Untersuchung der Klangcharakteristik von Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen

Masterarbeit

Alexander Ulz, BSc

Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Institut für Elektronische Musik und Akustik

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Sontacchi, IEM

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Rust, AVL List GmbH

Begutachter:

O.Univ.Prof. Mag.art. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Höldrich

Februar 2014

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am …… ……..
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

…… ……..
date (signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums und besonders bei der Erarbeitung und Dokumentation dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt meinen Betreuern, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Sontacchi (IEM) und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Rust (AVL), für die großartige Unterstützung und Begleitung in allen Phasen dieser Masterarbeit. Sie waren Rat- und Ideengeber sowie Informationsquellen und trugen so beide einen großen Teil zum Gelingen bei.

Daneben standen viele meiner KollegInnen in der Fachabteilung für Powertrain and Vehicle Acoustics der AVL List GmbH mit Rat und Tat zur Seite und nahmen sich Zeit für die Beantwortung meiner Fragen. Besonders erwähnt sei hier Ing. Werner Biermayer, der in vielen technischen Fragen wertvolle Ideen und Denkanstöße lieferte und natürlich Fachteamleiter Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Graf, der das Vertrauen in mich setzte, dieses Thema zu bearbeiten und der sowohl bei technischen als auch bei organisatorischen Fragen gerne ein offenes Ohr für mich hatte.

Ganz besonders Danke sagen möchte ich aber auch meiner Freundin Anita. Sie hat mich über mein gesamtes Studium hin begleitet und unterstützt und war immer da für mich, in allen Höhen und Tiefen. Mit einem schönen und glücklichen Zuhause ist auch die stressigste Zeit viel leichter zu bewältigen. Danke auch für die Unterstützung bei der Erstellung der Layouts und bei der Zitierung für die schriftliche Dokumentation der Masterarbeit.

Kurzfassung

Downsizing von Verbrennungsmotoren durch eine Reduzierung der Zylinderzahl bei gleichbleibender Leistung führt zu einem für die NutzerInnen neuen und ungewohnten Geräuschcharakter.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Geräuschcharakteristika von Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen zu untersuchen und in weiterer Folge die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Zylinderzahlen anhand von objektiven Bewertungsmethoden zu beschreiben. Die Untersuchungen werden anhand einer Datenbasis von Innengeräuschaufnahmen von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen mit Diesel- und Ottomotoren auf einer Teststrecke bei einer Volllastbeschleunigung im zweiten Gang durchgeführt.

Anhand von akustischen und psychoakustischen Bewertungsgrößen werden statistische Untersuchungen durchgeführt. Durch die Kombination von drei psychoakustischen Bewertungsgrößen wird ein Parameter zur Beschreibung des akustischen Komforts im Fahrzeuginnenraum entwickelt, anhand dessen eine statistische Unterscheidbarkeit der Gruppen von Fahrzeugen mit 3- und 4-Zylindermotoren gegeben ist, der aber auch eine Bewertung innerhalb einer Motorgruppe ermöglicht. Für weitere Untersuchungen werden aus der Musikalischen Akustik bekannte Methoden zur harmonischen Analyse und Beschreibung von Klangfarben angewandt. Dabei werden einerseits Intervallstrukturen in den Motorordnungsspektren analysiert und andererseits Klangfarbenbeschreibungen aus den Verhältnissen zwischen den als Teiltöne betrachteten Motorhauptordnungen bei unterschiedlichen Zylinderzahlen abgeleitet. Weitere Möglichkeiten zur Geräuschcharakterisierung und Unterscheidung von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen ergeben sich durch die Darstellung bestimmter Amplitudenverhältnisse zwischen den Motorordnungen.

Anhand der vorgestellten Bewertungsmethoden werden verschiedene Möglichkeiten zur Charakterisierung des Innengeräusches und zur Unterscheidung von Fahrzeugen mit 3- und 4-Zylindermotoren gezeigt. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der physikalischen Bedeutung und der praktischen Umsetzbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse.

Abstract

Downsizing of combustion engines by reduction of the number of cylinders leads to unusual acoustical perceptions and customer complaints.

The aim of this master thesis is to evaluate the sound character of cars with engines with low cylinder numbers and to describe the differences between different cylinder numbers using objective valuation methods. The investigations are carried out on a data base of interior noise recordings of full load run ups in 2nd gear on a test track for cars with 3 and 4 cylinder Diesel and Otto engines.

Various acoustic and psychoacoustic parameters are investigated by methods of statistics. Using three psychoacoustic parameters an index for the evaluation of acoustic comfort in the passenger compartment is developed which allows a statistical distinction of groups of cars with 3 and 4 cylinder engines and also an assessment within the engine groups. Furthermore, proven theories about harmonic analysis and timbre are used to describe intervallic structures of engine order spectra and to evaluate the timbre characteristics for different cylinder numbers. Evaluations of amplitude proportions between engine orders lead to additional possibilities to characterize and distinct the interior noise of cars with 3 and 4 cylinder engines.

The presented valuation methods show different potentials to characterize the interior noise of cars with low cylinder numbers and to distinct cars with 3 and 4 cylinder engines. Moreover, the physical meaning of the gained knowledge is discussed and an overview of the practicability is given.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
1.1. Projektbeschreibung und Zielsetzung 1
1.2. Motivation 2
1.3. Methodik 4
1.4. Aufbau und Gliederung der schriftlichen Arbeit 4
2. Grundlagen 6
2.1. Literaturrecherche im Überblick 6
2.2. Motorakustik 6
2.3. Downsizing und Akustik 9
2.4. Sound-Design bei kleinen Motoren 15
2.5. Objektivierung subjektiver Geräuschbewertung 19
2.6. Psychoakustische Bewertungsgrößen 19
2.7. Boxplotdarstellung 28
3. Datenbasis und Ausgangssituation 30
3.1. Eigenschaften der Fahrzeug-Datenbank 30
3.2. Aufbereitung der Datenbasis 32
3.3. Fahrzeugmessungen zur Erweiterung der Datenbank 35
3.4. Evaluierung der Datenbasis 35
3.5. Die Datenbasis für die Untersuchungen 37
3.6. Erste Auswertungen anhand von VOICE – Plots 37
4. Auswertungen und Parameterentwicklung 40
4.1. Kurzbeschreibung der Vorgehensweise 40
4.2. Drehzahlstufen und Mittelungsintervalle 40
4.3. Statistische Auswertungen 41
4.4. Erste Ergebnisse anhand der VOICE – Parameter 41
4.5. Darstellung mit Unterscheidbarkeitsmatrizen 42
4.6. Auswahl der verwendeten Grundparameter 46

