

_ Toningenieur Projekt _

Innenraumgeräusch von Elektrofahrzeugen

Untersuchung von Bewertungs- und Analysemethoden

durchgeführt am Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation Technische Universität Graz, Österreich

> in Kooperation mit Mercedes-Benz G GmbH Raaba, Österreich

> > von Georg Klein, B.Sc.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, 11. Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Messung: Ablauf und Aufbau2.1Messfahrzeuge	4 5 7 8 10
3	Auswertung: Software und Analysen3.1ArtemiS Suite	11 11 12 16 16 16
4	Diskussion: Eignung der Analyse-Methoden4.13D: Tonhaltigkeit vs. FFT4.2Einzahlwert Tonhaltigkeit4.3tuHMS vs. dB(A)4.4Ordnungsspektrum4.5Einfluss der Messstrecke	 18 19 22 23 24
5	Zusammenfassung	27

Einleitung

Die Verbrennungsgeräusche von Benzin- und Dieselmotoren sind breitbandig. Elektrische Antriebe erzeugen dagegen sehr schmalbandige Geräusche, die häufig im hörbaren Frequenzbereich liegen. Dies stellt die Fahrzeugakustik vor neue Herausforderungen. Um den Fahrkomfort sicherzustellen, müssen Methoden zur Verfügung stehen, die eine Analyse und Bewertung des Innenraumgeräusches von Elektrofahrzeugen entsprechend der menschlichen Wahrnehmung ermöglichen. Die tonalen Geräuschanteile müssen dabei besonders berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird die Tonhaltigkeitsanalyse nach dem Gehörmodell von Prof. Sottek von Head Acoustics getestet. Diese berechnet unter Verwendung der Lautheit und der menschlichen Hörschwelle die Tonhaltigkeit von stationären sowie instationären Geräuschen. Die Berechnung basiert auf den Frequenzgruppen des menschlichen Gehörs. Aufgrund der Einbeziehung dieser psychoakustischen Größen, ist eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit der subjektiven Wahrnehmung gegeben. Ziel der Arbeit ist es, die Funktionsweise der Analyse zu skizzieren und ihre Eignung für die Untersuchung elektrischer Antriebsgeräusche zu beurteilen.

Es werden dazu Innenraumgeräuschmessungen mit vier vollelektrischen Fahrzeugen in verschiedenen Fahrzuständen durchgeführt. Die Mikrophone befinden sich an den Ohrpositionen des Beifahrers. Zusätzlich wird das Drehzahlsignal mit einem optischen Sensor am rechten Vorderrad aufgezeichnet. Die Messungen sind in Kapitel 2 beschrieben.

Zur Auswertung wird die Software ArtemiS Suite von Head Acoustics benutzt. Hier werden alle Berechnungen durchgeführt. Neben der Tonhaltigkeit wird das Frequenzspektrum über der Zeit mithilfe der Fouriertransformation, der A-bewertete Schalldruckpegel und das Ordnungsspektrum berechnet. Die verwendeten Analysen und die getroffenen Einstellungen werden in Kapitel 3 beschrieben.

Um die Eignung der Tonhaltigkeitsanalyse beurteilen zu können, werden die Ergebnisse der verschiedenen Analysen miteinander verglichen und diskutiert. Dabei wird insbesondere der Einzahlwert untersucht, den die Tonhaltigkeitsanalyse liefert. Dieser beschreibt wie tonal das Gesamtgeräusch empfunden wird. Die Diskussion der Ergebnisse ist anhand von ausgewählten Beispielen in Kapitel 4 ausgeführt.

2

Messung: Ablauf und Aufbau

Die Daten für die Untersuchung der Analyse-Methoden wurden aus einer Messreihe mit vier vollelektrischen Fahrzeugen gewonnen. Es wurde das Geräusch im Fahrzeuginnenraum an den Ohren des Beifahrers gemessen. In diesem Kapitel werden die verwendeten Fahrzeuge, die Messtechnik und der Messaufbau vorgestellt.

Die Messungen wurden auf einer asphaltierten Geraden durchgeführt. Dabei wurden Beschleunigung, Rekuperation und Konstantfahrt gemessen. Informationen zur Messstrecke und zu den durchgeführten Fahrmanövern befinden sich am Ende des Kapitels.

2.1 Messfahrzeuge

Die Messung des Innenraumgeräusches wurden bei folgenden vier Fahrzeugen durchgeführt (siehe Abbildung 2.1): Audi etron, Jaguar iPace, Tesla Model 3 Performance und Tesla Model X. Bei allen Fahrzeugen handelt es sich um vollelektrische Fahrzeuge mit Allradantrieb. Es befindet sich jeweils ein elektrischer Antriebsstrang - bestehend aus einem Elektromotor und einem Getriebe mit festem Übersetzungsverhältnis - an der Vorderachse und einer an der Hinterachse.



(a) Audi etron

(b) Jaguar iPace



(c) Tesla Model 3 Performance

(d) Tesla Model X



Die Fahrzeuge bieten unterschiedliche Einstellmöglichkeiten in Bezug auf Beschleunigung und Rekuperation. Tabelle 2.1 zeigt die vermessenen Einstellungen. Der Jaguar iPace bietet als einziges Fahrzeug in dieser Versuchsreihe die Möglichkeit, ein künstliches Motorgeräusch im Innenraum zu aktivieren. Die Intensität dieses Geräusches kann kontinuierlich zwischen *comfort* und *dynamic* eingestellt werden. Die Messung wurde mit den beiden Extremen dieser Skala durchgeführt.

Die Lüftung und Klimatisierung der Fahrzeuge wurde für die Messungen vollständig ausgeschaltet. Alle Fenster und Türen wurden geschlossen. Der Batteriestand der Fahrzeuge lag zu Beginn der Messungen bei 80% - 90%. Aufgrund der kurzen Fahrmanöver ist er im Laufe der Messung nur um wenige Prozentpunkte gefallen.

Fahrzeug	Beschleunigung	Rekuperation	aktiver Innenraumsound
Audi etron	sportlich	maximal	-
Jaguar iPace	Komfort	Hoch	comfort, dynamic
Tesla Model 3	Sport, lässig	Standard	-
Tesla Model X	Standard	Standard	-

Tabelle 2.1: Fahrzeugeinstellungen

2.2 Messtechnik

Die Messungen wurden mit dem portablen Messgerät *SQuadriga II* von Head Acoustics durchgeführt. Das Gerät ist batteriebetrieben und geräuschlos und somit bestens für den mobilen Einsatz zur Geräuschmessung im Fahrzeuginnenraum geeignet. Zur Aufnahme wurde das zugehörige Headset *BHS II* von Head Acoustics verwendet. Dieses enthält an beiden Seiten ein nach außen gerichtetes Mikrophon mit Windschutz und ermöglicht somit eine binaurale Aufnahme an den Ohrpositionen. Die Gerätekombination aus *SQuadriga II* und *BHS II* ist in Abbildung 2.2(a) dargestellt.

Direkt vor Messbeginn wurde der Messaufbau mit einem Kalibrator von Brüel & Kjær kalibriert. Dazu wurde der mitgelieferte ¹/4" Adapter des BHS II von Head Acoustics verwendet. Der Korrekturwert von 0,5 dB [1, S. 52] aufgrund der Pegelüberhöhung durch den Adapter wurde berücksichtigt. Abbildung 2.2(b) zeigt das BHS II mit abgenommenem Windschutz und den Kalibrator mit Adapter.

Zur Messung der Drehzahl wurde ein optischer Sensor (Rotlicht-Diode) der Firma Baumer verwendet. Dieser ist in Abbildung 2.2(c) dargestellt. Die Diode befindet sich in der schwarzen Box, das Licht tritt am Ende des Kabels (LWL) aus. Das Kabel endet in einem Metallstück mit Außengewinde, das im Abstand von ca. 1 cm vor dem rotierenden Gegenstand befestigt wird, dessen Drehzahl gemessen werden soll.

