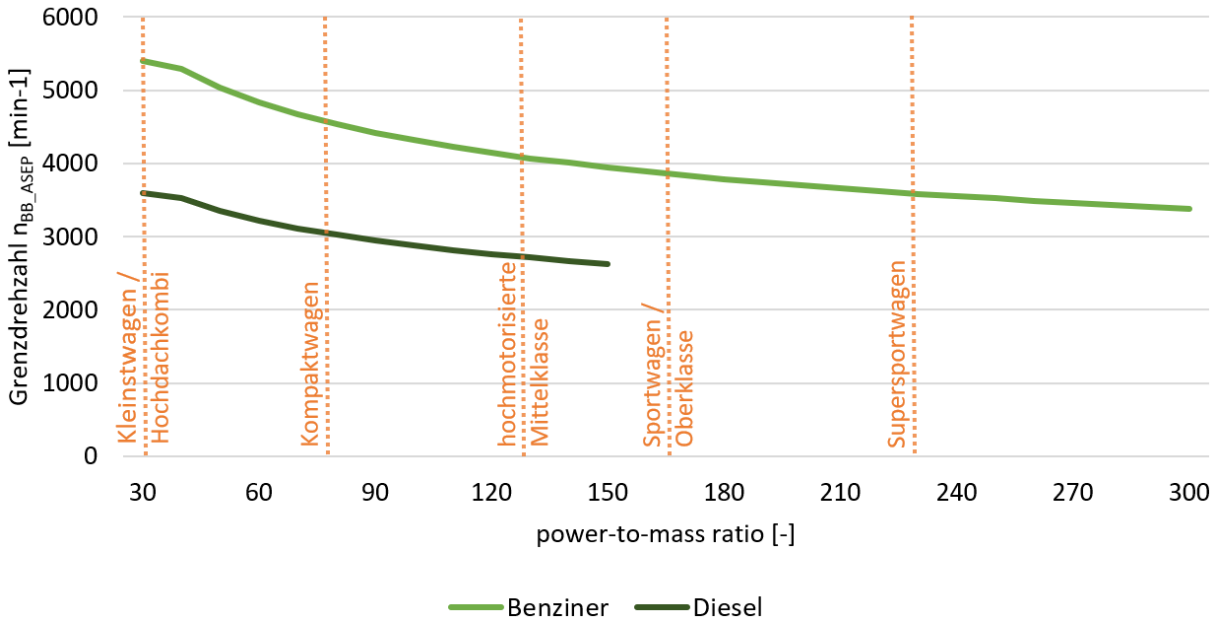
  Entsprechend der Regelung sind Geräuschmessungen gemäß Anhang 7 (ASEP) ausschließlich für Fahrzeuge mit herkömmlichen Verbrennungsmotor vorgeschrieben. Da der Einsatz von Soundaktuatoren im Bereich elektrischer Fahrzeuge sukzessive zunimmt und besonders bei sportlichen Kfz der Wunsch nach einem auffälligen Klangbild existiert, ist eine Ausnutzung dieser Grauzone zu erwarten. Hierbei kann die Klangkulisse außerhalb des Anhang 3 – Prüfbereichs momentan beliebig laut gestaltet werden. In Anhang 9 (RD-ASEP) einer zukünftig erscheinenden Erweiterung der Regelung wird diesem Problem begegnet. Hierzu wird gefordert, dass Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor von einer weiteren Geräuschprüfung nach Anhang 9 nur unter bestimmten Bedingungen ausgeschlossen sind. (siehe 5.2.2)

- Anhang 7 – $n_{BB\text{-}ASEP}$ Grenze

  Die maximal zulässige Prüfdrehzahl für Geräuschmessungen nach Anhang 7 beträgt grundsätzlich maximal 90 % der Nenndrehzahl. Mit steigendem PMR sinkt diese Drehzahl weiter. So beträgt die Grenze beispielsweise für ein Kompaktklasse-Fahrzeug mit Einstiegsmotorisierung 83 %, für einen hoch motorisierten Sportwagen bereits nur noch 57 % der Nenndrehzahl. Dies führt einerseits zu einer Ungleichbehandlung der Leistungsklassen, da bei Sportwagen und sportlichen Fahrzeugen nur weniger kritische Drehzahlen abgeprüft werden. Dazu kommt, dass durch die Aufladung von Motoren per Turbolader teilweise Nenndrehzahlen weit unterhalb der maximal möglichen Motordrehzahlen realisierbar sind. Der abgeprüfte Drehzahlbereich kann auf diese Weise schnell nur noch unter 50 % des zur Verfügung stehenden Drehzahlbereichs abdecken. Darüber hinaus hat die sinkende Grenze zur Folge, dass niedrige Gänge durch Überschreitung bei der Prüfung eher entfallen und ASEP bei derartigen Fahrzeugen nur noch in höheren Gängen absolviert werden muss. So ergibt sich eine weitere Grauzone, in der Fahrzeuge beliebig laut gestaltet werden können, ohne dass dies durch Geräuschmessungen erfasst wird.

  Zur Veranschaulichung zeigt das nachfolgende Diagramm den Verlauf der maximal zulässigen Drehzahl über dem Leistungsgewicht am Beispiel eines Benzinmotors mit einer Nenndrehzahl von 6000 min^{-1} und eines Dieselmotors mit einer Nenndrehzahl von 4000 min^{-1}.

Abbildung 33: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit des PMR



Quelle: Eigene Darstellung, Fakt GmbH

- Anhang 9 (Entwurfsfassung) – Fahrleistungsbegrenzung

  Im aktuellen Entwurf der Ergänzung 9 zur UN-Regelung Nr. 51.03 wird der Kontrollbereich für die durchzuführenden Prüffahrten auf eine maximal zulässige Fahrleistung von 35 m^2/s^3 begrenzt. In der Praxis hat dies zur Folge, dass keine Beschleunigungen oberhalb 2,8 m/s^2 erreicht werden können (siehe Abbildung 30). Obwohl das Prüfprozedere RD-ASEP als Erweiterung der bestehenden ASEP-Prüfung angedacht ist, kann durch diese Beschränkung nur ein kleiner Teil der realen Fahrgeräuschemissionen abgedeckt werden.

- Anhang 6 (conformity of production) – kein Grenzwert für Standgeräuschmessung

  Der Anhang 6 der Richtlinie regelt das Verfahren zur Serienüberprüfung. Es werden allerdings ausschließlich Vorgaben für die Durchführung und Bewertung von Fahrgeräuschmessungen gemacht. Eine Serienüberprüfung kann positiv abgeschlossen werden, wenn das zu prüfende Fahrzeug als Ergebnis der Fahrgeräuschmessung nach Anhang 3 einen Wert von höchstens 1 dB(A) über dem zum Zeitpunkt der Typprüfung gültigen Grenzwert erreicht. Für das Standgeräusch hingegen existiert keine Begrenzung. So kann ein Fahrzeug, dessen typgenehmigtes Standgeräusch beispielsweise 75 dB(A) beträgt, bedingt durch unzureichende oder nachlassende Qualität in der Serienproduktion, ohne weiteres einen Standgeräuschwert von 82 dB(A) in der CoP-Prüfung erreichen, ohne dass dies zu einer Beanstandung führen würde. Problematisch hierbei ist jedoch, dass bei einer Verkehrskontrolle eine maximal zulässige Abweichung von 5 dB(A) zum Typprüfwert gewährt wird. Ein Serienfahrzeug, welches bei der CoP-Messung noch völlig legal war, würde durch die Ordnungsbehörden zeitgleich als manipuliert deklariert und gegebenenfalls sogar stillgelegt oder sichergestellt werden. Es gilt zudem zu Bedenken, dass eine Abgasanlage im Vorfeld einer Typprüfung bereits über eine Fahrleistung von mindestens 10.000 km konditioniert wurde, während dies bei der Serienüberprüfung naturgemäß nicht der Fall ist. Besonders bei Absorptionsschalldämpfern unter Einsatz von Faserwerkstoffen ist daher grundsätzlich eine nachträgliche Erhöhung der Geräusche mit steigender Laufleistung zu erwarten.

5.3.2 UN-Regelung Nr. 138

- Eingeschränkter Geschwindigkeitsbereich

  Die UN-Regelung Nr. 138 beschränkt den Geschwindigkeitsbereich der Prüfung auf 3 km/h bis 21 km/h, während in der UN-Regelung Nr. 51.03 gleichzeitig kein ASEP für Elektrofahrzeuge gefordert wird. Infolgedessen kann nicht sichergestellt werden, dass mit entsprechenden Soundaktuatoren ausgestattete Elektrofahrzeuge im Geschwindigkeitsbereich zwischen 21 km/h und ca. 43 km/h sowie über ca. 60 km/h nicht erheblich lautere Geräusche emittieren, als durch die jeweiligen Grenzwerte zulässig. Weiterhin wäre eine Überschreitung der Grenzwerte beim Beschleunigen auch unterhalb 21 km/h denkbar, da die Prüffahrten zur UN-Regelung Nr. 138 grundsätzlich als Konstantfahrten ausgeführt werden. Entsprechende Beispielfahrzeuge konnten im Rahmen der Bearbeitungszeit dieser Arbeit allerdings nicht aufgetan werden.