4.7. Neuer Parameter 47
4.8. Unterscheidbarkeit der Gruppen 50
4.9. Unterscheidung aller Gruppen vs. Unterscheidung bei gleichem Brennverfahren 51
4.10. Form der Parameterdarstellung 51
4.11. Darstellung der Ergebnisse 52
4.12. Ausweitung der Auswertungen 55
4.13. Klassifizierung 58
4.14. Statistische Optimierung 59
4.15. Zusammenfassung der Ergebnisse 63
5. Interpretation und Bedeutung in der Praxis 65
5.1. Interpretation der Ergebnisse 65
5.2. Einschränkungen 65
5.3. Physikalischer Zusammenhang 66
5.4. Einfluss von Fahrzeuggröße und -klasse 67
5.5. Verwendung von Motorprüfstandsaufnahmen 67
5.6. Vergleiche konkreter Fahrzeugbeispiele 68
5.7. Vergleich mit subjektiven Bewertungen 70
6. Alternative Bewertungsmethoden 73
6.1. Harmonische Analyse der Motorordnungen 73
6.2. Klangfarbenbeschreibung 87
6.3. Darstellung von Amplitudenverhältnissen 94
6.4. Untersuchung stochastischer Anteile 111
6.5. Neue Rauigkeit 112
7. Zusammenfassung, Resümee und Ausblick 114
7.1. Zusammenfassung 114
7.2. Umsetzung als Bewertungsparameter in AVL VOICE 115
7.3. Einsatz bei höheren Zylinderzahlen 115
7.4. Resümee 116
8. Literaturverzeichnis 118
9. Anhang 121

9.1. Fahrzeugliste 121

9.2. Liste der AVL VOICE-Parameter 122

9.3. Berechnungstabelle des Articulation Index 123

9.4. Erklärung zur beiliegenden CD-ROM 125

9.5. Formblatt über die Einhaltung der Richtlinien für schriftliche Arbeiten an der Kunstuniversität Graz 126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Emissionsziele für Automobile 2
Abbildung 1-2: AVL Annoyance Index für unterschiedliche Zylinderzahlen 3
Abbildung 2-1: Geräuschquellen und Übertragungspfade 7
Abbildung 2-2: Campbell-Diagramm eines 4-Zylinder Motors 8
Abbildung 2-3: Akustische Auswirkungen von Downsizing 9
Abbildung 2-4: Drehungleichförmigkeiten von Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen 10
Abbildung 2-5: Drehungleichförmigkeiten 3- vs. 4-Zylindermotor 11
Abbildung 2-6: Dynamischer Drehmomentanteil 3- vs. 4-Zylindermotor 11
Abbildung 2-7: Eigenschaften von Reihenmotoren mit 2 bis 4 Zylindern 12
Abbildung 2-8: Campbell-Diagramme 3- (li) und 4-Zylindermotor (re) 13
Abbildung 2-9: Subjektives Unwohlsein bei 3- und 4-Zylindermotoren 14
Abbildung 2-10: 2 = 4 – 2-Zylinder Baseline 16
Abbildung 2-11: 2 = 4 – 4-Zylinder Sound-Design 16
Abbildung 2-12: 2 = 4 – Systemübersicht 17
Abbildung 2-13: 2-Zylinder Originalgeräusch 17
Abbildung 2-14: Künstliches 2-Zylindergeräusch - 180° KW verschoben 17
Abbildung 2-15: Überlagertes 4-Zylinder-Innengeräusch 17
Abbildung 2-16: Grundprinzip eines ANC-Systems 18
Abbildung 2-17: Modelle des Booming/Rumbling-Index 20
Abbildung 2-18: Bereiche maximaler Rauigkeit 21
Abbildung 2-19: Gültigkeitsbereiche der objektiven Parameter 22
Abbildung 2-20: Rauigkeit in Abhängigkeit von f_{mod} 24
Abbildung 2-21: Beispiel für Lautheitsberechnung nach DIN 45631 25
Abbildung 2-22: Articulation Index Prinzip 26
Abbildung 2-23: Boxplotdarstellung 29
Abbildung 3-1: AVL VOICE Logo 30
Abbildung 3-2: SOURCE Kunstkopfaufnahmesystem 31

Abbildung 3-3: Beispiel für Booming bei niedrigen Drehzahlen 34
Abbildung 3-4: Beeinflussung der VOICE-Parameter durch Booming 34
Abbildung 3-5: Störgeräuscheinfluss: Lautheit (li) und Campbell-Diagramm (re) 36
Abbildung 3-6: Beispiel für Ausreißer 36
Abbildung 3-7: VOICE Plots: Lautheit (li) und Campbell-Diagramm (re) 37
Abbildung 3-8: Lage eines typischen Vertreters 38
Abbildung 3-9: VOICE-Plot Harshness Index für fünf Fahrzeuge 39
Abbildung 4-1: Überschneidung von Konfidenzintervallen 42
Abbildung 4-2: DCI Boxplots unskaliert 50
Abbildung 4-3: DCI Gruppenvergleiche 53
Abbildung 4-4: DCI Drehzahlverhalten 53
Abbildung 4-5: DCI für 3- und 4-Zylinder-Dieselmotoren 54
Abbildung 4-6: DCI für 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren 54
Abbildung 4-7: DCI für 2-, 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren 55
Abbildung 4-8: DCI Gruppenvergleiche bei weiteren Drehzahlpunkten 56
Abbildung 4-9: Kovarianzmatrix der normalisierten VOICE-Parameter @ 4000 rpm 59
Abbildung 4-10: Koeffizienten-Matrix @ 4000 rpm 61
Abbildung 4-11: Anteil der transformierten Parameter an der Gesamtvarianz @ 4000 rpm 61
Abbildung 5-1: DCI Fahrzeugvergleiche 1 und 2 68
Abbildung 5-2: DCI Fahrzeugvergleiche 3 und 4 69
Abbildung 5-3: DCI Fahrzeugvergleiche 5 und 6 69
Abbildung 5-4: Datenlage bei Bewertung mit dem Attribut "basslastig" 71
Abbildung 6-1: Spektraler Aufbau eines musikalischen Tons 74
Abbildung 6-2: Spektraler Aufbau eines Motorengeräusches 74
Abbildung 6-3: Konsonante und dissonante Intervalle 75
Abbildung 6-4: 3D-Spektrum eines 4-Zylindermotors 76
Abbildung 6-5: 3D-Spektrum eines 6-Zylindermotors 76
Abbildung 6-6: Campbell-Diagramm 2-Zylindermotor 77
Abbildung 6-7: Campbell-Diagramm 3-Zylindermotor 78
Abbildung 6-8: Campbell-Diagramm 4-Zylindermotor 79

Abbildung 6-9: Campbell-Diagramm 6-Zylindermotor 80
Abbildung 6-10: Ordnungsplot 82
Abbildung 6-11: Ausprägung von deterministischen Komponenten 82
Abbildung 6-12: Konsonanter vs. dissonanter Ordnungsgehalt 84
Abbildung 6-13: Konsonante vs. dissonante Anteile @ 3000 rpm 85
Abbildung 6-14: Kons. vs. diss. Ordnungsgehalt inkl. MO unterhalb der 1. HO 86
Abbildung 6-15: Kons. vs. diss. Anteile inkl. MO unterhalb der 1. HO @ 3000 rpm 86
Abbildung 6-16: Niedrige zu hohen Motorordnungen 89
Abbildung 6-17: Geradzahlige zu ungeradzahligen Motorordnungen 91
Abbildung 6-18: Weiche zu harten Motorordnungen 92
Abbildung 6-19: Tristimulus @ 3000 rpm 96
Abbildung 6-20: Tristimuli 1 & 2 @ 3000 rpm 96
Abbildung 6-21: Tristimuli 1 & 3 @ 3000 rpm 97
Abbildung 6-22: Tristimuli 2 & 3 @ 3000 rpm 97
Abbildung 6-23: Tristimulus - Linienanordnung 98
Abbildung 6-24: Ermittlung der Zündordnung aus dem Ordnungsspektrum 101
Abbildung 6-25: Hauptordnungs–Tristimulus @ 3000 rpm 102
Abbildung 6-26: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 @ 3000 rpm 102
Abbildung 6-27: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 3 @ 3000 rpm 103
Abbildung 6-28: Hauptordnungs-Tristimuli 2 & 3 @ 3000 rpm 103
Abbildung 6-29: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 2000 rpm 105
Abbildung 6-30: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 3000 rpm 106
Abbildung 6-31: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 4000 rpm 106
Abbildung 6-32: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 2000 rpm 109
Abbildung 6-33: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 3000 rpm 110
Abbildung 6-34: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 4000 rpm 110
Abbildung 6-35: Boxplots deterministischer vs. stochastischer Anteil 111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Fahrzeuggruppen 37