Da die Diode über das Messgerät nicht mit Spannung versorgt werden kann, wird eine 12 V Batterie zwischen SQuadriga und Diode geschaltet. Abbildung 2.2(d) zeigt das modifizierte Kabel mit der zwischengeschalteten Batterie. Der obere Stecker wird mit der Diode verbunden, der untere mit dem SQuadriga.

Tabelle 2.2 listet die verwendete Messtechnik auf.

Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer	Beschreibung
HEAD Acoustics	SQuadriga II	33202042	Messgerät
HEAD Acoustics	BHS II	33221630	Binaurales Headset
Baumer	Rotlicht-Diode	$12\mathrm{P}6410/\mathrm{S}35\mathrm{A}$	Drehzahlsensor
Siga	Phaeton AGM		12V Batterie
Brüel & Kjær	Sound Calibrator Type 4231	3025093	Kalibrator

 $Tabelle \ 2.2: \ Verwendete \ Messtechnik$

Abbildung 2.2(e) zeigt die Anschlüsse des SQuadriga II. Das BHS II Mikrophon-Headset wird am dafür vorgesehenen Eingang *BHS Headset* angeschlossen. Der optische Sensor wird mit dem linken Pulseingang (*Pulse In L*) verbunden.

Alle wesentlichen Geräteeinstellungen gehen aus der Messansicht des SQuadriga-Bildschirms hervor. Er ist in Abbildung 2.2(f) dargestellt. Die Messungen wurden mit einer Auflösung von 24 bit und einer Samplerate von 48 kHz durchgeführt. Für das angeschlossene BHS II Headset wird von Head Acoustics die Einstellung ICP/HP36 empfohlen [2, S. 21]. Dies stellt die Spannungsversorgung der beiden ICP Mikrophone im Headset sicher und ist mit einem Hochpassfilter bei 36 Hz auf das BHS II abgestimmt. Für die auftretenden Pegel im Fahrzeuginnenraum wurde die Input-Range (Dynamik) auf 104 dB gesetzt. Außerdem wurde der linke Pulskanal (PL) aktiviert, um dort das Drehzahlsignal aufzuzeichnen. Die aktuelle Drehzahl wird dann rechts unten im Bildschirm angezeigt.



(a) Messgerät $SQuadriga \ II$ und Mikrophon-Headset $BHS \ II$



(c) Diode zur optischen Drehzahlmessung

(e) Anschlüsse des SQuadriga II



(b) Kalibrator mit Adapter für BHS II Headset



(d) Spannungsversorgung der Diode



(f) Einstellungen SQuadriga II

Abbildung 2.2: Verwendete Messtechnik

2.3 Messaufbau

Mikrophon-Headset und Drehzahlsensor werden mit dem SQuadriga Messgerät verbunden. Für das Headset wird der gekennzeichnete BHS Headset Eingang verwendet, für den Drehzahlsensor der linke Pulskanal. Die Spannungsversorgung des Drehzahlsensors wird über eine 12V-Batterie sichergestellt. Die Messung wird vom Beifahrer durchgeführt. Dieser bedient die Messtechnik und trägt das Headset. Das Innenraumgeräusch wird also an den Ohren des Beifahrers gemessen.

Die Herausforderung beim Aufbau der Messtechnik liegt in der Anbringung des Drehzahlsensors. Zur besseren Zugänglichkeit wird das Fahrzeug für die Installation auf eine Rampe am Rande der Teststrecke gestellt. Da sich das Messgerät am Beifahrersitz befindet, wird der Sensor vorne rechts am Fahrzeug angebracht. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn der Sensor von innen gegen die Felge ausgerichtet wird (siehe Abbildung 2.3). Der Sensor wird dazu mit Klebeband an der Radaufhängung befestigt. An der Felge wird ein schwarzer Streifen Klebeband angebracht. Somit enthält das Signal des optischen Sensors genau einen Puls pro Radumdrehung und kann im Messgerät dekodiert werden. Bei dunklen Felgen muss ein weißer Streifen verwendet werden.

Trotz mehrfacher Nachjustierung des Sensors konnte nicht bei allen Fahrzeugen ein stabiles Drehzahlsignal aufgezeichnet werden. Bei Messungen an konzerneigenen Fahrzeugen ist ein stabiler Abgriff der Fahrzeugdaten jedoch einfach möglich. Die Drehzahl kann dann direkt im Fahrzeuginnenraum mit dem SQuadriga über eine Bus-Schnittstelle aufgezeichnet werden.



Abbildung 2.3: Anbringung des Drehzahlsensors am rechten Vorderrad von innen gegen die Felge. Das Fahrzeug steht zur besseren Zugänglichkeit auf einer Rampe.

2.4 Messstrecke

Die Messungen wurden auf der onroad Strecke des G-Class Experience Centers in Feldkirchen bei Graz durchgeführt. Das asphaltierte Streckenoval besteht zur Hälfte aus altem, teilweise beschädigtem, rauhen Asphalt und zur anderen Hälfte aus glattem Asphalt, der im Jahr 2019 neu aufgetragen wurde. Ein schematischer Streckenplan ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die Strecke enthält zwei Geraden von jeweils 200 m Länge. Eine befindet sich im Bereich des rauhen Asphalts (siehe Abbildung 2.5(a)) und eine im Bereich des glatten Asphalts (siehe Abbildung 2.5(b)). Ein direkter Vergleich an der Schnittstelle der beiden Fahrbahnbeläge ist in Abbildung 2.6 gezeigt.

Die Messungen wurden bei trockenen und windstillen Wetterbedingungen durchgeführt. Die Fahrbahn war bei allen Messungen trocken.



Abbildung 2.4: Streckenplan Messgelände



(a) Gerade rauh



(b) Gerade glatt





Abbildung 2.6: Vergleich Fahrbahnbelag rauh-glatt

2.5 Fahrmanöver

Das Innenraumgeräusch wurde in verschiedenen Fahrzuständen gemessen. Diese sind nachfolgend beschrieben und in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Alle Messungen wurden auf der 200 m langen Geraden mit glattem Asphalt durchgeführt, um das Abrollgeräusch zu minimieren und den Fokus auf die Geräusche des elektrischen Antriebsstranges zu legen. Die Konstantfahrtmessungen wurden zusätzlich auf der rauhen Geraden durchgeführt, um den Einfluss des Fahrbahnbelags auf die Innenraumgeräuschmessung beurteilen zu können.

- **Beschleunigung** Es wurde eine Volllastbeschleunigung aus dem Stillstand durchgeführt. Das Gaspedal wurde während des gesamten Beschleunigungsvorgangs voll durchgedrückt. Die Maximalgeschwindigkeit war aufgrund der Streckenlänge auf ca. 90 km/h begrenzt. Gemessen wurde vom Drücken des Gaspedals bis zum Umsteigen auf die Bremse am Ende der Gerade. Die Messzeit und die erreichte Geschwindigkeit variieren aufgrund der unterschiedlichen Motorleistung der Fahrzeuge.
- **Rekuperation** Um das Rekuperationsgeräusch aufzunehmen, wurde das Fahrzeug in der höchsten Rekuperationsstufe ohne Verwendung des Bremspedals verzögert. Bei manchen Fahrzeugen wird diese Einstellung auch *regeneratives Bremsen* genannt. Der Ausrollvorgang wurde bei allen Fahrzeugen mithilfe der Limiter-Funktion für die Geschwindigkeit exakt bei 70 km/h begonnen. Da die Kurve vor der Geraden nur mit ca. 50 km/h durchfahren werden kann, wurde zu Beginn der Geraden bis auf 70 km/h beschleunigt und anschließend das Gaspedal losgelassen. Bei der Startgeschwindigkeit von 70 km/h konnten alle Fahrzeuge innerhalb der 200 m langen Gerade bis zum Stillstand bzw. bis zur Minimalgeschwindigkeit verzögert werden. Manche Fahrzeuge erreichen ohne Verwendung des Bremspedals nie den Stillstand, sondern verbleiben bei einer Endgeschwindigkeit von ca. 5 km/h.