  Im Gegensatz dazu bestand außerdem die Annahme, Elektrofahrzeuge könnten bei Geschwindigkeiten oberhalb 21 km/h nicht ausreichend wahrnehmbar sein, da viele AVAS-Systeme dort nicht mehr aktiv sind. Anhand einer beispielhaften Vergleichsmessung zwischen einem mit AVAS ausgestatteten Elektrofahrzeug und einem vergleichbaren mit Verbrennungsmotor ausgestatteten Fahrzeug konnte dies jedoch nicht bestätigt werden. Zu

erwähnen ist hierbei jedoch, dass es sich bei den Vergleichsfahrzeugen um SUV mit sehr breiten Reifen handelte. Bei e-Fahrzeugen mit schmaleren und infolgedessen besonders Rollgeräusch-armen Reifen bleibt dieser Fall jedoch weiterhin annehmbar. Gerade in Hinblick auf die Entwicklung immer leiser werdender Reifen in der Zukunft, bedarf es zu diesem Thema gegebenenfalls weiterführender Untersuchungen.

5.4 Verbesserungsmöglichkeiten

5.4.1 UN-Regelung Nr. 51.03

- Gleichbehandlung von Front-, Mittel- und Heckmotor-Fahrzeugen

  Bei beschleunigten Prüffahrten wird der Hauptanteil des Fahrgeräuschs bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren durch die Auspuffmündungen emittiert und nur ein geringer Teil über mechanische Geräusche des Antriebs selbst. Eine Abschaffung der Referenzpunkt-Regelung würde somit zu einer verminderten Bevorteilung von Sportwagen führen. Da diese Regelung auch bei Elektrofahrzeugen mit mehreren Motoren oder Heckmotoren Anwendung findet, erscheint das Verfahren für diese Fahrzeugkategorie besonders ungeeignet. Bei dieser Fahrzeugkategorie ist das Fahrgeräusch fast ausschließlich durch Reifenrollgeräusche geprägt.

- Anhang 3 – Aufhebung der Beschleunigungsgrenze

  Die Regelung sieht die Berechnung einer für das jeweils zu prüfende Fahrzeug typischen Referenzbeschleunigung vor. Nach dem Vorbild der UN-Regelung Nr. 41.04 für Krafträder könnte auch für PKW die im Anhang 3 der Richtlinie festgelegte Beschleunigungsbegrenzung von 2 m/s^2 aufgehoben werden. Die sich so ergebenden Prüfgangkonstellationen zur Erreichung der Referenzbeschleunigung würden das Fahrgeräusch des Fahrzeugs unter realen Fahrbedingungen besser widerspiegeln.

- Anhang 3 – Aufhebung der Herunterschaltverhinderung und Gaswegbegrenzung

  Eine mit Herunterschaltverhinderung durchgeführte Geräuschprüfung spiegelt keine reale Fahrbedingungen im Straßenverkehr wider. Ist die Schaltstrategie eines Fahrzeugs derart ausgelegt, dass es bei starker Beschleunigung beispielsweise in den zweiten Gang herunterschaltet, so ist dieses Fahrverhalten auch im urbanen Nutzungsbereich zu erwarten. Es wäre daher zielführend, das reale Fahr- bzw. Schaltverhalten des Fahrzeugs auch tatsächlich abzuprüfen. Die Definition beispielsweise des zweiten Gangs als „nicht urbanen Gang“ erscheint abwegig, da gerade dieser Gang im urbanen Umfeld besonders häufig zur Anwendung kommt.

  Gleichermaßen sollten Prüfungen unter Teillast in diesem Teilbereich der Prüfung entfallen, wenn bei einem Fahrzeug kein bei 50 km/h fahrbarer Gang unter 2 m/s^2 beschleunigt. Die Anforderung, beschleunigte Fahrten bei vollständig geöffneter Drosselklappe durchzuführen, sollte uneingeschränkt für alle Fahrzeugtypen gelten. Auch hier kann die Regelung für Krafträder als Vorbild dienen.

- Anhang 3 – Einführung Standgeräuschgrenzwert

  Das Fehlen eines Grenzwertes für Standgeräuschmessungen führt im Falle von Klappenabgasanlagen in der Regel dazu, dass Hersteller die Klappen gezielt im Stand öffnen, um ein prägnantes Motorengeräusch zu erzeugen. Die daraus resultierende und gleichzeitig vermeidbare Belästigung von Passanten und Anwohnern könnte durch die Einführung eines Grenzwerts, wie er bereits in anderen Ländern üblich ist, oder auch durch ein Verbot des Öffnens von Akustikklappen im Stand unterbunden werden.

- Anhang 7 – Einführung von Teilllastfahrten

  Um zu verhindern, dass einzelne Gänge auf Grund der Überschreitung der zulässigen n_{BB_ASEP}-Drehzahl gänzlich ungeprüft bleiben, erscheint eine Prüfung unter Teillast sinnvoll. Besonders kurz übersetzte Gänge könnten so gezielt mit einer Beschleunigung unterhalb 5 m/s^2 sowie einer Ausfahrtdrehzahl unterhalb von n_{BB_ASEP} geprüft werden. Mit Inkrafttreten von Ergänzung 9 der Regelung und infolgedessen RD-ASEP, könnte diesem Kritikpunkt bereits Sorge getragen werden. Jedoch sind hier voraussichtlich keine Beschleunigungen bis 5 m/s^2 zulässig. (siehe Punkt „Anhang 9 – Aufhebung der Fahrleistungsbegrenzung“)

- Anhang 7 – ASEP auch für e-Fahrzeuge

  Zur Vermeidung unnötig lauter Soundaktuatoren an Elektrofahrzeugen, sollte ASEP auch für diese Fahrzeugkategorie zumindest dann verpflichtend sein, wenn die verbauten Aktuatoren nachweislich oberhalb von 21 km/h aktiv sind. Auch diese Forderung kann sich gegebenenfalls mit der kommenden Einführung des RD-ASEP erübrigen.

- Anhang 7 – Anhebung von n_{BB_ASEP}

  Um sicher zu stellen, dass Akustikklappen oberhalb von n_{BB_ASEP} nicht beliebig geöffnet werden, wäre eine Anhebung der maximal zulässigen Prüfdrehzahl zweckmäßig. Eine generelle Prüfung bis zur Nenndrehzahl des jeweiligen Fahrzeugs wäre hierbei denkbar.

- Anhang 9 (Entwurfsfassung) – Aufhebung der Fahrleistungsbegrenzung

  Die Begrenzung der Fahrleistung auf 35 m^2/s^3 im Entwurf für das kommende RD-ASEP resultiert in verhältnismäßig geringe Beschleunigungen während der Prüffahrten. So können nur im Geschwindigkeitsbereich von ca. 35 km/h bis ca. 60 km/h überhaupt Beschleunigungen über 2 m/s^2 erreicht werden. Bei typischen Landstraßen-Geschwindigkeiten sind es bereits nur noch unter 1,5 m/s^2. Eine tatsächliche Erweiterung des bestehenden ASEP-Prüfbereichs ist somit nur bedingt gegeben. Wünschenswert wäre hier eine Anhebung der zulässigen Beschleunigung, auf die in der aktuellen Regelung bewährten 5 m/s^2.

- Allgemein – Prüfung mit vollständig geöffneter Akustikklappe

  Die Regelungen zur Reglementierung von Fahrgeräuschen zielen primär auf den Schutz von Anwohnern ab. Bei Betrachtung der momentanen Fassungen dieser Regelungen fällt jedoch auf, dass dieser Schutz fast ausschließlich Stadtbewohnern gilt. Mit der Ergänzung der Regelung hinsichtlich RD-ASEP erweitert sich dieser Schutzbereich auch auf Anwohner in unmittelbarer Umgebung von Land- und Bundesstraßen. Da aber auch Bewohner in der Nähe von Autobahnen und Kraftfahrtstraßen erheblichen Lärmbelastungen ausgesetzt sind, wäre für diese eine ebenso große Schutzwirkung wünschenswert. Für Geschwindigkeiten jenseits 100 km/h gelten derzeit und auch zukünftig keinerlei Geräuschbegrenzungen. Geräuschmessungen mit derart hohen Geschwindigkeiten sind wiederum schwer realisierbar und kaum praktikabel.