Tabelle 4-1: Unterscheidbarkeitsmatrizen Harshness Index 43

Tabelle 4-2: Unterscheidbarkeitsmatrizen Schärfe (Aures) 43

Tabelle 4-3: Unterscheidbarkeitsmatrizen Annoyance (Europe) 44

Tabelle 4-4: Unterscheidbarkeitsmatrizen CKI 44

Tabelle 4-5: Unterscheidbarkeitsmatrizen Low Freqency Content 44

Tabelle 4-6: Unterscheidbarkeitsmatrizen Lautheit ISO 532 B 45

Tabelle 4-7: Unterscheidbarkeitsmatrizen Extended Articulation Index 45

Tabelle 4-8: Gewichtungsfaktoren händisch ermittelt 48

Tabelle 4-9: Gewichtungsfaktoren lt. Logit-Regression 49

Tabelle 4-10: Unterscheidbarkeitsmatrizen Downsizing Comfort Index 50

Tabelle 4-11: DCI Unterscheidbarkeitsmatrizen 2. Gang Teillastbeschleunigung 57

Tabelle 4-12: DCI Unterscheidbarkeitsmatrizen 3. Gang Volllastbeschleunigung 57

Tabelle 4-13: DCI Klassifizierung 58

Tabelle 4-14: Unabhängigkeitstabelle mit Gruppenbildung @ 4000 rpm 60

Tabelle 4-15: Klassifizierungstabelle LDA @ 4000 rpm 62

Tabelle 5-1: Unterscheidbarkeit "basslastig" 71

Tabelle 6-1: Dreiklangformen 75

Tabelle 6-2: Konsonante Intervalle beim 2-Zylindermotor 77

Tabelle 6-3: Konsonante Intervalle beim 3-Zylindermotor 78

Tabelle 6-4: Konsonante Intervalle beim 4-Zylindermotor 79

Tabelle 6-5: Konsonante Intervalle beim 6-Zylindermotor 80

Tabelle 6-6: Konsonante und dissonante Motorordnungen 83

Tabelle 6-7: Klangfarbenbeschreibung 88

Tabelle 6-8: Niedrige und hohe Motorordnungen 89

Tabelle 6-9: Geradzahlige und ungerzahlige Motorordnungen 90

Tabelle 6-10: Weiche und harte Motorordnungen 92

Tabelle 6-11: Tristimulus Berechnung 95

Tabelle 6-12: Tristimulus Kovarianzmatrix @ 3000 rpm 98

Tabelle 6-13: Tristimulus Koeffizientenmatrix @ 3000 rpm 98

Tabelle 6-14: Tristimulus Klassifizierung im Detail @ 3000 rpm 99

Tabelle 6-15: Tristimulus Klassifizierung 99

Tabelle 6-16: Hauptordnungs-Tristimulus Berechnung 101

Tabelle 6-17: Hauptordnungs-Tristimulus Klassifizierung 104

Tabelle 6-18: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Berechnung 105

Tabelle 6-19: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Klassifizierung im Detail @ 4000 rpm ... 107

Tabelle 6-20: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Klassifizierung 107

Tabelle 9-1: Liste der untersuchten Fahrzeuge 121

Tabelle 9-2: AVL VOICE-Parameter 123

Tabelle 9-3: Berechnungstabelle des Articulation Index 123

1. Einleitung

1.1. Projektbeschreibung und Zielsetzung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit den akustischen Auswirkungen des Downsizings von Verbrennungsmotoren und ist Teil eines Forschungsprojekts der Fachbteilung für Fahrzeug- und Motorakustik der AVL List GmbH. Die wichtigsten Arbeitsschritte und die Konkretisierung der Beitragsziele sind im Folgenden zusammengefasst.

- Literaturrecherche zu den Themen „Soundgestaltung bei kleinen Motoren für PKW-Anwendungen“ und „psychoakustische Bewertungsgrößen in der Fahrzeugakustik“
- Zusammenfassung der Literaturrecherche
- Einhören in die Thematik und Kennenlernen der Unterschiede der Klangcharakteristika von Fahrzeugen mit Motoren verschiedener Zylinderzahlen
- Herstellen von Verknüpfungen mit psychoakustischen Bewertungsgrößen
- Benchmarking und Datenanalyse von Fahrzeugen mit 2-, 3- und 4-Zylindermotoren anhand der bestehenden Datenbank von Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen
- Fahrzeugmessungen auf der AVL Teststrecke, Analyse und Aufbereitung der Daten zur Erweiterung und Aktualisierung der bestehenden Datenbank
- Auswahl geeigneter Fahrzustände sowie Fahrzeug- und Motormodelle als Basis für die Untersuchungen
- Evaluierung der Datenbasis anhand akustischer und psychoakustischer Parameter
- Entwicklung eines Parameters zur Bewertung der Innengeräuschklangqualität[1] für die Fahrzeuggruppen mit Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen
- Zusammenfassung und physikalische Interpretation der Ergebnisse
- Vorbereitung der Parameterimplementierung in AVL VOICE[2]
- Untersuchung alternativer Methoden zur Klangcharakterisierung von Fahrzeugen mit Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen
- Ausblick auf mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Klangcharakters von Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen

[1] Anm.: Geräuschqualität ist eine kontextabhängige Größe und eine allgemeingültige Definition im Sinne von Wohlklang ist wenig zielführend. Laut der Norm DIN 55350 erfolgt eine Interpretation der Geräuschqualität als Erfüllung der Erwartungshaltung einer Testperson. So sollte etwa das Innengeräusch eines Fahrzeugs zum Fahrzeugtyp passen und dessen Charakter positiv unterstreichen. Die Qualität eines Fahrzeuggeräusches kann mit einer einzigen psychoakustischen Bewertungsgröße nicht ausreichend beschrieben werden., Vgl. Zeller. 2009, S. 157.

[2] Anm.: Eine Kurzbeschreibung von AVL VOICE erfolgt in Abschnitt 3.1.1.

1.2. Motivation

Eine nachhaltige und effiziente Nutzung der auf der Erde nur begrenzt vorhandenen energetischen Ressourcen wird auch in der Automobilindustrie immer wichtiger[3]. Strenge gesetzliche Vorgaben bezüglich Treibstoffverbrauch und Emission klimaschädigender Abgase aber auch eine Sensibilisierung der VerbraucherInnen – auch auf Grund der stetig steigenden Treibstoffpreise – zwingen die Automobilindustrie, einen Fokus auf die Verringerung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch zu legen. Abbildung 1-1 zeigt anhand von CO_2-Emissionen beispielhaft die weltweite Verschärfung der Emissionsvorgaben für Automobile vom Jahr 2004 bis zum Jahr 2020. Die Europäische Union nimmt mit der ab 2015 für Neuwagen verpflichtenden EURO 6 – Norm[4] eine besondere Vorreiterrolle ein.