Die Messung beginnt mit dem Loslassen des Gaspedals bei 70 km/h und endet bei Fahrzeugstillstand. Bei den Fahrzeugen, die den Stillstand durch Rekuperation nicht erreichen, wurde die Messung nachträglich zugeschnitten. Ein klares Messende ist hier schwierig zu definieren.

Konstantfahrt Es wurden Messungen bei den konstanten Geschwindigkeiten 30/50/70 km/h durchgeführt. Höhere Geschwindigkeiten waren aufgrund der kurzen Messstrecke nicht möglich. Zur Einhaltung der Geschwindigkeit wurde die Tempomatfunktion verwendet. Da die Kurven nur mit ca. 50 km/h durchfahren werden können, musste bei der 70 km/h Messung der Beginn der Geraden noch zum Beschleunigen genutzt werden. Die Messung beginnt mit Erreichen der 70 km/h und endet kurz vor der Kurve, da abgebremst werden muss. Für die 70 km/h Messung verbleibt somit eine Messzeit von 7-8 Sekunden. Bei den niedrigeren Geschwindigkeiten kann das gesamte Messoval mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren werden. Die Messung läuft dann jeweils über die gesamte Gerade.

Manöver	Beschreibung	Ort
Beschleunigung	090 km/h, Volllast	Gerade glatt
Rekuperation	700 km/h, max. Rekuperation	Gerade glatt
Konstantfahrt	30/50/70 km/h (Tempomat)	Gerade glatt, Gerade rauh

Tabelle 2.3: Fahrmanöver

3

Auswertung: Software und Analysen

In diesem Kapitel wird die Software ArtemiS Suite vorgestellt. Zur Untersuchung des Innenraumgeräusches wird die Tonhaltigkeit nach dem Gehörmodell von Prof. Sottek, das Frequenzspektrum über der Zeit mithilfe der Fouriertransformation, der A-bewertete Schalldruckpegel und das Ordnungsspektrum ausgewertet. Alle verwendeten Analysen werden mit den getroffenen Einstellungen in diesem Kapitel beschrieben.

3.1 ArtemiS Suite

Zur Auswertung der Messdaten wurde die Software ArtemiS Suite von Head Acoustics verwendet. In Abbildung 3.1 ist ein Screenshot des sogenannten Pool-Projektes dargestellt, das für die Auswertungen angelegt wurde. Der Aufbau des Projektes wird im Folgenden beschrieben.

In der ersten Spalte befinden sich die Messdaten. Diese werden zu Beginn in das Projekt importiert und können anschließend umbenannt und strukturiert werden. Diese Struktur verändert die Dateien im Originalverzeichnis nicht. Es wurde jeweils ein Ordner für jedes Fahrmanöver angelegt. Dieser enthält für jedes Fahrzeug bzw. jede Fahrzeugkonfiguration eine .hdf Datei mit den aufgezeichneten Kanälen. Jeder Kanal kann einzeln für die Auswertung ausgewählt werden.

Die zweite Spalte beinhaltet die verwendeten Analysen. Die Analysen können einzeln oder gleichzeitig ausgewählt werden und werden jeweils auf die aktuell ausgewählten Messdaten angewendet. Die Analysen können genauso wie die Messdaten in Ordnern strukturiert werden. Hier wurde ein Ordner *Einzahlwerte* angelegt, in dem sich alle Analysen befinden, die nur einen Einzahlwert liefern. Die verwendeten Analysen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

In der dritten Spalte wird das Ziel der Auswertungsergebnisse festgelegt. Der Data Viewer erzeugt ein Diagramm zur Visualisierung der berechneten Ergebnisse. Zur Beschriftung der Diagramme und Legenden kann auf die Datei- und Ordnernamen aus der ersten Spalte zugegriffen werden. Ist das Berechnungsergebnis ein Einzahlwert, bietet sich das Ziel *Einzahlwerte in Excel* an. Die Einzahlwerte mehrerer Messdaten können so in einer gemeinsamen Tabelle als neues Excel-Dokument exportiert werden. Mit dem Ziel *Wave* können die Mikrophonsignale als .wav Dateien exportiert werden.

Die vierte Spalte ist das Eigenschaftsfenster. Wird eine Messdatei, eine Analyse oder ein Ziel angeklickt, erscheinen in diesem Fenster die dazugehörigen Einstellungen. In Abbildung 3.1 sind beispielhaft die Einstellungen der Analyse Spezifische Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit dargestellt.

Für alle Elemente und Einstellungen steht ein umfangreiches Hilfesystem zur Verfügung, auf das für weitere Informationen verwiesen wird.



Abbildung 3.1: Screenshot der Analysesoftware ArtemiS Suite

3.2 Tonhaltigkeit (Gehörmodell)

Elektromotoren erzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren sehr schmalbandige Geräusche. Diese können bei gleicher Lautstärke deutlich störender sein als breitbandiges Rauschen. Daher ist zur Beurteilung des Innenraumgeräusches von Elektrofahrzeugen eine besondere Betrachtung der tonalen Geräuschanteile notwendig. In dieser Arbeit wird eine entsprechende Analyse aus dem Lizenzpaket ASM 16 von Head Acoustics getestet.

Die Analyse Spezifische Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit bestimmt gehörspezifisch für jede Frequenzgruppe entsprechend der Bark Skala einen Wert für die Tonhaltigkeit über der Zeit. Basis ist das Gehörmodell von Prof. Sottek. Das Ergebnis ist ein 3D Diagramm: Tonhaltigkeit in Abhängigkeit von Frequenz und Zeit. Zusätzlich wird ein Einzahlwert für die Gesamttonhaltigkeit des Geräusches angegeben. Die Einheit der Tonhaltigkeit ist tuHMS (tonality unit hearing model Sottek). Als Schwellenwert für berichtenswerte Tonhaltigkeit wird 0,4 tuHMS definiert [3].

Im Folgenden wird die Analyse kurz vorgestellt. Weitere Informationen finden sich in [4] und im Standard ECMA-74 [3, Anhang G], in dem das Berechnungsverfahren vollständig beschrieben ist.

Frequenzauflösung Eine Frequenzgruppe wird im menschlichen Gehör gemeinsam ausgewertet. Für tiefe Frequenzen bis ca. 500 Hz beträgt die Frequenzgruppenbreite ca. 100 Hz. Bei höheren Frequenzen entsprechen die Frequenzgruppen etwa der Breite einer kleinen Terz (Frequenzverhältnis ⁶/₅). Die Frequenzauflösung ist daher frequenzabhängig. Dieses Phänomen ist ausführlich in [5] beschrieben.