  Ein möglicher Ansatz könnte dabei sein, Akustikklappen bereits im bestehenden Prüfbereich auch in vollständig geöffneter Stellung auf ihre Geräuschemissionen zu prüfen. Ist hierbei keine Überschreitung der Grenzwerte festzustellen, so ist auch bei jeder höheren Geschwindigkeit kein signifikant lauterer Pegel zu erwarten. Die Umsetzung einer solchen Prüfung könnte auf verschiedene Weisen geschehen. Bei Fahrzeugen, deren Akustikklappe im sportlichsten Fahrmodus bereits dauerhaft vollständig geöffnet ist, wären keine zusätzlichen Prüfungen notwendig. Für Fahrzeuge, bei denen die Akustikklappe nur außerhalb der Prüfbereiche von Anhang 3 und 7 vollständig öffnet, wäre ein spezieller Prüfmodus ähnlich dem Rollenmodus für Rollenprüfstands-messungen denkbar.

- Allgemein – Einführung eines Korrekturfaktors Reifenabrollgeräusche

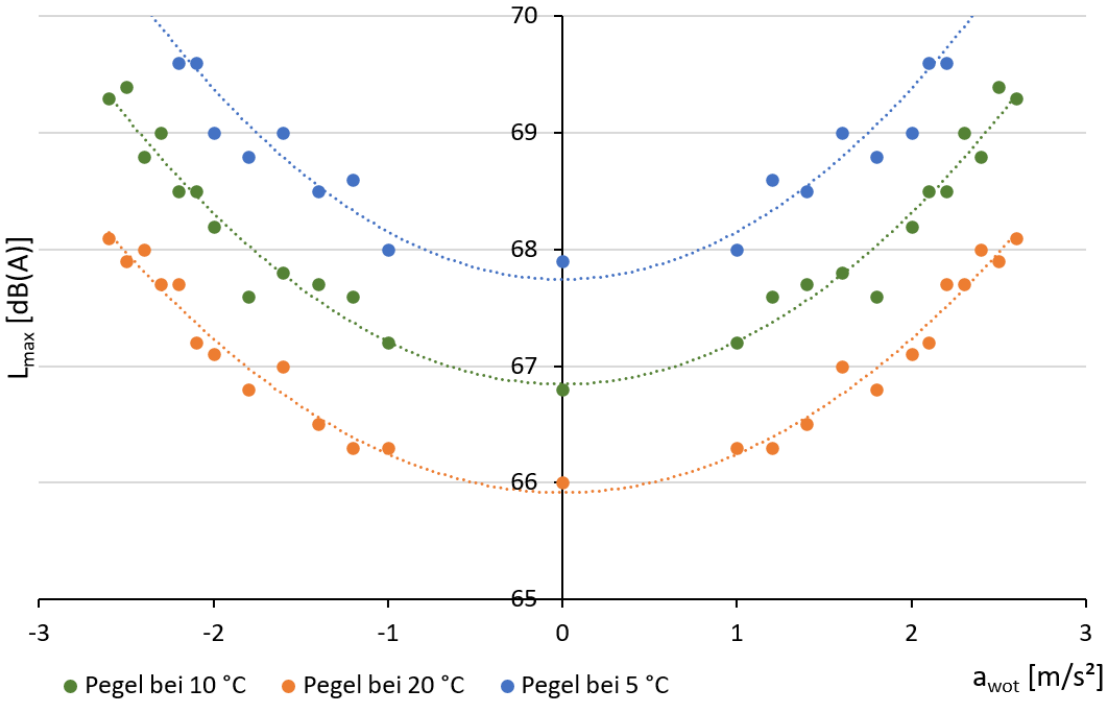
  Das Fahrgeräusch L_{urban} ist grundsätzlich vom Pegel der Reifenabrollgeräusche abhängig. Dies betrifft die Konstantfahrten besonders stark, aber auch bei beschleunigten Fahrten ist ein nennenswerter Einfluss erkennbar. Auf Grund der Beschaffenheit von Reifen ist das Abrollgeräusch sehr stark temperaturabhängig. Bei einer Messung von Konstantfahrten bei 5 °C kann sich so durchaus ein Pegelunterschied von über 3 dB(A) im Vergleich zu einer Messung mit über 25 °C Umgebungstemperatur ergeben. Infolgedessen kann es dazu kommen, dass motorseitig völlig lautlose Fahrzeuge, wie zum Beispiel e-Autos, einzig wegen des Abrollgeräuschs die Geräuschprüfung nicht bestehen, was dem eigentlichen Zweck einer solchen Messung entbehrt. Gleichermaßen können Sportwagenhersteller gezielt auf Geräuschmessstrecken mit besonders hohen Temperaturen zurückgreifen, um akustisch kritische Fahrzeuge erfolgreich genehmigt zu bekommen. Auffällig ist dieses Verhalten auch bei Messungen zur Serienüberprüfung (conformity of production). Wurde die Typprüfung an einem Fahrzeug unter besonders warmen Bedingungen durchgeführt, die Serienüberprüfung jedoch unter eher kalten Konditionen, so wird letztere einen deutlich lauteren Fahrgeräuschpegel aufweisen. Unter Umständen führt dies sogar zum Durchfallen der Serienüberprüfung, obwohl das Fahrzeug keinerlei Auffälligkeiten bezüglich des Auspuffgeräuschs aufweist.

  Ein Ansatz zur Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen Messungen bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen könnte daher eine Temperaturkorrektur sein. Reifenhersteller forschen umfangreich an der Temperatur- und Beschleunigungsabhängigkeit ihrer Fabrikate. Abbildung 34 zeigt das Reifenverhalten eines beispielhaften Reifens in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Fahrzeugbeschleunigung. Anhand derartiger Analysen könnte ein durchschnittliches Reifenverhalten für verschiedene Reifenkategorien erstellt werden und mit den Ergebnissen wäre eine entsprechende Korrektur der gemessenen Fahrgeräuschpegel möglich. Denkbar

wäre aber auch eine stark vereinfachte Pegelkorrektur von beispielsweise 1 dB(A) bei Temperaturen unter 10 °C sowie 2 dB(A) bei unter 5 °C, welche ausschließlich auf die Konstantfahrten der Geräuschmessung angewendet wird.

Im Rahmen einer Schulung durchgeführte Reifenrollgeräuschmessungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Beschleunigungen zeigen die Größenordnung, in welcher sich die Pegelunterschiede bewegen können. Bei steigender Beschleunigung steigt das Abrollgeräusch leicht exponentiell. Gleichzeitig erhöht sich das Abrollgeräusch mit geringer werdender Temperatur. Bei den in Abbildung 34 dargestellten Messungen wurde ein warmgefahrener, handelsüblicher Straßenreifen in Verbindung mit einem Elektrofahrzeug verwendet.

Abbildung 34: Abhängigkeiten des Reifenrollgeräuschs

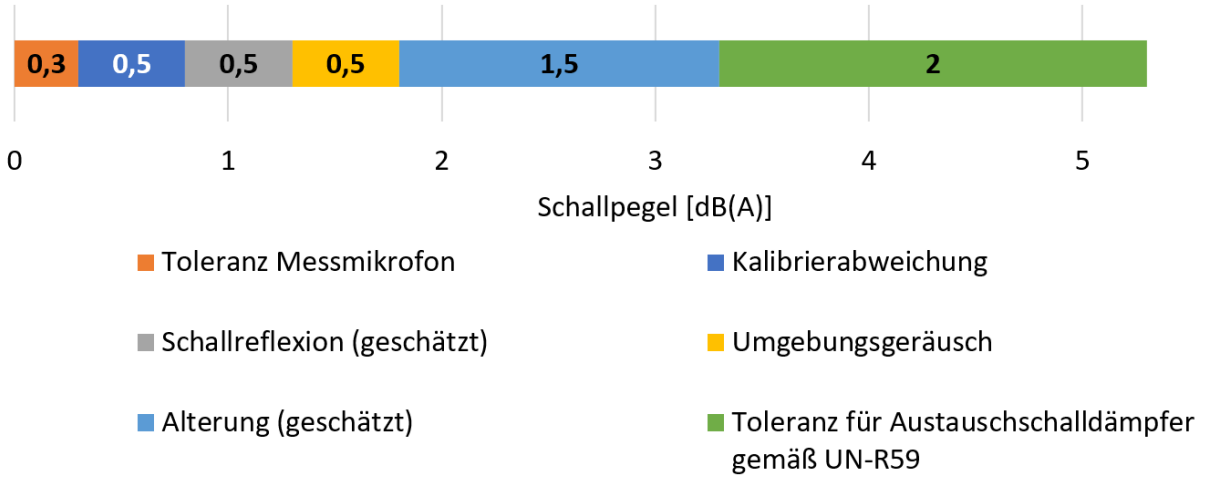


Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

- Anhang 6 (conformity of production) – kein Grenzwert für Standgeräuschmessung

In Anbetracht der im vorangehenden Abschnitt erläuterten Problematik empfiehlt es sich, für die Serienüberprüfung von Fahrzeugen eine klare Grenze auch für das Standgeräusch festzulegen. Die durch Ordnungsbehörden angewendete 5 dB(A)-Grenze für Verkehrskontrollen ist auf Grund der zahlreichen Einflussbedingungen bei einer Messung abseits genormter Prüfgelände bereits knapp bemessen, wie die nachfolgende Abbildung darstellt. Eine Überschreitung des Typprüfwerts sollte bei einer CoP-Messung des Standgeräuschs daher nicht toleriert werden. Dies würde die Aussagekraft und somit auch die Rechtssicherheit von Standgeräuschmessungen bei Verkehrskontrollen erheblich verbessern. Die nachfolgende Grafik zeigt die möglichen Einflussfaktoren auf eine Standgeräuschmessung bei einer Verkehrskontrolle außerhalb eines genormten Prüfgeländes sowie deren maximalen Einfluss auf das Endergebnis.