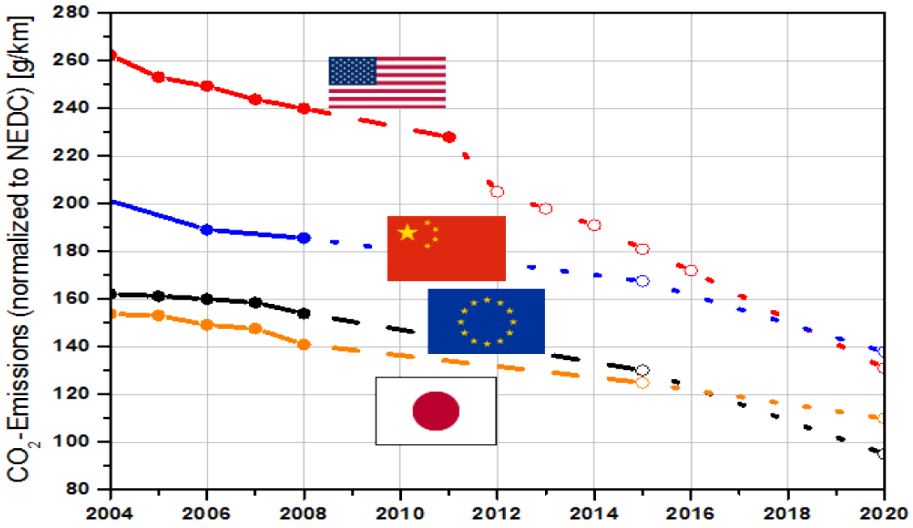


Abbildung 1-1: Emissionsziele für Automobile[5]

Auf Grund dieser Herausforderungen setzen Automobilhersteller vermehrt auf unkonventionelle Technologien zur Erhöhung des Wirkungsgrads und zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren. Ein wirkungsvolles und gängiges Konzept ist Downsizing, das eine Bereitstellung gleicher Motornennleistung bei kleinerem Hubvolumen und/oder einer reduzierten Zylinderzahl beschreibt[6].

Technologien wie Direkteinspritzsysteme und Turbolader ermöglichen es, Motoren einzusetzen, die trotz kleinerem Hubvolumen und reduzierter Zylinderzahl eine gleiche oder sogar bessere Performance aufweisen und gleichzeitig weniger Treibstoff verbrauchen. Die erreichten höheren Spitzendrücke bei der Verbrennung führen zu einem lauteren Verbrennungsgeräusch und der Einsatz von Turboladern bringt zusätzliche Geräuscherzeuger mit sich.[7] Daneben wird aus

[3] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 9.
[4] Vgl. Europäisches Parlament. 2007, S. 16.
[5] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 9.
[6] Vgl. ebd., S. 9.
[7] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 4.

Gründen der Gewichtsersparnis häufig eine Reduktion von Sekundärakustikmaßnahmen vorgenommen, welche üblicherweise eine direkte Erhöhung des Innengeräuschpegels bewirkt.[8]

Somit können durch Downsizing zwar Performance und Treibstoffverbrauch verbessert werden, doch es ergeben sich deutliche Veränderungen des Geräuschcharakters. Außerdem ist ein Großteil der PKW-NutzerInnen an den Geräuschcharakter von 4- und 6-Zylindermotoren gewöhnt und empfindet diesen als angenehm[9], da diese Motorentypen bisher die überwiegende Mehrheit im PKW-Bereich darstellten.

Vorhergehende Untersuchungen zur Geräuschqualität von Motoren verschiedener Zylinderzahlen bei AVL[10] zeigten beispielsweise einen Anstieg des AVL Annoyance Index in Verbindung mit einer Reduktion der Zylinderzahl, wie dies in Abbildung 1-2 zu sehen ist.

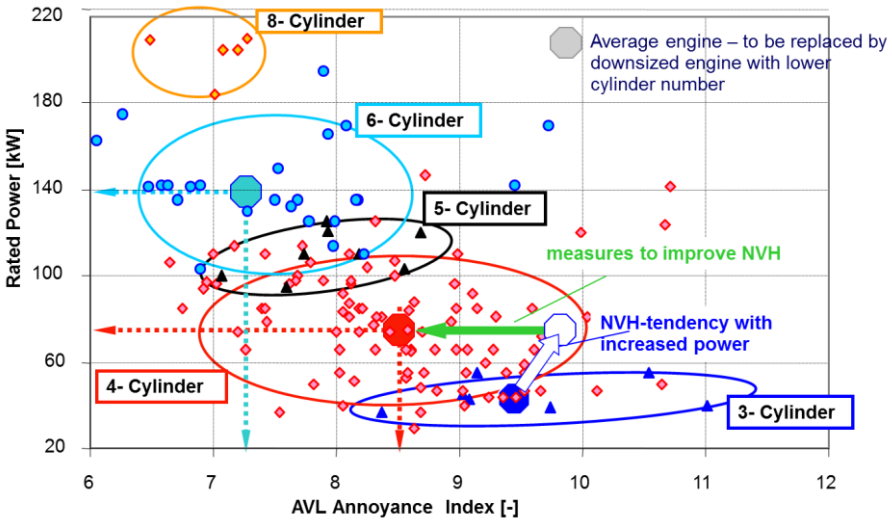


Abbildung 1-2: AVL Annoyance Index für unterschiedliche Zylinderzahlen[11]

Der Annoyance Index wurde entwickelt, um die Lästigkeit von Geräuschen zu bewerten, jedoch nicht, um den Klang von Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen zu beschreiben und diese anhand der Zylinderzahl zu unterscheiden. Werden in der obigen Abbildung die Wertebereiche des Annoyance Index für unterschiedliche Zylinderzahlen betrachtet, so ergeben sich in weiten Bereichen Überlappungen, sodass keine gute Unterscheidbarkeit gegeben ist (eine nähere Behandlung hierzu erfolgt in Abschnitt 4.5.3). Jedoch entstand als Folge dieser Ergebnisse die Überlegung, einen Parameter zu entwickeln, welcher basierend auf psychoakustischen Beschreibungsgrößen im Mittel eine Unterscheidbarkeit der Gruppen von Fahrzeugen mit 2- und 3-Zylindermotoren von jenen mit 4-Zylindermotoren gewährleistet und eine Beschreibung von deren Geräuschcharakter ermöglicht. Darüber hinaus sollen auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Maßnahmen ableitbar werden, wie der Geräuschcharakter von Motoren mit kleinen Zylinderzahlen an jenen von Motoren mit 4 Zylindern herangeführt werden kann. Dies gilt im Übrigen auch für 4- und 6-Zylindermotoren mit Zylinderabschaltungssystemen, welche zu

[8] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 11.
[9] Vgl. ebd., S. 20.
[10] Vgl. Brandl, Graf und Rust. 2012, S. 4.
[11] Quelle: Graf, et al. 2011, S. 3.

temporären 2- oder 3-Zylinderbetriebszuständen führen.[12] Entsprechende Maßnahmen durch Einsatz passiver Technologien wie Absorbern und Dämmmaterialien oder aktiven Systemen mit Active Noise Cancelling[13] können aus den physikalischen Zusammenhängen abgeleitet werden.