Im Rechenmodell der Tonhaltigkeitsanalyse werden die Frequenzgruppen durch die Gleichungen 3.1 und 3.2 beschrieben. F(z) bezeichnet die Mittenfrequenz und $\Delta f(z)$ die Bandbreite der Frequenzgruppe mit dem Bark-Wert z. Die Frequenzgruppen werden mit einer Überlappung von 50 % - also einer Schrittweite von $\Delta z = 0,5$ berechnet. Die errechneten Tonhaltigkeitswerte haben somit den Frequenzabstand einer halben Frequenzgruppe und werden jeweils der Mittenfrequenz der zugehörigen Frequenzgruppe zugeordnet. Tabelle 3.2 zeigt die Frequenzgruppen entsprechend des Rechenmodells der Tonhaltigkeitsanalyse. Das Modell erweitert die Obergrenze der Bark-Skala von z = 24 auf Werte bis z = 26, 5, um den Frequenzbereich bis ca. 20 kHz abzudecken. Die Untergrenze $f_u(z)$ und die Obergrenze $f_o(z)$ einer Frequenzgruppe ergeben sich aus den Gleichungen 3.3. Die Frequenzwerte sind auf ganze Zahlen gerundet.

$$\Delta f(f=0) = 81,9289 \, Hz \quad , \quad c=0,1618$$

$$F(z) = \frac{\Delta f(f=0)}{c} \sinh(cz) \tag{3.1}$$

$$\Delta f(z) = \sqrt{\left(\Delta f(f=0)\right)^2 + \left(cF(z)\right)^2} \tag{3.2}$$

$$f_u(z) = F(z) - \frac{\Delta f(z)}{2} \quad , \quad f_o(z) = F(z) + \frac{\Delta f(z)}{2}$$
 (3.3)

Zeitauflösung Das Verfahren beruht auf der Auswertung der Autokorrelation des Messsignals für jede Frequenzgruppe. Aus Gründen der Recheneffizienz wird die Autokorrelation mithilfe einer FFT berechnet. Da die Frequenzgruppen unterschiedlich breit sind, werden unterschiedliche FFT Blocklängen verwendet, beginnend mit 8192 Samples in der untersten Frequenzgruppe bis zu 1024 Samples bei den oberen Frequenzgruppen. Tabelle 3.1 ist aus [3, Tabelle G.1] entnommen und zeigt die verwendete FFT Blocklänge für jede Frequenzen gruppe. Die Überlappung beträgt immer 75%. Daraus ergibt sich bei hohen Frequenzen mit einer Blocklänge von 1024 Samples und einer Abtastrate von 48 kHz eine Zeitauflösung von 21,3 ms. Die Überlappung von 75% führt zu Zeitwerten im Abstand von 5,3 ms. In den tieferen Frequenzgruppen ist die Zeitauflösung aufgrund der größeren Blocklänge entsprechend geringer. Durch Resampling wird die Zeitbasis an die der hohen Frequenzen angepasst, sodass in jeder Frequenzgruppe alle 5,3 ms ein Tonhaltigkeitswert erhalten wird.

Frequenzgruppe	0,5-1,5	2-8	8,5 - 12,5	≥ 13
Blocklänge FFT	8192	4096	2048	1024

Tabelle 3.1: Frequenzabhängige Blocklängen der FFT

- Wertebereich Die Berechnung der Tonhaltigkeit beruht auf der Lautheit tonaler Komponenten in jeder Frequenzgruppe. Es ergibt sich daher wie bei der Lautheit der Wertebereich $[0, \infty]$. Die Skala wird durch einen Ton bei 1 kHz mit einem Schalldruckpegel von 40 dB kalibriert. Die Tonhaltigkeit dieses Signals beträgt 1 tuHMS.
- **Einzahlwert** Der Einzahlwert für die Tonhaltigkeit des untersuchten Geräusches ergibt sich aus dem frequenz- und zeitabhängigen Verlauf folgendermaßen:
 - 1. Für jeden Zeitpunkt wird die maximale Tonhaltigkeit aus allen betrachteten Frequenzgruppen bestimmt.
 - 2. Es wird der zeitliche Mittelwert dieser Maxima gebildet.

Der Einzahlwert wird im 3D Diagramm angezeigt. Für einen direkten Export der Einzahlwerte mehrerer Messdaten bietet sich jedoch die 2D Analyse *Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit* an. Diese basiert auf demselben Rechenmodell, stellt jedoch für jeden Zeitpunkt nur die maximale Tonhaltigkeit aus allen betrachteten Frequenzgruppen dar. In den Einstellungen gibt es hier die Option *Ergebnis nur als Einzahlwert*. Es wird derselbe Einzahlwert als zeitlicher Mittelwert der Frequenzgruppenmaxima erhalten. Allerdings lassen sich so mehrere Einzahlwerte in einer gemeinsamen Tabelle exportieren und das Erzeugen der Diagramme kann vermieden werden.

Analyseeinstellungen Da in [3] bereits alle wesentlichen Parameter wie beispielsweise FFT-Blocklänge und Überlappung eindeutig festgelegt sind, sind beim Ausführen der Analyse in ArtemiS Suite kaum Einstellungen nötig. Neben der Version des Standards (hier 17. Auflage) stellt der zu untersuchende Frequenzbereich die einzige berechnungsrelevante Eingabe dar. Die Frequenz- und Zeitauflösung können nicht beeinflusst werden und entsprechen immer den festgelegten Werten.

Der Parameter Maximum an Zeitwerten beeinflusst die Berechnung nicht. Er dient lediglich dazu, die graphische Darstellung der Ergebnisse zu beschleunigen, indem benachbarte Zeitwerte zusammengefasst werden. Um die maximal mögliche Zeitauflösung bei der Darstellung zu erhalten, wurde der Wert auf 5000 gesetzt. Da die Analyse Zeitwerte im Abstand von 5,3 ms liefert, können mit 5000 Zeitwerten Aufnahmen bis maximal 26,7 Sekunden Länge in voller Auflösung dargestellt werden. Dies ist für die vorhandenen Messdaten ausreichend.

Frequenzbereich Der zu untersuchende Frequenzbereich ist aufgrund der Standardisierung aller weiteren Parameter die einzige berechnungsrelevante Benutzereingabe. Da die Analyse jedoch auf den Frequenzgruppen basiert, weicht der tatsächlich für die Berechnung verwendete Frequenzbereich in der Regel von den angegebenen Werten ab. Aus dem eingegebenen Frequenzbereich $[f_{min}, f_{max}]$ werden die relevanten Frequenzgruppen $[z_{min}, z_{max}]$ mithilfe der Gleichungen 3.4 und 3.5 bestimmt. Der tatsächlich verwendete Frequenzbereich $[f'_{min}, f'_{max}]$ ergibt sich mit den Gleichungen 3.6 aus der Untergrenze der untersten Frequenzgruppe und der Obergrenze der obersten Frequenzgruppe.

In dieser Arbeit wird der Frequenzbereich von [100 Hz, 5000 Hz] betrachtet. Die Analyse beinhaltet daher die Frequenzgruppen [1, 18,5]. Der tatsächlich ausgewertete Frequenzbereich ergibt sich aus der unteren Grenze der ersten Frequenzgruppe und der oberen Grenze der 18,5-ten Frequenzgruppe zu [41 Hz, 5448 Hz].

$$z_{min} = \min_{z} \left\{ 0, 5 \le z \le 26, 5 \mid f_{min} < \frac{F(z) + F(z+0,5)}{2} \right\}$$
(3.4)

$$z_{max} = \max_{z} \left\{ 0, 5 \le z \le 26, 5 \mid f_{max} > \frac{F(z) + F(z - 0, 5)}{2} \right\}$$
(3.5)

$$f'_{min} = f_u(z_{min}) \quad , \quad f'_{max} = f_o(z_{max})$$
(3.6)

Frequenzgruppe	Mittenfrequenz	Bandbreite	Untergrenze	Obergrenze
z	F(z)	$\Delta f(z)$	$f_u(z)$	$f_o(z)$
[Bark]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
0.5	41	82	0	82
1	82	83	41	124
15	124	84	82	166
2,0	167	86	194	210
2 5	210	80	124	210
2,0	210	02	210	200
25	200	92	210	250
3,5	251	95	200	401
4	301	100	301	401
4,0 E	402	105	300	404 E11
0 F F	400	110	401	011 571
5,5	512	117	454	571
0	013	124	511	034
0,5	030	132	570	702
	704	140	634	774
7,5	777	150	702	852
8	854	161	774	935
8,5	938	172	851	1024
9	1027	185	934	1120
9,5	1123	199	1023	1223
10	1227	215	1119	1334
10,5	1338	231	1222	1454
11	1458	250	1333	1583
11,5	1588	270	1453	1723
12	1728	291	1583	1874
12,5	1880	315	1722	2037
13	2044	341	1873	2214
13,5	2221	369	2037	2405
14	2413	399	2213	2612
14,5	2620	432	2404	2836
15	2845	468	2611	3079
$15,\!5$	3088	506	2835	3341
16	3352	548	3078	3626
16,5	3637	594	3340	3934
17	3947	644	3625	4268
17,5	4282	698	3933	4631
18	4645	756	4267	5023
18,5	5039	819	4629	5448
19	5465	888	5021	5909
19,5	5928	963	5446	6409
20	6429	1043	5907	6951
20,5	6972	1131	6407	7538
21	7561	1226	6948	8174
21,5	8200	1329	7535	8864
22	8892	1441	8171	9612
22,5	9642	1562	8861	10423
23	10456	1694	9609	11303
23,5	11338	1836	10420	12256
24	12294	1991	11299	13290
24,5	13331	2158	12252	14410
25	14455	2340	13285	15625
25,5	15674	2537	14405	16942
26	16995	2751	15620	18371
26,5	18428	2983	16936	19919