Abbildung 35: Einflussfaktoren auf Standgeräuschmessung



Quelle: Eigene Darstellung, FAKT GmbH

- Allgemein – Einführung Startgeräuschmessung

  Das Erzeugen exzessiver Lautstärke während des Motorstarts und Kaltlaufs könnte beispielsweise durch eine Geräuschmessung während des Startvorgangs geprüft werden. Um ein unerwünschtes Verhalten zu unterbinden, müsste zudem ein sinnvoller Grenzwert für diese Messung festgelegt werden. Eine zusätzliche Geräuschmessung während des Kaltstarts wäre zwar wünschenswert, ist jedoch nicht praktikabel. Hierzu müsste das Prüffahrzeug vor der Messung auf eine definierte Starttemperatur abgekühlt werden. Der Messort, die Messmethode und die Umgebungsbedingungen sind hierbei zu viele Einflussgrößen, welche nicht exakt beherrscht werden können. Unter Umständen könnte eine Selbstverpflichtung der Hersteller angestrengt werden, dass Akustikklappen grundsätzlich bei jedem Startvorgang sowie im Standgas vollständig geschlossen bleiben.

5.4.2 UN-Regelung Nr. 138

- Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs

  Um sicherzustellen, dass der maximal zulässige Geräuschpegel des Fahrzeugs im Prüfbereich der Regelung nicht überschritten wird, erscheinen zusätzliche beschleunigte Fahrten mit Geschwindigkeiten zwischen 3 km/h und 21 km/h oder darüber hinaus als sinnvoll.

  Ob eine Ausdehnung des Geschwindigkeitsbereichs zur weiteren Prüfung der Erfüllung von Minimalpegeln zweckmäßig ist, müsste zunächst durch eine breiter angelegte Messreihe als Vergleich zwischen e-Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor über einen Geschwindigkeitsbereich von zumindest 5 km/h bis 40 km/h bestätigt werden.

6 Ausblick

6.1 Verbrennungsmotoren

Auch wenn die Elektrifizierung der Automobilbranche stark voranschreitet, ist ein Aussterben des Verbrennungsmotors in den nächsten Jahrzehnten noch nicht zu erwarten. Prognosen zu Folge wird der Anteil an Verbrennern im Bereich der PKW in Deutschland im Jahr 2025 knapp 90 % und selbst im Jahr 2030 noch immer rund 75 % betragen. [35] Durch die Verschärfung der Geräuschgrenzwerte für Pkw zum 1. Juli 2024 und die Erweiterung der Prüfbedingungen durch das kommende RD-ASEP ist eine Ausweitung der Verwendung von Akustikklappen in kleinere Fahrzeugkategorien denkbar. Außerdem könnten aktive Schalldämpfer, wie in Abbildung 21 gezeigt, unerlässlich werden. Durch die strengeren Grenzwerte rücken zudem Reifenabrollgeräusche zunehmend in den Vordergrund. Ein Fahrgeräuschpegel von maximal 68 dB(A), wie er ab 2024 gefordert wird, ist unabhängig von der Motorlautstärke eines Fahrzeugs nur mit besonders leise abrollenden Reifen und relativ günstigen Umweltbedingungen zu erreichen. Dieser Sachverhalt erhöht bereits jetzt den Druck auf Reifenhersteller. Diverse Konzepte versprechen eine deutliche Reduktion der Rollgeräusche im Laufe der nächsten Jahre. Von dieser Entwicklung wird der gesamte Straßenlärm profitieren.

Durch strenger werdende Abgasemissionsgrenzwerte wird auch ein vermehrter Einsatz von Abgasrückführungsklappen zu beobachten sein. Außerdem werden neuartige Systeme, wie beispielsweise By-Pass-Klappen, zur weiteren Reduktion der Abgasemissionen Einzug erhalten, ohne die die künftigen Grenzwerte in einigen Fahrzeugkategorien nicht mehr einzuhalten sein werden.

Dazu kommt, dass der Anteil besonders auffälliger Fahrzeuge mit Akustikklappen, welche noch von den Grauzonen der UN-Regelung Nr. 51.02 und früheren Regelungen profitierten, im Laufe der kommenden Jahre und Jahrzehnte sukzessive abnehmen wird.

6.2 Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb

Im Bereich elektrisch angetriebener Fahrzeuge sind zwei gegensätzliche Tendenzen zu erkennen. Einerseits werden wir häufiger auf laute Fahrzeuge treffen. Vor dem Hintergrund der Emotionalisierung des Fahrerlebnisses und dem Schwinden von großvolumigen Verbrennungsmotoren kündigen Hersteller bereits an, dass künstliches Sounddesign bei Elektrofahrzeugen ein großes Thema sein wird. Die Klangqualität und Lautstärke von aktuell auf dem Markt befindlichen Soundaktuatoren ist begrenzt. Zukünftige Aktuatoren werden in Hinblick auf diese Merkmale deutlich besser sein. Die Erzeugung von verbrennungsmotorischen Geräuschen bei E-Fahrzeugen wird vor allem im Bereich elektrischer Sport- und Rennwagen Einzug halten. [36]

Andererseits möchte sich Deutschland auf den Weg zum Vorreiter des autonomen Fahrens machen. Bereits seit dem 21. Juni 2017 gibt es das Gesetz zur Regelung von automatisiertem Fahren gemäß Level 3. Am 28. Juli 2021 trat dann ein neues Gesetz in Kraft, welches zudem autonomes Fahren gemäß Level 4 in festgelegten Bereichen des öffentlichen Straßenverkehrs erlaubt. [37] Mit der Automatisierung des Individualverkehrs sinkt auch der Bedarf an emotionalem Sounddesign. Der Wunsch nach maximalem Geräuschkomfort während der Fahrt steigt. Gerade in diesem Bereich werden daher eher außergewöhnlich leise Fahrzeuge auf den Markt kommen, wovon auch der allgemeine Verkehrslärm profitieren wird.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend sollen nun die in der Aufgabenstellung befindlichen Fragen anhand der gewonnenen Erkenntnisse beantwortet werden.

- **Welche Technologien und Steuerungskonzepte für das Sound-Design kommen zum Einsatz?**

  Im Kapitel 3 wurden die gängigsten Technologien für das Sound-Design dargestellt. Dazu zählt die Luftansaugung (Luftfilter und Saugmodul), welche durch die Auslegung der Geometrie als auch der Werkstoffe Einfluss auf die Motorleistung und das Geräuschverhalten hat. Des Weiteren erfolgte eine detaillierte Darstellung der unterschiedlichen Bauformen und Funktionsweisen der Auspuffklappen. Dabei kann zwischen aktiven und passiven Auspuffklappen unterschieden werden, die sich in der Ansteuerung unterscheiden. Es hat sich ergeben, dass sich die elektrische externe Ansteuerung auf dem Markt durchgesetzt hat, da diese weniger fehleranfällig und ein Verstellen der Klappe über das Motormanagementsystem möglich ist. Die Verstellung erfolgt kennfeldbasierend in Abhängigkeit verschiedener Parameter, wie z. B. Motordrehzahl, Gangwahl, Fahrprofilauswahl, Last oder Geschwindigkeit. Akustikklappen kennen dabei meist nur die Stellung „offen“ oder „geschlossen“, während Auspuffklappen für die Abgasrückführung oder für die Motorbremse stufenlos verstellbar sind.