1.3. Methodik

Die in dieser Masterarbeit präsentierten Ergebnisse basieren auf statistischen Untersuchungen einer Datenbank an Innengeräuschaufnahmen von Fahrzeugen mit 3- und 4-Zylindermotoren und einem 2-Zylinderfahrzeug bei einem definierten Betriebszustand. 30 verschiedene akustische und psychoakustische Ausgangsparameter werden in dieser Datenbank berechnet und für die statistischen Untersuchungen in MATLAB® aufbereitet. Dabei werden zu Beginn die Grundeigenschaften der Verteilung für jeden Parameter mit Mitteln der deskriptiven Statistik beschrieben. Mittels entsprechender statistischer Verfahren werden die Unabhängigkeit der einzelnen Parameter und die Unterscheidbarkeit von Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl untersucht. Auf Basis physikalisch plausibler Parameter wird eine neue Bewertungsgröße entwickelt, welche eine solide Gruppencharakterisierung bietet. Die Optimierung erfolgt mit drehzahlabhängigen Gewichtungsfaktoren für die Grundparameter.

Diese Arbeit fasst die Ergebnisse dieser Parameterentwicklung, die im Zuge der statistischen Untersuchungen ermittelt wurden, zusammen. Die Eigenschaften der Datenbank, die verwendeten Methoden und statistischen Parameter sowie die praktische und physikalische Bedeutung der erzielten Ergebnisse werden ebenfalls erläutert. Zusätzlich werden alternative Möglichkeiten zur Klangbeschreibung von Motoren kleiner Zylinderzahlen beschrieben, welche auf aus der Musikalischen Akustik bekannten Theorien zur harmonischen Analyse und Klangfarbenbeschreibung basieren. Abschließend werden die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zusammengefasst und verglichen und die praktische Bedeutung der gewonnenen Erkenntnisse wird diskutiert.

1.4. Aufbau und Gliederung der schriftlichen Arbeit

Der Inhalt dieser Masterarbeit kann in vier wesentliche Themenbereiche unterteilt werden. Im Kapitel 2 werden die Grundlagen von Motor- und Fahrzeugakustik und im Speziellen deren Bedeutung in Bezug auf Downsizing von Motoren beschrieben. Zusätzlich erfolgt ein Überblick über die verwendeten psychoakustischen Beschreibungsgrößen.

Kapitel 3 befasst sich mit den Eigenschaften der verwendeten Datenbasis sowie mit der Aufbereitung der Daten für die weitere Verarbeitung.

[12] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 196ff.
[13] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 201ff.

Die Untersuchung der verfügbaren akustischen und psychoakustischen Bewertungsgrößen sowie die Entwicklung eines neuen Parameters zur Bewertung der Innengeräuschqualität von Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen beschreibt Kapitel 4. Die Interpretation der Ergebnisse sowie eine Beschreibung der physikalischen Bedeutung erfolgt in Kapitel 5.

Alternative Methoden zur Analyse und Beschreibung der Klangcharakteristik der untersuchten Fahrzeuggruppen anhand von aus der Musikalischen Akustik bekannten Theorien über Harmonie und Klangfarbenbeschreibung werden in Kapitel 6 vorgestellt. Die entsprechenden Ergebnisse werden zusammengefasst und kritisch betrachtet.

Kapitel 7 beinhaltet die Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse, einen Ausblick auf Möglichkeiten zum praktischen Einsatz der vorgestellten Methoden sowie das Resümee.

2. Grundlagen

2.1. Literaturrecherche im Überblick

Bei der Literaturrecherche wurde das Augenmerk auf die nachfolgend gelisteten Themengebiete gelegt.

- Akustik des Verbrennungsmotors und Entstehung des Fahrzeuginnengeräusches
- Akustische Auswirkung des Downsizings von Verbrennungsmotoren
- Akustik und Sound-Design für Motoren kleiner Zylinderzahlen
- Psychoakustische Bewertungsgrößen und deren Einsatz in der Fahrzeug- und Motorakustik
- Statistische Methoden und Auswerteverfahren
- Harmonische Analyse und Klangfarbenbeschreibung
- Möglichkeiten zur Darstellung von spektralen Energieverteilungen

2.2. Motorakustik

2.2.1. Motorgeräuschentstehung

Prinzipiell tragen zur Geräuschentstehung an einem Verbrennungsmotor alle Teile der Konstruktion einen mehr oder weniger großen Teil bei. Zur vereinfachten Beschreibung dieses komplexen Modells sind im Folgenden einige wichtige Mechanismen aufgelistet, welche einen wesentlichen Teil der Geräuschentstehung ausmachen. Dabei ist in diesem Zusammenhang zwischen Luftschall, welcher von Oberflächen im Motorraum abgestrahlt wird und hauptsächlich über die Windschutzscheibe sowie die Spritzwand in den Fahrgastraum übertragen und mit dem Gehör wahrgenommen wird, und Körperschall, welcher in Form von Schwingungen von Strukturen über verschiedene Pfade übertragen wird und in Form von Vibrationen mit den entsprechenden Sinnesorganen empfunden wird, zu unterscheiden.[14] Sowohl Luft- als auch Körperschall sind wichtige Einflussfaktoren bei der subjektiven Bewertung des akustischen Komforts eines Fahrzeuges.

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf die Untersuchungen von Luftschall gelegt. Die verschiedenen Komponenten, aus denen sich das Fahrzeuginnengeräusch zusammensetzt, können ihren Ursprung jedoch durchaus in Form von Körperschall haben, da ein Großteil der Geräusche zunächst als Festkörperschwingung entsteht und danach als Oberflächenschwingung abgestrahlt wird und als Luftschall wirkt. [15]

[14] Vgl. Basshuysen. 2012, S. 1021.
[15] Vgl. ebd., S. 1022.

Abbildung 2-1 fasst die wichtigsten Geräuschquellen mit jeweils gängigen Begrifflichkeiten für die resultierenden Geräusche zusammen. Unten in der Abbildung wird grob eingeteilt, ob die jeweiligen Geräusche eher über den Körperschall- oder den Luftschallweg in den Fahrgastraum übertragen werden.