 Tabelle 3.2: Frequenzgruppen entsprechend des Rechenmodells der Tonhaltigkeitsanalyse

3.3 FFT über Zeit

Bei der Fast Fourier Transformation (FFT) wird die spektrale Zusammensetzung eines Signals berechnet. Wenn das Signal dabei mithilfe einer Fensterfunktion in kleine Signalabschnitte unterteilt wird, ergibt sich ein Verlauf der spektralen Zusammensetzung über der Zeit. Dieser kann in einem 3D Diagramm dargestellt werden. Aus einem solchen Diagramm kann abgelesen werden, zu welchem Zeitpunkt, welche Frequenzkomponenten besonders stark im Signal vertreten sind.

Frequenz- und Zeitauflösung des Ergebnisses können nicht unabhängig voneinander festgelegt werden. Sie stehen in einem inversen Zusammenhang zueinander und werden durch die Wahl der Fensterlänge bestimmt. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde eine Länge von 4096 Samples gewählt. Daraus ergibt sich bei der vorliegenden Samplerate von 48 kHz eine Zeitauflösung von 85 ms und eine Frequenzauflösung von 11,7 Hz. Zur Fensterung wurde ein von-Hann-Fenster (hier *hanning*) mit einer Überlappung von 50 % verwendet. Die Frequenzspektren wurden unter Verwendung der A-Bewertung berechnet. Für eine umfassende theoretische Betrachtung der Fourier Transformation wird auf [6] verwiesen.

3.4 Pegel (A)

Die Analyse Pegel(A) in der ArtemiS Suite berechnet den mittleren A-bewerteten Schalldruckpegel eines Zeitsignals. Das Ergebnis ist ein Einzahlwert in Dezibel [dB(A)], der die menschliche Lautstärkeempfindung vereinfacht bei niedrigen Pegeln nachbildet.

Die A-Bewertung ist in der Industrie sehr verbreitet und kommt in zahlreichen Standards zur Anwendung, unter Anderem in der DIN ISO 5128 zu Innengeräuschmessungen in Kraftfahrzeugen [7]. Deshalb wird auch in dieser Arbeit die A-Bewertung verwendet. Grundlagen zum Thema Frequenzbewertung sind in [8] beschrieben.

3.5 Ordnungsspektrum

Bei rotierenden Maschinen steht die Frequenz des abgestrahlten Schalls häufig in Zusammenhang mit der Drehzahl der Maschine. Für die Geräuschanalyse bietet es sich deshalb an, den abgestrahlten Schall auf die Drehzahl zu beziehen. Die Vielfachen dieser Referenzdrehzahl werden als Ordnungen bezeichnet. In dieser Arbeit wird das Innenraumgeräusch auf die Drehzahl des vorderen Elektromotors bezogen. Der Begriff *Ordnung* bzw. *Motorordnung* bezeichnet daher Vielfache der Drehzahl des vorderen Elektromotors.

Das gemittelte Ordnungsspektrum ist ein 2D-Diagramm, in dem jeder Motorordnung der über die Messzeit gemittelte Schalldruckpegel zugeordnet wird. Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, welche Motorordnungen im Messsignal besonders stark hervortreten.

Zur Berechnung des Ordnungsspektrums ist ein stabiles Signal der Motordrehzahl notwendig. Da es sich bei den untersuchten Fahrzeugen um konzernfremde Fahrzeuge handelt, konnten die Fahrzeugdaten nicht direkt abgegriffen werden. Die Drehzahl wurde daher über einen Sensor am Rad erfasst und anschließend über das feste Übersetzungsverhältnis des Getriebes auf die Motordrehzahl umgerechnet. Die Umrechnung und Dekodierung des Pulssignals des optischen Sensors sind direkt in ArtemiS Suite möglich. Bei manchen Fahrzeugen ist es nicht gelungen ein stabiles Drehzahlsignal aufzuzeichnen.

Alle untersuchten Fahrzeuge sind mit zwei elektrischen Antriebssträngen ausgestattet. Bei manchen Fahrzeugen unterscheiden sich die Übersetzungsverhältnisse an der Vorderachse und

an der Hinterachse. Dies führt zu unterschiedlichen Motordrehzahlen der beiden Elektromotoren. Daher muss die Bezugsdrehzahl für die Ordnungsanalyse festgelegt werden. In dieser Arbeit wird die Ordnungsanalyse immer auf die Drehzahl des Elektromotors an der Vorderachse bezogen, da sich dieser näher an der Messposition (Beifahrer) befindet.

ArtemiS Suite bietet eine entsprechende Analyse mit dem Namen *Ordnungsspektrum* an. Damit kann direkt das gemittelte Ordnungsspektrum erzeugt werden. Diese Analyse ist jedoch im Lizenzpaket ASM 13 enthalten, das für diese Arbeit nicht zur Verfügung stand. Das Diagramm wurde daher unter Verwendung der verfügbaren Lizenzen nach folgendem Vorgehen erzeugt:

- Es wird ein 3D Diagramm *Ordnungsspektrum über Zeit* erstellt (Fensterfunktion: Hanning, Frequenzbewertung: A, Frequenzauflösung: 0,2 [Ordnung], Frequenzbereich: 0-30 [Ordnung]).
- Es werden Analysen-Schnitte entlang der Ordnungen im Abstand von 0,2 [Ordnung] angelegt. Das Ergebnis ist jeweils ein 2D-Diagramm mit dem SPL-Verlauf der entsprechenden Ordnung über der Zeit.
- Für jeden dieser Ordnungsschnitte wird der mittlere Schalldruckpegel als Einzahlwert exportiert.
- Aus den exportierten Werten wird das gemittelte 2D Ordnungsspektrum (zeitlich gemittelter A-bewerteter Schalldruckpegel über Ordnung) erzeugt.

Es konnte im Rahmen einer Demo-Volllizenz von Head Acoustics bestätigt werden, dass dieses Vorgehen exakt die gleichen Ergebnisse liefert, wie die Analyse *Ordnungsspektrum* in ArtemiS Suite. Für weiterführende Erläuterungen zur Ordnungsanalyse in ArtemiS Suite wird auf [9] verwiesen.

4

Diskussion: Eignung der Analyse-Methoden

Die Messdaten wurden mithilfe der in Kapitel 3 vorgestellten Analysen ausgewertet. In diesem Kapitel werden die Methoden anhand ausgewählter Beispiele verglichen und die Ergebnisse diskutiert.

Der Fokus liegt auf der Geräuschanalyse des elektrischen Antriebs. Deshalb wird für alle Auswertungen der linke Kanal (= linkes Beifahrerohr) verwendet. Diese Messposition befindet sich weiter in der Fahrzeugmitte und enthält deshalb weniger störende Wind- und Reifengeräusche.

Alle hier diskutierten Messdaten wurden als .wav Dateien exportiert. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der aufgezeigten Punkte wird stark empfohlen die Geräusche anzuhören.