  Thematisiert wurden weiterhin Soundaktuatoren. Sie gewinnen in der Diskussion über Motorenlärm immer mehr an Bedeutung. Gerade vor dem Hintergrund zunehmender Abgasreinigungssysteme sowie immer besser gedämmter Fahrzeuge haben einige Hersteller diese Form der Geräuscherzeugung für sich entdeckt, um vermeintlich emotionslosem Motorklang im Innenraum wie auch nach außen hin wieder auf die Sprünge zu helfen. Nicht nur im Bereich der Verbrennungsmotoren, sondern auch bei Elektrofahrzeugen sind derartige Systeme anzutreffen. Die unterschiedlichen Bauformen und deren Funktionsweise wurden dargestellt. Außerdem wurde erläutert, welche Bedingungen für den Genehmigungsprozess eines Soundaktuators gelten und wie diese umgangen werden können.

- **Welche technische Relevanz haben Auspuffklappen (z. B. Abgasgegendruck) in Abhängigkeit vom Antrieb (z. B. Aufladung, Abgasnachbehandlung)?**

  Um diese Frage zu beantworten, ließen die Projektteilnehmer die gewonnenen Erkenntnisse aus den täglichen Geräuschmessungen einfließen und bezogen sich zusätzlich auf Fachliteratur und Tagungsbeiträge.

  Dabei wurde auf einen Versuch hingewiesen, dass durch den Einsatz von aktiven Schalldämpfern der Abgasgegendruck so verringert werden kann, dass eine Erhöhung der Motorleistung bzw. des Drehmoments um 2 bis 3 % erzielt wird. Dadurch kann Kraftstoff eingespart und somit der Schadstoffausstoß minimiert werden. Des Weiteren wurde die technische Relevanz der Auspuffklappen für die Abgasrückführung dargelegt. Durch immer schärfer werdende Abgasnormen entwickelten die Hersteller eine zusätzliche Niederdruck Abgasrückführung, bei der das austretende Abgas über eine Auspuffklappe und einem Ventil dem Ansaugtrakt wieder zugeführt wird, um die NO_x Emission zu minimieren. Um belastbare Zahlen der Schadstoffminimierung zu erhalten, wird auf weitere nötige Versuchsreihen in einem Emissionslabor der teilnehmenden technischen Dienste für den zweiten Teil des Forschungsvorhabens hingewiesen. Ebenso konnte die Relevanz von Auspuffklappen für die Motorbremse von Nutzfahrzeugen erklärt werden. Da Nutzfahrzeuge mit Druckluftbremse

nach der StVZO über eine zusätzliche Dauerbremse verfügen müssen ist der Einsatz von Stauklappen zur Motorbremse unumgänglich.

Zusätzlich konnte durch anfängliche praktische Versuche die Auswirkungen der unterschiedlichen Klappenstellungen auf das Verhalten des Mündungsschalls vorgenommen werden. Dabei stellte man fest, dass sich in diesem Fall das Standgeräusch um bis zu 6 dB(A) erhöht.

- **Wie werden Akustikklappen und Soundgeneratoren beworben, also welche Eigenschaften werden ihnen zugesprochen?**

Eine Recherche der Werbungen der Hersteller hat ergeben, dass Auspuffklappen, sofern sie für die Abgasreinigung oder für das Bremssystem notwendig sind, nicht von den Herstellern explizit beworben werden, da diese beiden Themen eher einen marginalen Einfluss auf die Kaufentscheidung des Interessenten haben und keinerlei Emotionen wecken. Anders verhält sich die Lage bei Akustikklappen. Hier gehen die Hersteller deutlicher in die Offensive. Mit Begrifflichkeiten wie „maskulinen Sound“, „intensiven Klang“ oder „sportliche Akustik“ sollen dem Fahrzeuginteressenten die Klappenabgasanlage reizvoller gemacht werden.

Im Gegensatz dazu stellte sich heraus, dass werksseitig verbaute Soundaktuatoren durch die Fahrzeughersteller faktisch nicht beworben werden. In den meisten Fällen ist das Ausstattungsmerkmal auf den Datenblättern und Ausstattungslisten der betreffenden Fahrzeuge überhaupt nicht aufgeführt. Anders sieht es im Bereich nachrüstbarer Aktuatoren aus. Hier werden sowohl Innen- als auch Außengeräuschaktuatoren mit „kraftvollem Auspuffsound“, „hervorragendem Klang“ sowie „blubbernd, aggressiv und voluminös“ beworben. Außerdem wird klar auf Kunden abgezielt, deren Fahrzeug werksseitig einen „schwachen eigenen Sound“ liefert.

- **Welche Verbreitung findet welche Klappentechnologie und Soundgeneratoren in den verschiedenen Fahrzeugklassen?**

Mit Hilfe der Zulassungsstatistiken des Kraftfahrbundesamtes wurden die Klappentechnologien in verschiedene Fahrzeugkategorien unterteilt. Dabei konnte festgestellt werden, dass Auspuffklappen für das Sound-Design eher sportlichen Fahrzeugen vorbehalten sind und bezogen auf die Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland einen eher kleinen Anteil haben.

Deutlich höher ist der Anteil der Auspuffklappen, wenn diese auf Grund einer zwingenden technischen Relevanz, wie z. B. zur Bremsunterstützung oder zur Einhaltung bestehender Abgasnormen, verbaut werden müssen.

Schwieriger fällt die Analyse der Verbreitung von Aktuatoren. Vor allem Innengeräuschaktuatoren sind inzwischen in alle Fahrzeugkategorien vom sportlichen Kleinwagen bis zum Oberklasse-SUV vertreten. Eingesetzt werden sie gern bei sportlichen Derivaten der jeweiligen Fahrzeuge. Auf Grund des immer weiter fortschreitenden Downsizings der Motoren entspricht der tatsächliche Motorklang bei gerade diesen Fahrzeugen häufiger nicht den sportlichen Erwartungen der Hersteller und Kunden.

- **Welche Trends sind zu beobachten und zu erwarten?**

Getrieben durch strenger werdende Geräusch- wie auch Abgasgrenzwerte setzen Hersteller zunehmend auf die Möglichkeiten variabler Geometrien im Abgastrakt. Systeme, die bisher

noch hochpreisigen Sportwagen und Oberklassefahrzeugen vorbehalten sind, werden künftig immer häufiger in den kleineren Fahrzeugsegmenten anzutreffen sein. Es ist zu erwarten, dass die Komplexität der Systeme hinsichtlich des Aufbaus und der Ansteuerung weiter zunehmen wird, um die durch bestehende Regelungen gewährten Freiräume exakter ausnutzen zu können. Der große Wandel des Individualverkehrs wird einerseits durch den Einzug der Elektromobilität, andererseits auch durch die inzwischen gesetzlich regulierte Möglichkeit automatisierten und autonomen Fahrens bestimmt. Beide Trends führen tendenziell zu einer deutlichen Minderung des störenden Verkehrslärms. Es ist jedoch anzunehmen, dass Hersteller in einigen Bereichen neue Wege gehen werden, um den weiterhin bestehenden Kundenwunsch nach sportlichen Fahrzeugen mit entsprechendem Klangbild gerecht werden zu können.

Um die Erkenntnisse der Recherche mit konkreten Daten belegen zu können, sollten im Anschluss dieser Recherche messtechnische Untersuchungen durchgeführt werden, anhand derer ermittelt werden kann, in welchem Umfang die genannten Freiräume durch die Hersteller von Fahrzeugen mit Klappenabgasanlagen genutzt werden und inwiefern sich dies auf die Geräuschemissionen der Fahrzeuge auswirkt. Hierzu sollten zunächst Messungen gemäß den internationalen Vorschriften in allen geräuschrelevanten Fahrmodi der jeweiligen Prüffahrzeuge durchgeführt werden. Im Anschluss daran sollten Messfahrten außerhalb der üblichen Prüfbedingungen erfolgen. Es bietet sich zudem an, sofern möglich, während der Stand- und Fahrgeräuschmessungen auch die Klappenstellung zu erfassen, um Rückschlüsse auf die Geräuschstrategie der Hersteller ziehen zu können.

8 Quellenverzeichnis

[1] Umweltbundesamt, „www.umweltbundesamt.de," 23 Oktober 2020. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm/strassenverkehrslaerm#gerauschbelastung-im-strassenverkehr. [Zugriff am 24 März 2022].

[2] H.-J. Koch, „Umwelt und Straßenverkehr," Berlin, Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 2005, pp. 44-48.

[3] P. Zeller, „Handbuch Fahrzeugakustik," Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018, pp. 340-341.

[4] P. Zeller, „Handbuch Fahrzeugakustik," Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018, p. 352.

[5] P. Zeller, „Handbuch Fahrzeugakustik," Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018, p. 359.

[6] J. Krüger, Castor, F. und Jebasinski, R., „Aktive Abgas-Schalldämpfer für PKW - Chancen und Risiken.," in *DAGA Jahrestagung für Akustik*, München, 2005.

[7] R. Dr. Paschotta, „www.energie-lexikon.info," 2022. [Online]. Available: www.energie-lexikon.info/motorbremse.html. [Zugriff am 24 Januar 2022].