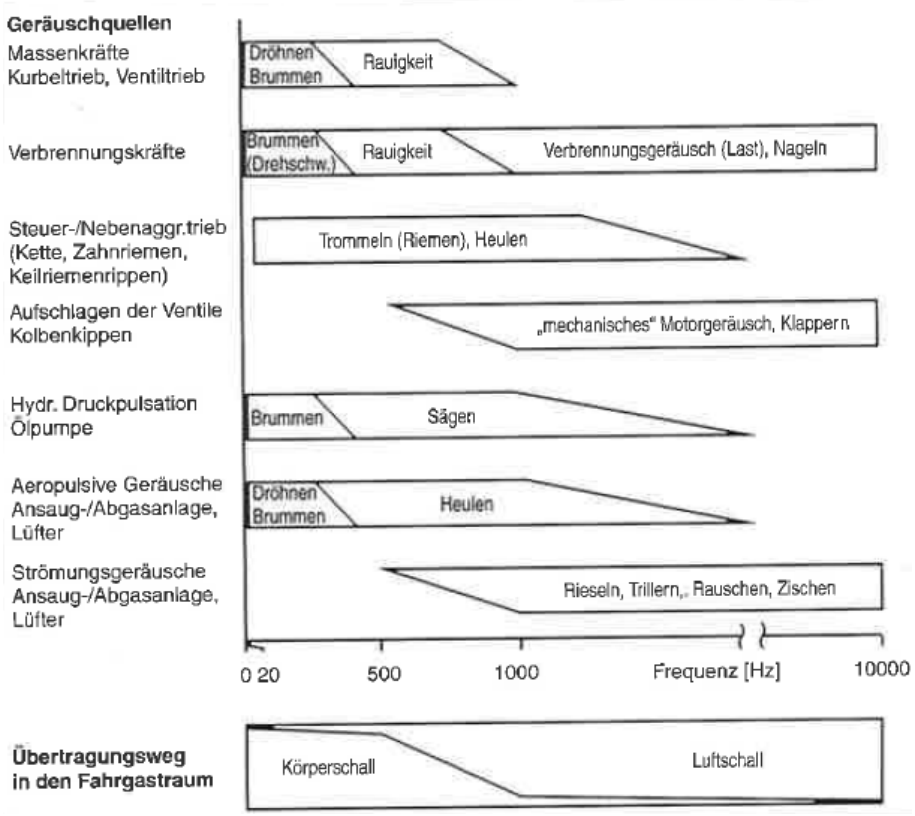


Abbildung 2-1: Geräuschquellen und Übertragungspfade[16]

Bei Frequenzen unterhalb von 1 kHz erfolgt die Geräuschübertragung vom Motorraum in den Fahrzeuginnenraum in erster Linie über Körperschallkopplung. Bei höheren Frequenzen dominiert die Übertragung über die Luftschallpfade. Der Einfluss von Wind- und Reifenrollgeräuschen wird in der Darstellung nicht berücksichtigt.

2.2.2. Motorordnungen und dominante Frequenzen

Die empfundene Tonhöhe und der Klangcharakter eines Verbrennungsmotors werden entscheidend von dem zu Grunde liegenden Motorordnungsmuster bestimmt.[17] Als Motorordnung (kurz MO oder engl. EO) wird eine deterministische Komponente im Geräuschspektrum von rotierenden Maschinen bezeichnet.[18] Motorordnungen werden meist mit Ordnungszahlen versehen, gängig sind dabei ganzzahlige Vielfache von 0,5.[19] Eine n-te Ordnung tritt pro Motorumdrehung n mal auf.[20] Je nach Zylinderanzahl (und Zylinderanordnung) tritt ein charakteristisches Ordnungsmuster auf. Die übliche

[16] Quelle: ebd., S. 1023.
[17] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 3.
[18] Vgl. Braess und Seiffert. 2013, S. 61.
[19] Vgl. Tschöke, Henze und 46 Mitautoren. 2003, S. 137.
[20] Vgl. Braess und Seiffert. 2013, S. 62.

Darstellungsweise für Ordnungsmuster von Verbrennungsmotoren ist ein 3D-Spektrum in Form eines Campbell-Diagramms (z.B. wie in Abbildung 2-2 für einen 4-Zylinder-Reihenmotor), wo auf der Ordinate die Motordrehzahl und auf der Abszisse die Frequenz aufgetragen wird.[21] Die dritte Dimension wird durch eine Farbskala dargestellt und zeigt die energieproportionale Ausprägung der Motorordnungen an. Das hier dargestellte Campbell-Diagramm und alle weiteren in dieser Arbeit weisen jeweils eine A-gewichtete Darstellung des Schalldruckpegels auf.

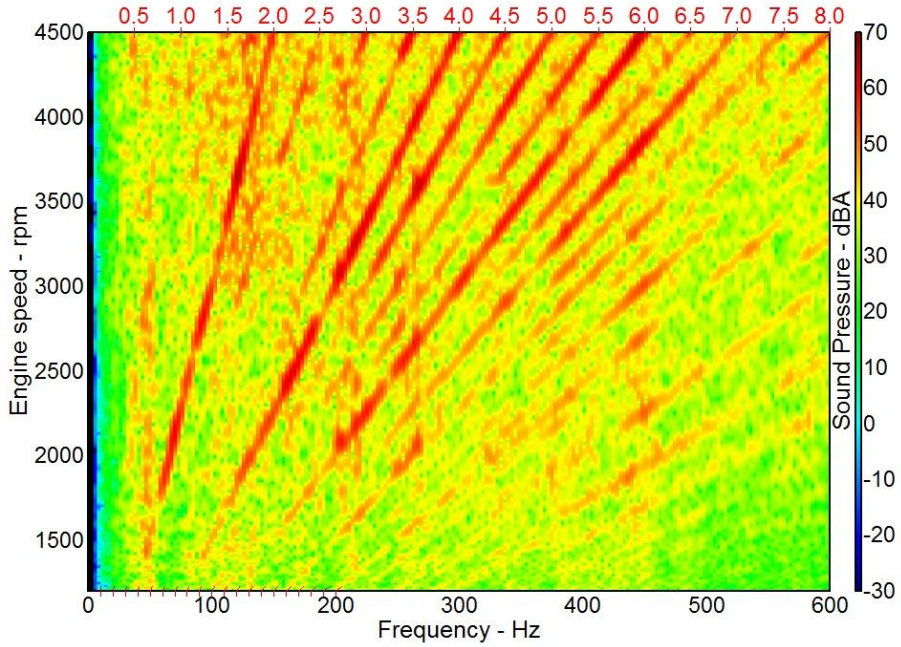


Abbildung 2-2: Campbell-Diagramm eines 4-Zylinder Motors

Das Zustandekommen der Motorordnungen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst.[22] Die wichtigsten sind unter anderem die Zündfrequenz sowie unausgeglichene Massenkräfte und Massenmomente. Einen Überblick hierzu gibt Abbildung 2-7 in Abschnitt 2.3.3 für verschiedene Zylinderzahlen. Bei Viertaktverbrennungsmotoren ist die erste Hauptordnung auf die Zündfrequenz zurückzuführen und wird deshalb auch als Zündordnung[23] bezeichnet. Da ein Zylinder in jedem zweiten Umlauf zündet, kann die Ordnungsnummer der ersten Hauptordnung aus 0.5*Zylinderanzahl berechnet werden.[24] In obigem Campbell-Diagramm sind neben der starken 2,0. Ordnung als Zündordnung des 4-Zylindermotors auch die höheren Hauptordnungen als ganzzahlige Vielfache der Zündordnung gut erkennbar. Aber auch Motorordnungen, welche keine Vielfachen der Grundordnung sind – sogenannte Nebenordnungen[25], können im Spektrum mit hohem Energieinhalt auftreten (siehe z.B. 4,5. Motorordnung in Abbildung 2-2).

[21] Anm.: Die beiden Achsen können aber auch umgekehrt verwendet werden.
[22] Vgl. Basshuysen. 2012, S. 1031.
[23] Vgl. Zeller. 2009, S. 165.
[24] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 5.
[25] Vgl. Zeller. 2009, S. 165.