4.1 3D: Tonhaltigkeit vs. FFT

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der beiden 3D Analysen Spezifische Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit und FFT über Zeit miteinander verglichen. Das mit der Fouriertransformation ermittelte Frequenzspektrum wurde mithilfe der A-Bewertung an die menschliche Wahrnehmung angepasst. Die erzeugten Diagramme sind am Beispiel der Rekuperation des Audi etron in Abbildung 4.1 dargestellt. In beiden Darstellungen ist die Frequenzachse logarithmisch und die Zeitachse linear skaliert. Die hervortretenden Motorordnungen bilden daher nach unten gekrümmte Linien.

In beiden Diagrammen können die relevanten Motorordnungen identifiziert und mithilfe des Ordnungscursors abgelesen werden. Im Diagramm der Tonhaltigkeitsanalyse (Abbildung 4.1(a)) werden die tonalen Signalkomponenten sehr deutlich hervorgehoben. Dies führt zu einem klaren Fokus auf die relevanten Ordnungslinien. Das Diagramm der FFT-Analyse (Abbildung 4.1(b)) beinhaltet dagegen auch breitbandige Geräusche, besonders im Bereich von 100 Hz - 500 Hz. Diese sind für die Untersuchung der tonalen Geräuschkomponenten des elektrischen Antriebs nicht relevant.

Für die Untersuchung des elektrischen Antriebsgeräusches und die Darstellung der relevanten Motorordnungen ist das Diagramm der Tonhaltigkeitsanalyse deshalb besser geeignet.

Ein weiterer Vorteil der Tonhaltigkeitsanalyse ist der verfügbare Einzahlwert zur Quantifizierung der Tonhaltigkeit des Geräusches. Die Aussagekraft des Einzahlwerts wird im folgenden Abschnitt weiter untersucht.



Abbildung 4.1: Vergleich der 3D Analyseergebnisse (hier: Rekuperation Audi etron)

4.2 Einzahlwert Tonhaltigkeit

Die Analyse Spezifische Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit liefert zusätzlich zum zeitlichen Verlauf der Tonhaltigkeit in den einzelnen Frequenzgruppen einen Einzahlwert in der Einheit tuHMS. Dieser beschreibt wie tonal das Gesamtgeräusch empfunden wird. Der Einzahlwert entsteht durch zeitliche Mittelung der spektralen Maxima der spezifischen Tonhaltigkeit (siehe Abschnitt 3.2). In diesem Abschnitt wird die Aussagekraft des Einzahlwertes untersucht.

Abbildung 4.2 zeigt vergleichend die Beschleunigungsmessung (4.2(a)) und die Rekuperationsmessung (4.2(b)) des Audi etron. Zusätzlich zum errechneten Einzahlwert der Analyse ist in den Diagrammen der Maximalwert der Tonhaltigkeit markiert. Das Rekuperationsgeräusch wurde subjektiv während der Messung als deutlich tonaler und störender empfunden als das Beschleunigungsgeräusch. Diese Empfindung wird von der Analyse im 3D Diagramm auf den ersten Blick dargestellt und spiegelt sich auch in den Einzahlwerten wider. Der tonale Charakter der Messungen kann in diesem Beispiel anhand der Einzahlwerte (ohne 3D Diagramm) gut verglichen und quantifiziert werden. Die Werte erscheinen sinnvoll und aussagekräftig.

In Abbildung 4.3 sind die Beschleunigungsmessungen der beiden Tesla Fahrzeuge dargestellt. Anders als beim Audi etron treten hier kurzzeitige, sehr tonale Komponenten im tiefen Frequenzbereich um 100 Hz auf. Diese sind während der Messung subjektiv deutlich aufgefallen und können auch beim Anhören der Aufnahmen nachvollzogen werden. Das tieffrequente Maximum bei ca. 2,3 Sekunden im Model X lässt sich beispielsweise mit einer starken Vibration des Fahrzeugs in Verbindung bringen, die als sehr unangenehm empfunden wurde. Zur Optimierung des Fahrkomforts können diese Störungen gezielt weiter untersucht werden.

Die Beispiele der beiden Tesla Fahrzeuge zeigen, dass die Analyse auch schmalbandige Brummund Vibrationsgeräusche im tiefen Frequenzbereich zuverlässig aufzeigt. Die zeitliche und spektrale Information dieser kurzzeitigen Ereignisse geht im Einzahlwert verloren. Für eine Gesamtbeurteilung des Beschleunigungsgeräusches ist der Einzahlwert jedoch sinnvoll. Der hohe Wert des Model X entspricht dem subjektiven Empfinden.



Abbildung 4.2: Aussagekräftige Einzahlwerte der Tonhaltigkeitsanalyse



Abbildung 4.3: Schmalbandige Brumm- und Vibrationsgeräusche im tiefen Frequenzbereich werden durch die Tonhaltigkeitsanalyse aufgezeigt. Der Einzahlwert entspricht dem subjektiven Gesamteindruck.

Einfluss von Messbeginn und Messende:

Da der Einzahlwert auf einer zeitlichen Mittelung basiert, beeinflusst die Wahl von Messbeginn und Messende bei instationären Geräuschen (z.B. Beschleunigung, Rekuperation) den Einzahlwert. Um den Einzahlwert für Vergleiche heranziehen zu können ist deshalb eine einheitliche Definition der Start- und Endbedingungen notwendig. Für die Fahrmanöver Beschleunigung und Rekuperation kommen folgende drei Möglichkeiten in Frage:

- **Gleiche Messdistanz** Beginnend mit der gleichen Startgeschwindigkeit werden die Messungen alle über die gleiche Distanz durchgeführt. Die erreichte Endgeschwindigkeit und die Messzeit können somit variieren. Diese Variante wurde in der vorliegenden Arbeit gewählt, um die sehr kurze Messstrecke (ca. 200 m) für alle Fahrzeuge auszunutzen.
- **Gleiche Messzeit** Beginnend mit der gleichen Startgeschwindigkeit werden die Messungen alle über die gleiche Messzeit durchgeführt. Die erreichte Endgeschwindigkeit und die zurückgelegte Strecke können somit variieren. Das Zeitfenster muss an die verfügbare Messstrecke angepasst werden.

Um den Einfluss auf den Einzahlwert zu zeigen, wurde die Beschleunigungsmessung des Tesla Model 3 im Modus *lässig* aus Abbildung 4.3(a) um ca. 2,5 Sekunden auf die Länge der Beschleunigungsmessung des Model X (Abbildung 4.3(b)) gekürzt. Abbildung 4.4 zeigt den Vergleich dieser beiden Volllastbeschleunigungen mit gleicher Messzeit. Da das Beschleunigungsgeräusch des Model 3 nur in der ersten Sekunde eine deutlich tonale Komponente aufweist, steigt der errechnete Einzahlwert durch die Kürzung von 0,196 tuHMS auf 0,251 tuHMS an.

Gleiche Endgeschwindigkeit Beginnend mit der gleichen Startgeschwindigkeit werden die Messungen alle bis zum Erreichen der gleichen Endgeschwindigkeit durchgeführt. Die verstrichene Messzeit und die zurückgelegte Strecke können somit variieren. Für diese Variante ist es hilfreich, wenn die Geschwindigkeitsdaten im Fahrzeug direkt abgegriffen werden können. Die Messung kann dann nachträglich auf den genauen Geschwindigkeitsbereich zugeschnitten werden.

Bei Beschleunigungsmessungen ist zu beachten, dass die Endgeschwindigkeit so gewählt werden muss, dass sie vom Fahrzeug mit der niedrigsten Motorleistung auf der verfügbaren Strecke erreicht werden kann. Bei Rekuperationsmessungen ist zu beachten, dass manche Fahrzeuge ohne Betätigung der Bremse den Stillstand nicht erreichen.