[8] Kraftfahrbundesamt, „Informationsrundschreiben IST 05-19," KBA, Flensburg, 2019.

[9] BMW, „www.bmw.de," 2021. [Online]. Available: https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/m/m135i/2021/bmw-m135i-inspirieren.html. [Zugriff am 21 März 2022].

[10] Audi, „www.audi.de," 2022. [Online]. Available: https://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a3/rs-3-sportback.html. [Zugriff am 21 März 2022].

[11] Daimler, „group-media.mercedes-benz.com," 25 Juni 2012. [Online]. Available: https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Doppelte-Abgasrueckfuehrung-Noch-rueckstandsfreier-verbrennen.xhtml?oid=9904108&msclkid=2aa22023a91911ec8c5eaa89d6a4f8fc. [Zugriff am 21 März 2022].

[12] BMW, „www.bmw-motorrad.de," 2022. [Online]. Available: https://www.bmw-motorrad.de/de/models/adventure/s1000xr.html. [Zugriff am 21 März 2022].

[13] Kraftfahrbundesamt, „www.kba.de," 2022. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrebilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html. [Zugriff am 21 März 2022].

[14] Kraftfahrbundesamt, „www.kba.de," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Segmente/segmente_node.html. [Zugriff am 22 März 2022].

[15] Kraftfahrbundesamt, „www.kba.de," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Motorisierung/motorisierung_node.html. [Zugriff am 22 März 2022].

[16] Kendrion N.V., 1101 CN Amsterdam (NL), „Soundsysteme für den Fahrzeuginnenraum," [Online]. Available: https://www.kendrion.com/de/produkte/soundsysteme/soundsysteme-fuer-den-fahrzeuginnenraum. [Zugriff am 21. Dezember 2021].

[17] O. Funahashi, „sounding body and audio reproduction device using same, and mobile device". USA Patent US 9,699,535 B2, 4. Juli 2017.

[18] Y. K. Kang und J. Y. Kim, „apparatus for generating sound by using car body". USA Patent US 10,471,892 B2, 12. November 2019.

[19] J. Krüger, F. Castor, M. Müller und G. Wirth, „Aktiver Schalldämpfer". Deutschland Patent DE 10 2008 018 085 A1, 9. April 2008.

[20] R. Wildberg, „Nie wieder Lärm?," [Online]. Available: https://www.autobild.de/artikel/sounddesign-von-eberspaecher-1016791.html. [Zugriff am 18. März 2022].

[21] Scope-Design, 64683 Einhausen, „Active-Sound Technologie," [Online]. Available: https://www.active-sound.de/active-sound-technologie/. [Zugriff am 21. Dezember 2021].

[22] BBM Motorsport GmbH, 48308 Senden, „Sound Active," [Online]. Available: https://bbm-tuningshop.de/Fahrzeugtechnik-Abgastechnik-Sound-Active. [Zugriff am 18. März 2022].

[23] Cete Automotive GmbH, 24558 Henstedt-Ulzburg, „Soundaktuator," [Online]. Available: https://www.active-sound.eu/de/soundaktuator. [Zugriff am 22. Dezember 2021].

[24] Audi AG, 85057 Ingolstadt, „Motorsoundsystem," [Online]. Available: https://shops.audi.com/de_DE/web/zubehoer/p/motorsoundsystem-8t0071901a-10. [Zugriff am 2021 Dezember 2021].

[25] Moritz Nolte GmbH, 44651 Herne, „Eberspächers Active Sound System," [Online]. Available: https://automotive-technology.de/eberspaechers-active-sound-system/. [Zugriff am 14. März 2022].

[26] news aktuell GmbH, 20148 Hamburg, „Das sind die Gewinner der Race Night 2016," [Online]. Available: https://www.presseportal.de/pm/53065/3494394. [Zugriff am 14. März 2022].

[27] AUDI AG, 85057 Ingolstadt, „Die Innovation mit eingebautem Aha-Effekt," [Online]. Available: https://shops.audi.com/de_DE/web/zubehoer/p/motorsoundsystem-8t0071901a-10. [Zugriff am 18. März 2022].

[28] Media-CarTec GmbH, 63533 Mainhausen, „Active Sound," [Online]. Available: https://www.maxhaust.com/?sPartner=a83db5db. [Zugriff am 14. März 2022].

[29] United Nations Regulation No. 51, Revision 2 - Amendment 3, 02 Series of amendments, *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their noise emissions,* 22. Januar 2015.

[30] United Nations Regulation No. 51, Revision 3, Amendment 6, 03 Series of amendments, *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions,* 25. September 2020.

[31] Economic Commission for Europe, „(WP.29/GRBP) Working Party on Noise and Tyres (75th session)," 8. Februar 2022. [Online]. Available: https://unece.org/transport/documents/2021/11/working-documents/iwg-asep-proposal-supplement-9-03-series-amendments. [Zugriff am 20. März 2022].

[32] United Nations Regulation No. 41, Revision 2 - Amendment 9, 04 Series of amendments, *Uniform provisions concerning the approval of motor cycles with regard to noise,* 30. September 2021.

[33] United Nations Regulation No. 41, Revision 2, Amendment 10, 05 Series of amendments, *Uniform provisions concerning the approval of motorcycles with regard to noise,* 30. September 2021.

[34] United Nations Regulation No. 138, Amendment 2, 01 Series of amendments, *Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility (QRTV),* 10. Oktober 2017.

[35] M. Kords, „Anteil der Elektroautos am Bestand der Personenkraftwagen in Deutschland von 2018 bis 2020 und Prognose bis 2030," 21. Januar 2022. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1202904/umfrage/anteil-der-elektroautos-am-pkw-bestand-in-deutschland/. [Zugriff am 21. März 2022].

[36] B. Seinecke und B. Bernard, „Geräuschsimulator für ein Kraftfahrzeug". Deutschland Patent DE 10 2020 112 680 A1, 11. November 2021.

[37] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 10115 Berlin, „Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft," 27. Juli 2021. [Online]. Available: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html. [Zugriff am 21. März 2022].

[38] KUFATEC GmbH & Co. KG, 23795 Bad Segeberg, „Sound-Actuator Mini," [Online]. Available: https://www.sound-booster.com/de/product/sound-actuator-mini.html. [Zugriff am 21. Dezember 2021].

[39] P. Zeller, „Handbuch Fahrzeugakustik," Wiesbaden, SpringerVieweg, 2018, p. 2.

A KBA Informationsschreiben

A.1 Info-Schreiben des KBA zum Thema Klappenabgasanlagen

Kraftfahrt-Bundesamt

KBA

Nr. 05-19

Informationssystem
Typgenehmigungsverfahren

Verfahren für die Genehmigung von Fahrzeugen mit Klappenanlage und/oder Soundgeneratoren (auch Soundaktuatoren genannt) nach UN-Regelung Nr. 51, Verordnung (EU) Nr. 540/2014 und Richtlinie 70/157/EWG

Frage- oder Problemstellung:
Fahrzeughersteller setzen vermehrt Systeme zur Änderung des Geräuschverhaltens ein (Klappenanlagen, Soundgeneratoren, Soundaktuatoren o. ä. – nachfolgend Zusatzsysteme genannt).

Ergebnis:
Nach Auffassung des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) stehen solche Systeme im Einklang mit den Vorschriften der UN-Regelung Nr. 51, der Verordnung (EU) Nr. 540/2014 und der Richtlinie 70/157/EWG, wenn nachfolgende Anforderungen erfüllt werden:

1. Gemäß Abschnitt 6.1.1. der UN-Regelung Nr. 51 muss das Fahrzeug unter normalen Betriebsbedingungen der Vorschrift entsprechen. Dies umfasst eine Vielzahl von Randbedingungen, wie z. B. Korrosionsfestigkeit, das Verhalten bei Fahrzeugvibrationen bis hin zu den Auswirkungen auf das Geräuschverhalten abseits der Prüfbedingungen. Mit der UN-Regelung Nr. 51 ÄS 03 (Punkt 6.2.3.) wurden ein Teil dieser Randbedingungen verdeutlicht sowie im Dokument GRB-68-03 noch näher spezifiziert.
2. Sofern Zusatzsysteme in ihrer Wirkung auf das Geräuschverhalten von unterschiedlichen Fahrmodi (z. B. Beeinflussung von Getriebeschaltpunkten, Gaspedalkennlinien) oder Soundgestaltungen abhängig sind, ist eine Worst-Case-Bewertung durchzuführen. Diese Bewertung muss alle praktisch möglichen Kombinationen der Schaltmöglichkeiten umfassen. Sollten bei Messungen nach Anhang III unter Einhaltung sämtlicher Randbedingungen mehrere Modi hinsichtlich ihres Verhaltens als Prüfmodus in Frage kommen, ist der Modus mit dem höchsten Geräuschpegel auszuwählen.
3. Sofern eine separate Schaltung des Zusatzsystems durch den Fahrzeugführer vorhanden ist, sind Vergleichsmessungen mit und ohne aktivem Zusatzsystem durchzuführen. Bei nicht abschaltbaren Zusatzsystemen ist im Konzept zur Antimanipulation und im Fehlerfall zu beschreiben, ob und wie das Zusatzsystem abschaltet und welche Auswirkungen sich auf das Geräuschverhalten des Fahrzeugs ergeben.
4. Das Geräuschverhalten intendierter Funktionalitäten wie beispielsweise Backfire, muss unter normalen Betriebsbedingungen der Vorschrift entsprechen (siehe 1.).
5. Das Standgeräusch ist für alle geräuschrelevanten Modi zu bestimmen und im Prüfbericht zu dokumentieren.
6. Es gilt der Grundsatz, was nicht im Rahmen der Genehmigung dokumentiert ist, ist nicht genehmigt und stellt im Falle eines Einflusses auf das Geräuschverhalten des Fahrzeugs eine Konformitätsabweichung dar. Dieser Grundsatz bezieht sich nicht ausschließlich auf das Verhalten des Fahrzeugs unter Typprüfbedingungen, sondern auch unter normalen Betriebsbedingungen (siehe 1.).
7. Neben dem normalen Schalldämpfersystem sind Zusatzsysteme zur Änderung des Geräuschverhaltens zu beschreiben. Das betrifft Zeichnungen und Angaben (z. B. Hersteller und Teilenummer), die die Zusatzsysteme am Fahrzeug erkennbar machen, genauso wie Angaben zu grundlegenden Funktionen dieser Systeme. Verschiedene Modi sind, falls vorhanden, zu beschreiben. Darüber hinaus ist die zur Typprüfung verwendete Softwarekennzeichnung zu nennen. Hat eine Softwareänderung Einfluss auf die genehmigte Wirkung des Zusatzsystems, ist die geänderte Softwarekennzeichnung mittels Erweiterung anzuge-

InA- 05-19.DOC/26.08.2019/VL

Seite 1/2

ben. Dies kann vorzugsweise im Prüfbericht oder im Beschreibungsbogen geschehen. Der Grundsatz, dass „jede Änderung der Typgenehmigungsbehörde mitzuteilen ist", gilt sowohl für Hardware als auch für Softwareänderungen.

8. Das KBA fordert eine Herstellererklärung, wonach ein außergewöhnliches Geräuschverhalten des Zusatzsystems (z. B. Sprungverhalten) auch für den Bereich außerhalb ASEP (20 - 80 km/h) nicht zu erwarten ist. Die Erklärung muss mindestens den Bereich aus dem Dokument GRB-68-03 abdecken.
9. Vom Hersteller wird eine aussagefähige Beschreibung des Konzepts zur Antimanipulation und im Fehlerfall erwartet. Die Beschreibung muss darauf eingehen, wie Manipulationen des Steuergerätes und der Signalübertragung durch unbefugte Dritte durch ausreichende Maßnahmen erschwert werden. Fehler im Zusatzsystem müssen erkannt werden und zur Abschaltung des Zusatzsystems führen. Die Verwendung einer Kontrollleuchte als ergänzende Fahrerinformation über die Abschaltung des Zusatzsystems ist dabei zulässig.
10. Sofern der Hersteller zum Einsatztermin dieser Verfahrensweise bei neuen Typgenehmigungen noch kein Konzept gegen Manipulation durch unbefugte Dritte umsetzen kann, hat dieser eine Strategie vorzulegen, wie bis zum nächstmöglichen Einsatzzeitpunkt, spätestens jedoch zum 01.01.2020, solche Maßnahmen eingeführt werden können.

Anwendung des IST:
Die Grundsätze dieser Vorschriftenauslegung sind soweit möglich implizit sowohl auf die Genehmigung von Krafträdern als auch auf die Genehmigung von Austauschschalldämpfern für Kraftfahrzeuge und Krafträder zu übertragen. Es gilt weiterhin für Schalldämpferanlagen mit Zusatzsystemen, die nach UN-Regelung Nr. 51, Verordnung (EU) Nr. 540/2014 und Richtlinie 70/157/EWG genehmigt werden im Hinblick auf die Dokumentation von Zusatzsystemen und der Wort-Case-Bewertung dieser Zusatzsysteme in normalen Betriebsbedingungen.

Unabhängig von diesem IST ist das Verkehrsblatt vom 15. März 2018 hinsichtlich der Nachrüst-Soundgeneratoren zu beachten.

Wenn für bestimmte Fahrzeuge in der Vergangenheit bereits Typgenehmigungen erteilt wurden und diese nicht die vorgenannten Prüfgrundsätze beinhalteten, sind diese bei nächster Befassung zu berücksichtigen. Sofern das damalige Prüffahrzeug nicht mehr verfügbar ist, werden auch Prüfergebnisse akzeptiert, wenn diese nunmehr an einem anderen technisch geeigneten Fahrzeug ermittelt werden und der Technische Dienst die Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse bestätigen kann.

Die in diesem Dokument dargelegt Verfahrensweise ist für das Typgenehmigungsverfahren ab dem 01.09.2019 verbindlich anzuwenden und ersetzt das IST 03-18.

Flensburg, 24.07.2019
Az.: 400-27/001#022
Peter Jennerjahn

A.2 Info-Schreiben des KBA zum Thema Soundaktuatoren

Kraftfahrt-Bundesamt

Nr. 03/2018

Informationssystem
Typgenehmigungsverfahren

Verfahren für die Genehmigung von Fahrzeugen mit Soundgeneratoren (auch Soundaktuatoren genannt) nach UN-Regelung Nr. 51, Änderungsserie (ÄS) 03 und Verordnung (EU) Nr. 540/2014

Frage- oder Problemstellung:
Fahrzeughersteller setzen vermehrt Systeme zur Modulation des Motorgeräuschverhaltens ein (Soundgeneratoren, Soundaktuatoren o. ä. – nachfolgend Zusatzsysteme genannt).

Ergebnis:
Nach Auffassung des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) stehen solche Konzepte im Einklang mit den Vorschriften der UN-Regelung Nr. 51, Änderungsserie (ÄS) 03 und der Verordnung (EU) Nr. 540/2014, wenn nachfolgende Anforderungen erfüllt werden:

Dokumentation
Neben dem normalen Schalldämpfersystem sind Zusatzsysteme zur Geräuschmodulation zu beschreiben. Das betrifft Zeichnungen und Angaben (z. B. Hersteller und Teilenummer), die die Zusatzsysteme am Fahrzeug erkennbar machen, genauso wie Angaben zu grundlegenden Funktionen dieser Systeme. Darüber hinaus ist die zur Typprüfung verwendete Softwarekennzeichnung zu nennen. Hat eine Softwareänderung Einfluss auf die genehmigte Wirkung des Zusatzsystems, ist die geänderte Softwarekennzeichnung mittels Erweiterung anzugeben. Dies kann vorzugsweise im Prüfbericht oder im Beschreibungsbogen geschehen.

Fahrgeräusch und Standgeräusch
Sofern eine separate Schaltung des Zusatzsystems durch den Fahrzeugführer vorhanden ist, sind Vergleichsmessungen mit und ohne aktivem Zusatzsystem durchzuführen. Bei nicht abschaltbaren Zusatzsystemen ist im Konzept zu Antimanipulation und Fehlerfall zu beschreiben, ob und wie das Zusatzsystem abschaltet und welche Auswirkungen sich auf das Geräuschverhalten des Fahrzeugs ergeben.

Sofern Zusatzsysteme in ihrer Wirkung auf das Geräuschverhalten von unterschiedlichen Fahrmodi (z. B. Beeinflussung von Getriebeschaltpunkten, Gaspedalkennlinien) oder Soundgestaltungen abhängig sind, ist eine Worst case-Betrachtung durchzuführen.
Diese Betrachtung muss alle praktisch möglichen Kombinationen der Schaltmöglichkeiten umfassen, wobei Stand- und Fahrgeräusch immer gleichzeitig innerhalb einer Kombination hinsichtlich der Vorschriftsmäßigkeit zu betrachten sind. Die jeweils höchsten Werte sind in den Fahrzeugdokumenten anzugeben. Diese können auch aus zwei unterschiedlichen Kombinationen stammen.

Wenn für bestimmte Fahrzeuge in der Vergangenheit bereits Typgenehmigungen erteilt wurden und diese nicht die vorgenannten Prüfgrundsätze beinhalteten, sind diese zukünftig bei nächster Befassung zu berücksichtigen. Sofern das damalige Prüffahrzeug nicht mehr verfügbar ist, werden auch Prüfergebnisse akzeptiert, wenn diese nunmehr an einem anderen technisch geeigneten Fahrzeug ermittelt werden und der Technische Dienst die Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse bestätigen kann.