Der Tonhöheneindruck wird von der ersten Hauptordnung bestimmt, weshalb Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen bei gleicher Drehzahl andere Grundfrequenzen aufweisen.[26] Die Verteilung der Energie im Ordnungsspektrum ist also ein wichtiger Faktor für den Klangcharakter eines Fahrzeugs. Die Verhältnisse zwischen den Motorordnungen und in weiterer Folge zwischen den zugehörigen Frequenzen können somit auch unter den Aspekten der Harmonielehre der Musikalischen Akustik betrachtet werden[27], um so die Klangqualität zu beschreiben. Darauf wird in Abschnitt 2.4.3 noch einmal genauer eingegangen.

2.3. Downsizing und Akustik

2.3.1. Prinzipielle Zusammenhänge

Downsizing-Maßnahmen führen im Allgemeinen zu Verschlechterungen des akustischen Verhaltens von Fahrzeugen.[28] Abbildung 2-3 bietet einen groben Überblick über die Auswirkungen von Downsizing-Maßnahmen (aus Gründen einer CO_2-Reduktion) auf das akustische Verhalten (Luft- und Körperschall) eines Fahrzeugs.

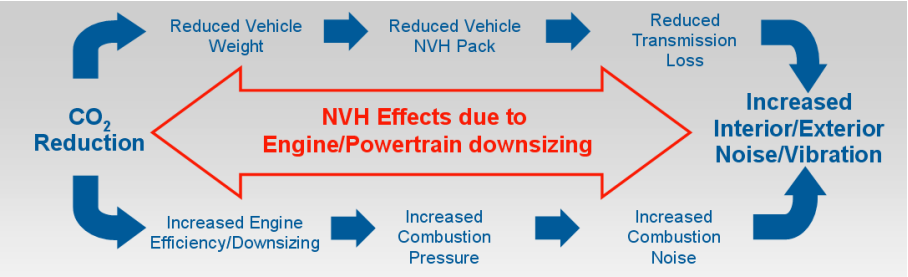


Abbildung 2-3: Akustische Auswirkungen von Downsizing[29]

Der obere Zweig in Abbildung 2-3 beschreibt Veränderungen des Fahrzeugübertragungsverhaltens. Um den Treibstoffverbrauch zu senken, wird eine Reduktion des Fahrzeuggewichts angestrebt[30], welche zu einer Verringerung der akustischen Dämmmaßnahmen und in weiterer Folge zu einer niedrigeren Absorption führt.

Im unteren Zweig werden die Folgen einer erhöhten Motoreffizienz beschrieben. Der Einsatz von Motoren mit kleineren Hubvolumina und/oder geringerer Zylinderzahl bedarf bei Beibehaltung der gleichen Performance einer Effizienzsteigerung.[31] Dies wird durch erhöhte Spitzendrücke erreicht, die zu einem stärkeren Verbrennungsgeräusch führen. Zur weiteren Effizienzsteigerung werden häufig Turbolader eingesetzt, welche auch zusätzliche Geräuschquellen darstellen. Zusammengefasst führen diese Maßnahmen generell zu höheren

[26] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 20ff.
[27] Vgl. Alt und Jochum. 2003, S. 55ff.
[28] Vgl. Brandl, Graf und Rust. 2012, S. 1.
[29] Quelle: Graf, et al. 2011, S.1.
[30] Vgl. ebd., S. 1.
[31] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 4.

Schalldrücken im Fahrzeuginnen- und Außengeräusch und somit zu einer Zunahme der Lautheit.

2.3.2. Drehungleichförmigkeiten

Wird ein Reihenvierzylindermotor bei gleichbleibender Performance durch einen Reihendreizylindermotor ersetzt, so muss das Spitzendrehmoment an der Kurbelwelle stark (um 33%) ansteigen.[32] Daraus resultiert eine deutlich höhere Drehungleichförmigkeit an der Kurbelwelle, was zu Nachteilen im Schwingungskomfort führt.

Mit der Abnahme der Zylinderzahl geht eine deutliche Zunahme der Drehzahlschwankungen an der Kurbelwelle einher, wie das Diagramm in Abbildung 2-4 zeigt.

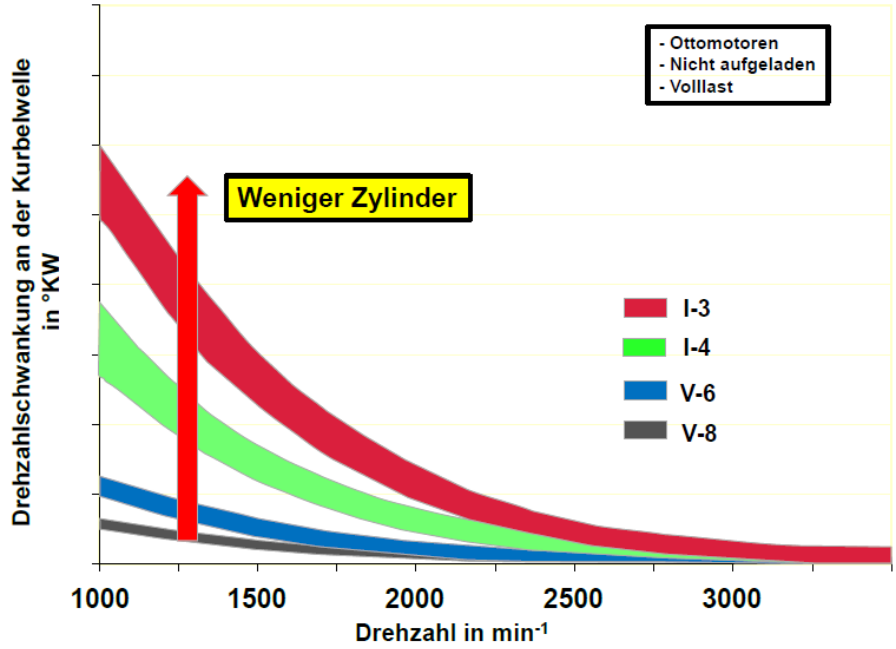


Abbildung 2-4: Drehungleichförmigkeiten von Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen[33]

Das höhere Spitzendrehmoment und die daraus resultierende erhöhte Drehungleichförmigkeit eines Reihendreizylindermotors im Vergleich zu einem Reihenvierzylindermotor gleicher Performance wird in Abbildung 2-5 über die Dauer eines Arbeitsspiels dargestellt.[34] Auf der Ordinate ist das Drehmoment an der Kurbelwelle in Nm aufgetragen, auf der Abszisse der Kurbelwinkel in °. Zwei volle Umdrehungen (720°) bilden ein Arbeitsspiel, das heißt, dass jeder Zylinder einmal zündet. Während der 4-Zylindermotor (blaue Kurve) ein Spitzendrehmoment von ca. 950 Nm erzeugt, liegt dies beim 3-Zylindermotor (pinke Kurve) bereits bei 1290 Nm. Daraus folgt eine deutlich höhere Drehungleichförmigkeit.

[32] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 12.
[33] Quelle: ebd., S. 13.
[34] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 10.