Wenn Messbeginn und Messende einheitlich festgelegt werden, liefert der Einzahlwert der Tonhaltigkeitsanalyse aussagekräftige Ergebnisse. Er quantifiziert wie tonal ein Geräusch empfunden wird und ermöglicht übersichtliche Vergleiche verschiedener Geräusche. Für berichtenswerte Tonhaltigkeit instationärer Vorgänge existiert ein standardisierter Schwellenwert für den Einzahlwert von 0,4 tuHMS [3].



Abbildung 4.4: Vergleich von Beschleunigungsmessungen auf Basis gleicher Messzeit. Die Messung des Model 3 wurde im Vergleich zu Abbildung 4.3(a) auf die Messzeit des Model X gekürzt.

4.3 tuHMS vs. dB(A)

Der A-bewertete Schalldruckpegel hat sich als wichtige Angabe in vielen Messvorschriften durchgesetzt. In diesem Abschnitt wird der Einzahlwert der Tonhaltigkeit deshalb für verschiedene Messungen dem Einzahlwert des A-bewerteten Schalldruckpegels gegenübergestellt. Hiermit wird deutlich, dass mit dem Einzahlwert der Tonhaltigkeit wertvolle Informationen gewonnen werden. Es können Probleme aufgezeigt werden, die durch den Einzahlwert des A-bewerteten Schalldruckpegels nicht erkannt werden.

In Abbildung 4.5(a) sind die beiden Einzahlwerte für die Messungen am Audi etron gegenübergestellt. Vergleicht man Beschleunigung und Rekuperation so ist ersichtlich, dass das Ausrollen für die Rekuperationsmessung erwartungsgemäß einen geringeren Schalldruckpegel im Fahrzeuginnenraum erzeugt, als die Beschleunigungsfahrt. Das Geräusch bei der Rekuperation ist allerdings deutlich tonaler (wie bereits anhand der 3D Diagramme in Abschnitt 4.2 festgestellt wurde). Dies entspricht dem subjektiven Empfinden während der Messfahrt.

Beim Vergleich der drei Konstantgeschwindigkeiten auf glattem Asphalt zeigt der Pegel ebenfalls einen erwartungsgemäßen Verlauf: Je höher die Geschwindigkeit, desto höher ist der Pegel im Innenraum. Die Tonhaltigkeit zeigt dagegen eine überraschende Eigenheit des Audi etron auf. Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h entsteht ein deutlich tonales Geräusch, während bei Geschwindigkeiten von 30 km/h und 70 km/h eine sehr geringe Tonhaltigkeit vorliegt. Dieses durchgehend tonale Geräusch bei Konstantfahrt mit 50 km/h wurde von mehreren Testpersonen negativ beanstandet.

Die beiden weiteren Säulendiagramme zeigen das Verhalten von jeweils einem Fahrzeug mit zwei verschiedenen Fahrmodi bei Beschleunigung. Beim Jaguar iPace werden die minimale und die maximale Einstellung des aktiven Innenraumsounds verglichen (Abbildung 4.5(b)) und beim Tesla Model 3 die beiden Beschleunigungsmodi *lässig* und *Sport* (Abbildung 4.5(c)). In beiden Fällen wird deutlich, dass sowohl die Tonhaltigkeit als auch der Pegel des Geräuschs steigen. Wie aus den Messungen am Audi etron ersichtlich ist, ist dieser gleichläufige Zusammenhang allerdings keinesfalls selbstverständlich. **Achtung!** Für beide Werte gilt: Ein hoher Wert führt nicht zwangsläufig zu einer schlechten subjektiven Bewertung. Das beste Beispiel aus dieser Messreihe ist hierfür der aktive Innenraumsound des Jaguar iPace. Das aktiv erzeugte Geräusch hat sowohl einen höheren Pegel als auch eine höhere Tonhaltigkeit. Manchen Testpersonen hat es trotzdem - oder auch gerade deswegen - besser gefallen, als die Fahrt ohne aktiven Klang.



Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der Einzahlwerte für Tonhaltigkeit und Schalldruckpegel

4.4 Ordnungsspektrum

Das Ordnungsspektrum wird am Beispiel von Beschleunigung und Rekuperation des Audi etron diskutiert. Es ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Problematische Motorordnungen sind in diesem 2D Diagramm als Stellen der Maxima des zeitlich gemittelten A-bewerteten Schalldruckpegels erkennbar. Die Peaks bei Rekuperation in diesem Diagramm entsprechen dem zeitlichen Mittel der farblich hervorstechenden Ordnungslinien in den 3D Diagrammen aus Abbildung 4.1. Dort kann die Ordnung allerdings nur mit dem Ordnungscursor in ArtemiS Suite ausgelesen werden.

Die Höhe der Ordnungspeaks steht in Zusammenhang mit der ermittelten Tonhaltigkeit des Geräusches. Beim Audi etron wird die Tonhaltigkeit besonders durch die 10,5te Ordnung verursacht. Dieser Peak ist im Ordnungsspektrum bei Rekuperation höher als bei Beschleunigung, was mit dem ermittelten Tonhaltigkeitsunterschied zusammenpasst (siehe Abbildung 4.2).

Für eine Quantifizierung des tonalen Charakters ist das Ordnungsspektrum jedoch nicht geeignet. Für eine empfindungsgerechte Beurteilung müssen psychoakustische Größen wie Lautheit, Hörschwelle und Frequenzgruppen berücksichtigt werden, wie es in der Tonhaltigkeitsanalyse der Fall ist.

Das Ordnungsspektrum ist daher besonders für das schnelle Aufzeigen von problematischen Motorordnungen geeignet. Mit der Zuordnung eines Tonhaltigkeitsproblems zu einer Motorordnung kann anhand von Bauteilgeometrien die Herkunft des Geräusches ermittelt werden.



Abbildung 4.6: Ordnungsspektrum Audi etron

4.5 Einfluss der Messstrecke

Der Einfluss der Messstrecke wird anhand der Messungen mit 70 km/h Konstantfahrt diskutiert. In Abbildung 4.7 sind die Messungen auf glattem und auf rauhem Asphalt für alle Fahrzeuge gegenübergestellt. Es werden der Einzahlwert des A-bewerteten Schalldruckpegels und der Tonhaltigkeits-Einzahlwert betrachtet.

Bei der Betrachtung des Pegels (Abbildung 4.7(a)) ist ein eindeutiges Bild zu erkennen. Die Fahrzeuge weisen bauartbedingt unterschiedliche Pegel im Innenraum auf. Der Übergang von glattem zu rauhem Asphalt führt allerdings immer zu einer deutlichen Pegelerhöhung von $3-5 \,\mathrm{dB}(\mathrm{A})$.

Aus Abbildung 4.7(b) geht hervor, dass die Auswirkung eines Fahrbahnbelagwechsels auf die Tonhaltigkeit des Inneraumgeräusches dagegen sehr unterschiedlich sein kann. Beim Audi etron führt der rauhe Belag fast zu einer Verdoppelung der Tonhaltigkeit, während sich der Wert beim Jaguar iPace etwa halbiert. Bei den beiden Tesla Modellen zeigt der Fahrbahnbelag keinen wesentlichen Einfluss auf die Tonhaltigkeit.

Um die deutlichen Veränderungen im Einzahlwert der Tonhaltigkeit bei Belagwechsel nachvollziehen zu können, werden die zugehörigen 3D Diagramme betrachtet. Diese sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Der Vergleich der Abbildungen 4.8(a) und 4.8(b) zeigt, dass der erhöhte Tonhaltigkeits-Einzahlwert des Audi etron auf rauhem Asphalt durch das Auftreten schmalban-



Abbildung 4.7: Einfluss des Fahrbahnbelags bei 70 km/h Konstantfahrt

diger tieffrequenter Störungen verursacht wird. Diese können auf der Aufnahme gehört werden.