Additional Sound Emission Provisions (ASEP)
Gemäß Abschnitt 6.2.3 letzter Absatz der UN-Regelung Nr. 51, ÄS 03 darf das typische Verhalten unter realen Fahrbedingungen auf der Straße nicht signifikant vom Verhalten unter den Typprüfbedingungen nach Anhang III und VII abweichen.

Hierzu fordert das KBA eine Herstellererklärung, wonach ein außergewöhnliches Geräuschverhalten des Zusatzsystems (z. B. Sprungverhalten) auch für den Bereich außerhalb ASEP (20 - 80 km/h) nicht zu erwarten ist.

Konzept zu Antimanipulation und Fehlerfall
Vom Hersteller wird eine aussagefähige Beschreibung des Konzepts zur Antimanipulation und im Fehlerfall erwartet. Die Beschreibung muss darauf eingehen, wie Manipulationen des Steuergerätes und der Signalübertragung durch unbefugte Dritte durch ausreichende Maßnahmen erschwert werden. Fehler im Zusatzsystem müssen erkannt werden und zur Abschaltung des Zusatzsystems führen. Die Verwendung einer Kontrollleuchte ist dabei zulässig, z. B. über die MIL.

Nachrüstung von Zusatzsystemen wie Soundgeneratoren

Soundgeneratoren sind für die Nachrüstung nicht zulässig, da sie den Anforderungen der §§ 30 Abs. 1 Nr. 1 und 55 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) widersprechen (Verkehrsblatt 2018, Heft 5, S. 214).

Die in diesem Dokument dargelegt Verfahrensweise ist für das Typgenehmigungsverfahren ab dem 01.01.2019 verbindlich anzuwenden.

Flensburg, 24.05.2018
Az.: 400-27/001#015
Mark Wummel

2018_05_03 Entwurf IST Soundaktuatoren_überarbeitet_42_REINSCHRIFT_IST 03_18_neu.docx/10.07.2018/SA

B Messergebnisse

B.1 VW Golf R

TÜV SÜD Auto Service GmbH
Daimlerstraße 11
D-85748 Garching

MESSBLATT ZUR GERÄUSCHMESSUNG
(gemäß Richtlinie 70/157/EWG vom 06.02.1970 einschl. aller Änderungen bis 2007/34/EG vom 14.06.2007 - Anhang II)
AM-TD-CL008-1_Rev. 07

Auftraggeber / *Client*:
Bestellnr. / *Order-no.*:

Messergebnisse / *Test results*

Auto Service

Fahrzeug / *Vehicle*:		
Hersteller / *Manufact.*:	VOLKSWAGEN-VW (D)	
Typ / Var. / *Type / Var.*:	AU / GAC4CJXCX1	
Handelsbez. / *Trade name*:	GOLF	
Identnummer / *Identif. no.*:	WVWZZZAUZGW212214	
Kilometerstand, Erstzulassung / *Mileage, date of first registration*:	61681	29.01.2016
Gen.nr. / *Homolog. no.*:	e1*2007/46*0623*18	
Testgewicht / *Test weight*:	–	

Angaben zur Prüfung / *Testing details*:		Nr. des Messgeräts / *No. of test device*:	kalibriert bis / *calibrated until*:
Richtlinienstand / *Directive*:	2007/34/EG		
Geräuschmessg. / *Sound level meter*:	B&K 2250	SPM03	18.02.23
Abgasgegendmessg. / *Backpress.m.*:	WIKA CPH6200-S2	–	–
Geschwindigkeitsm. / *Speedom.*:	V-Box	VB01	09.03.22

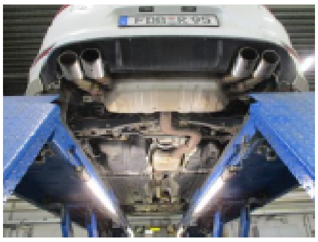
Motor / *Engine*:	
Hersteller / *Manufact.*:	VAG
Typ / *Type*:	CJXC
Art / *Kind*:	☑ Otto ☐ Diesel ☐ Hybrid
Nennleistung / *Nominal power*:	221 / 5500 kW / min^{-1}
Hubraum / *Capacity*:	1984 cm^3
Getriebe / *Gearbox*:	
Art / *Kind*:	☐ MT ☑ AT ☐ CVT
Anzahl der Gänge / *Number of gears*:	6
Achsübersetzung / *Rear axle ratio*:	4,769 / 3,444
Sonstiges / *Additional*:	
Reifengröße / *Tyre size*:	225/40 R18 92V
Fahrer / *Driver*:	Rinske
Wetterbedingungen / *Weather data*:	9 °C / 43 dB(A) / < 1,0 m/s

Kennzeichnung der Abgasanlage / *Identification of exhaust system*		
Bauteil / *Part*	Einprägung	
Luftfilter / Airbox	VWR Racingline & HF-Series Turboinlet	
Katalysator 1 / Catalyst 1	OE	
MSD / IM	OE (5Q0 119 H)	
NSD / RM	OE (5Q0 120 AP)	

Fahrgeräusch / *Driving noise level* [dB(A)]
Gesetzl. Grenzwert: 74 dB(A)

Gang / Stufe (km/h / U/min) / *Gear / pos. (km/h / U/min)*	links / *left*	rechts / *right*	links / *left*	rechts / *right*	links / *left*	rechts / *right*
D	74,2	75,1				
D	74,8	75,0				
Ergebnis / *Result*	74					

Bemerkungen / *Remarks*		Ergebnis = Bestanden



Datum / *Date*: 03.03.22 Ort / *Place*: Garching Prüfer / *Expert*: Rinske

B.2 VW Arteon R

TÜV SÜD Auto Service GmbH Daimlerstraße 11 D-85748 Garching	**MESSBLATT ZUR GERÄUSCHMESSUNG** (gemäß Richtlinie 70/157/EWG vom 06.02.1970 einschl. aller Änderungen bis 2007/34/EG vom 14.06.2007 - Anhang II) **AM-TD-CL008-1_Rev. 07**	TÜV SÜD Auto Service
Auftraggeber / *Client*: Bestellnr. / *Order-no.*:	Messergebnisse / *Test results*	

Fahrzeug / *Vehicle:*		
Hersteller / *Manufact.:*	VOLKSWAGEN-VW (D)	
Typ / Var. / *Type / Var.:*	3H / ABDNFGX1	
Handelsbez. / *Trade name:*	ARTEON	
Identnummer / *Identif. no.:*	--	
Kilometerstand, Erstzulassung / *Mileage, date of first registration:*	23483	05/2021
Gen.nr. / *Homolog. no.:*	e1*2007/46*1725*19	
Testgewicht / *Test weight:*	--	

Motor / *Engine:*		
Hersteller / *Manufact.:*	VAG	
Typ / *Type:*	DNFG	
Art / *Kind:*	☑ Otto ☐ Diesel ☐ Hybrid	
Nennleistung / *Nominal power:*	235/5350	kW / min^{-1}
Hubraum / *Capacity:*	1984	cm^3
Getriebe / *Gearbox:*		
Art / *Kind:*	☑ MT ☑ AT ☐ CVT	
Anzahl der Gänge / *Number of gears:*	7	
Achsübersetzung / *Rear axle ratio:*	--	
Sonstiges / *Additional:*		
Reifengröße / *Tyre size:*	--	
Fahrer / *Driver:*	Rinske	
Wetterbedingungen / *Weather data:*	11 °C / 48 dB(A) / < 1,0 m/s	

Angaben zur Prüfung / *Testing details:*		Nr. des Messgeräts *No. of test device:*	kalibriert bis / *calibrated until:*
Richtlinienstand / *Directive*:	ECE-R51.03		
Geräuschmessg. / *Sound level meter:*	B&K 2250	SPM03	18.02.23
Abgasgegendmessg. / *Backpress.m.:*	WIKA CPH6200-S2	–	–
Geschwindigkeitsm. / *Speedom.:*	V-Box	–	–

Standgeräusch / *Stationary noise level* [dB(A)]

n = 3750 U/min	links / *left*	rechts / *right*	links / *left*	rechts / *right*	links / *left*	rechts / *right*
Test 1	77,4	77,6	77,8	78,1	83,9	83,2
Test 2	77,6	78,0	77,7	78,0	83,6	83,5
Test 3	77,8	77,9	78,1	78,0	83,6	83,7
Klappenstellung	zu	zu	zu	zu	auf	auf
Modus	Komfort		Sport		Race	
Ergebnis / *Result*	**78**		**78**		**84**	

Datum / *Date:* 04.03.22 Ort / *Place:* Garching Prüfer / *Expert:* Rinske