Die Abnahme des Tonhaltigkeits-Einzahlwertes auf rauhem Aspahlt beim Jaguar iPace lässt sich durch Vergleich der Diagramme 4.8(c) und 4.8(d) und Anhören der Aufnahme erkennen. Die festgestellte Tonhaltigkeit auf glattem Asphalt wird im Wesentlichen durch einen 200 Hz Ton verursacht. Dieser ist auf der Aufnahme – entsprechend des niedrigen Einzahlwertes – nur bei genauem Hinhören wahrnehmbar. Auf rauhem Asphalt entsteht – anders als beim Audi etron – ein breitbandiges Störgeräusch. Dieses überdeckt den 200 Hz Ton und reduziert somit den Einzahlwert der Tonhaltigkeit.

Der Fahrbahnbelag ist für die Innenraumgeräusch-Messung von großer Bedeutung. Für vergleichbare Ergebnisse müssen deshalb alle Messungen auf dem gleichen Belag durchgeführt werden.



Abbildung 4.8: Untersuchung der Tonhaltigkeitsunterschiede in Abbildung 4.7(b) bei Belagwechsel mit 70 km/h Konstantfahrt

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Tonhaltigkeitsanalyse nach dem Gehörmodell von Prof. Sottek von Head Acoustics anhand von vier vollelektrischen Fahrzeugen getestet. Dazu wurden Messungen mit dem mobilen Messgerät SQuadriga II von Head Acoustics durchgeführt. Zur Auswertung wurde die Software *ArtemiS Suite* von Head Acoustics verwendet. Untersucht wurde das Innenraumgeräusch an den Ohrpositionen des Beifahrers in den Fahrzuständen Beschleunigung, Rekuperation und Konstantfahrt. Beim Vergleich mit anderen Methoden hat sich gezeigt, dass die schmalbandigen Geräusche eines elektrischen Antriebes mit dem 3D Diagramm der Tonhaltigkeit und auch mit dem Tonhaltigkeits-Einzahlwert gut dargestellt werden können.

Die Berechnung der Tonhaltigkeit beruht auf psychoakustischen Größen wie der Lautheit, der Hörschwelle und den Frequenzgruppen des menschlichen Gehörs (Bark Skala). Dies führt zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen subjektiver Wahrnehmung und den ermittelten Werten. Mithilfe des Tonhaltigkeits-Einzahlwertes konnten deshalb subjektiv deutlich wahrnehmbare Probleme aufgezeigt werden, die aus anderen Analysen nicht so leicht ersichtlich waren.

Der einzige berechnungsrelevante Parameter der Tonhaltigkeitsanalyse ist der zu untersuchende Frequenzbereich. Da die Analyse auf den Frequenzgruppen des menschlichen Gehörs basiert, werden aus dem eingegebenen Frequenzbereich die relevanten Frequenzgruppen bestimmt. Der tatsächlich analysierte Frequenzbereich wird von den Grenzen dieser Frequenzgruppen gebildet und weicht daher im Allgemeinen etwas von dem eingegebenen Frequenzbereich ab.

Wird die Tonhaltigkeit in Abhängigkeit von Frequenz und Zeit in einem 3D Diagramm dargestellt, kann der zeitliche Verlauf der tonalen Signalkomponenten gut visualisiert werden. Die tonalen Komponenten und die relevanten Ordnungslinien werden hier wesentlich besser herausgehoben als in einem Spektrogramm, das mit der Analyse *FFT über Zeit* erzeugt wird.

Die Analyse berechnet außerdem für jedes Geräusch einen Tonhaltigkeits-Einzahlwert. Dieser ist das zeitliche Mittel der spektralen Tonhaltigkeitsmaxima und gibt an, wie tonal das Gesamtgeräusch empfunden wird. Dieser Einzahlwert eignet sich für übersichtliche Vergleiche mehrerer Geräusche und stimmt gut mit der subjektiven Empfindung überein. Für den Einzahlwert existiert ein standardisierter Schwellenwert für berichtenswerte Tonhaltigkeit von 0,4 tuHMS.

Mithilfe des Tonhaltigkeits-Einzahlwertes konnte beispielsweise ein störendes, tonales Geräusch des Audi etron bei Konstantfahrt mit 50 km/h aufgezeigt werden, das bei anderen Konstantgeschwindigkeiten nicht vorhanden ist. Wird der Einzahlwert der Tonhaltigkeit betrachtet, fällt dieser Fahrzustand deutlich auf. Der Einzahlwert des A-bewerteten Schalldruckpegels steigt dagegen mit steigender Geschwindigkeit an und lässt bei 50 km/h kein auffälliges Verhalten erkennen.

Da der Einzahlwert auf einer zeitlichen Mittelung basiert, müssen bei instationären Vorgängen Messbeginn und Messende einheitlich definiert werden. Für die Fahrmanöver Beschleunigung und Rekuperation kommt die Festlegung einer einheitlichen Messdistanz, Messzeit oder Endgeschwindigkeit in Frage. Das Manöver sollte in jeder Variante mit der gleichen Startgeschwindigkeit begonnen werden. Aus dem 3D Diagramm der Tonhaltigkeitsanalyse lässt sich mit dem Daten-Cursor die zugehörige Motorordnung einer tonalen Komponente auslesen, wenn das Drehzahlsignal mit aufgezeichnet wurde. Außerhalb der ArtemiS Suite kann die Ordnung aus dem Diagramm aber nicht abgelesen werden. Um einen Überblick über die relevanten Motorordnungen zu bekommen, ist deshalb die Analyse Ordnungsspektrum empfehlenswert. Sie erzeugt ein 2D Diagramm, in dem der mittlere Schalldruckpegel jeder Ordnung abgelesen werden kann. Die Spitzen in diesem Diagramm entsprechen dem zeitlichen Mittel der hervorstechenden Ordnungslinien im 3D Diagramm FFT über Zeit. In dieser Arbeit stand die dafür benötigte Lizenz nicht zur Verfügung, weshalb das Diagramm durch einen Umweg über die 3D Analyse Ordnungsspektrum über Zeit erzeugt wurde.

Für die Ordnungsanalyse wird ein stabiles Signal der Motordrehzahl benötigt. Wenn auf die Fahrzeugdaten zugegriffen werden kann, wird empfohlen die Drehzahl direkt abzugreifen. In dieser Arbeit musste ein Drehzahlsensor am Rad montiert werden. Damit konnte nicht bei allen Fahrzeugen ein stabiles Signal erhalten werden.

Es hat sich ein starker Einfluss des Fahrbahnbelags auf das Innenraumgeräusch gezeigt. Der Einzahlwert des A-bewerteten Schalldruckpegels ist beim Übergang von glattem auf rauhen Asphalt um 3-5 dB(A) gestiegen. Der Einzahlwert der Tonhaltigkeit zeigt je nach Fahrzeug einen starken Anstieg, einen starken Abfall oder ein Gleichbleiben bei Belagwechsel. Für vergleichbare Ergebnisse müssen deshalb alle Messungen auf dem gleichen Belag durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Head Acoustics, "BHS II Handbuch," Tech. Rep., 2019.
- [2] —, "SQuadriga II Konfiguration und Anwendung," Tech. Rep., 2018.
- [3] ECMA International, "Standard ECMA-74," Tech. Rep. December, 2019.
- [4] Head Acoustics, "Verwendung der neuen psychoakustischen Tonhaltigkeits-Analysen: Tonhaltigkeit (Gehörmodell)," Tech. Rep., 2018.
- [5] H. Fastl and E. Zwicker, Psychoacoustics Facts and Models, 3rd ed. Springer-Verlag, 2007.
- [6] A. V. Oppenheim, J. R. Buck, and R. W. Schafer, Discrete-time signal processing. Vol. 2. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [7] DIN ISO 5128, "Innengeräuschmessungen in Kraftfahrzeugen," 1984.
- [8] G. Müller and M. Möser, Taschenbuch der technischen Akustik. Springer-Verlag, 2013.
- [9] Head Acoustics, "Ordnungsanalyse in der ArtemiS SUITE," Tech. Rep., 2016.