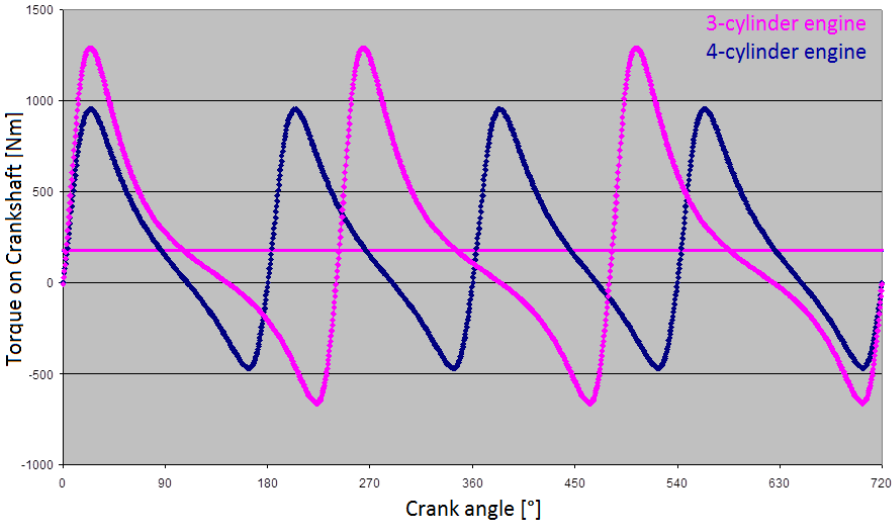


Abbildung 2-5: Drehungleichförmigkeiten 3- vs. 4-Zylindermotor[35]

Als Maß für die Anregung der Drehungleichförmigkeit kann der dynamische Drehmomentanteil an der Kurbelwelle betrachtet werden[36], der in Abbildung 2-6 als Funktion der Drehzahl für einen 3-Zylindermotor (1,5. Motorordnung) und einen 4-Zylindermotor (2,0. Motorordnung) dargestellt ist. Mit EO wird der Begriff Engine Order (Motorordnung) abgekürzt.

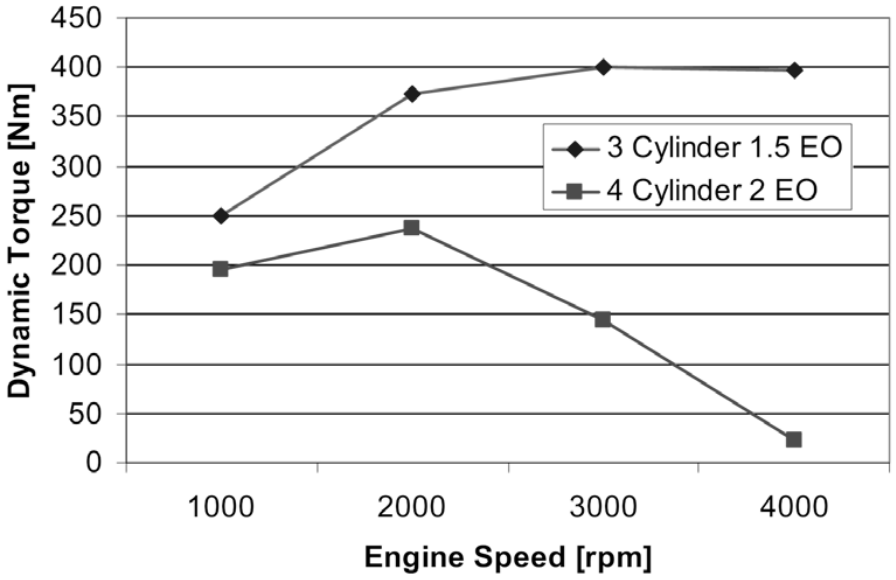


Abbildung 2-6: Dynamischer Drehmomentanteil 3- vs. 4-Zylindermotor[37]

Bei niedrigen Drehzahlen ergeben sich noch vergleichsweise geringe Unterschiede. Diese werden aber mit steigender Drehzahl immer größer. Eine Begründung dafür ist die geringere Zündfrequenz des 3-Zylindermotors, welche zu einer höheren Ungleichförmigkeit an der Kurbelwelle führt.[38]

[35] Vgl. ebd., S. 10.
[36] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 75.
[37] Quelle: ebd., S. 76.
[38] Vgl. ebd., S. 76.

2.3.3. Motorordnungen und Klangcharakter

Zusätzlich zum lauteren Motorgeräusch und dem verringerten Schwingungskomfort verändert sich auch der Klangcharakter eines Motors durch eine Reduktion der Zylinderzahl. Dies liegt an den unterschiedlichen Zündfrequenzen und dominanten Motorordnungen.[39] Abbildung 2-7 zeigt dazu eine Zusammenstellung einiger akustisch relevanter Eigenschaften von (Viertakt-) Reihenmotoren mit 2, 3 und 4 Zylindern. Die letzten drei Spalten zeigen die Zündordnung (main firing order) vergleichbarer Motoren.

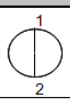
cylinder configuration	inline 2			inline 3	inline 4
crank layout					
ignition Interval	180° - 540°	270° - 450°	360° - 360°	240° - 240° - 240°	180° - 180° - 180° - 180°
main firing order(s)	0.5, 2	0.5, 1.5	1	1.5	2
firing order	uneven	uneven	even	even	even
1st order mass forces	0	$\sqrt{2}*P_I$	$2*P_I$	no	no
2nd order mass forces	$2*P_{II}$	no	$2*P_{II}$	no	$4*P_{II}$
1st order mass moments	$a*P_I$	$a*P_I$	no	$\sqrt{3}*a*P_I$	no
2nd order mass moments	no	$a*P_{II}$	no	$\sqrt{3}*a*P_I$	no
torsional speed fluctuaction	high	high	high	medium	medium
$F_r = m_r * r * \omega^2$	$P_I = m_o * r * \omega^2$		$P_{II} = \lambda * P_I$		
	$F_I = P_I * \cos\varphi$		$F_{II} = P_{II} * \cos 2\varphi$		
a…cylinder distance	*m_r …rotating mass*		*m_o …oscillating mass*		*λ…conrod ratio*
*r…0.5 * stroke*					

Abbildung 2-7: Eigenschaften von Reihenmotoren mit 2 bis 4 Zylindern[40]

In Folge einer Reduktion der Zylinderzahl wird die Ordnungszahl der ersten Hauptordnung (Zündordnung) reduziert.[41] Ist dies beim 4-Zylindermotor die 2,0. Ordnung, so wird sie beim 3-Zylindermotor zur 1,5. Ordnung und beim 2-Zylindermotor zur 1,0. Ordnung. Eine Erklärung dafür geben die Zündintervalle. Deren Angabe erfolgt in ° Kurbelwinkel und Abbildung 2-7 zeigt die Vergrößerung des Abstands zwischen den Zündungen infolge einer Reduktion der Zylinderzahl von 180° bei 4-Zylindermotoren auf 240° 3-Zylindermotoren und 360° bei 2-Zylindermotoren.

Daher beträgt die Grundfrequenz eines Motors mit 2 Zylindern die Hälfte jener eines 4-Zylindermotors und beim 3-Zylindermotor liegt diese genau dazwischen. Bei derselben Motordrehzahl ergeben sich bei kleineren Zylinderzahlen somit niedrigere wahrgenommene Tonhöhen. Außerdem liegen die resultierenden Motorordnungen näher beieinander. Wird der gleiche Frequenzbereich betrachtet, so zeigen 2- und 3-Zylindermotoren eine höhere Anzahl von Hauptordnungen (ganzzahlige Vielfache der Zündordnung) als 4-Zylindermotoren. Dies wird beispielhaft in den Campbell-Diagrammen in Abbildung 2-8 für einen 3-Zylindermotor (links) und einen 4-Zylindermotor (rechts) im Drehzahlfenster von 1500 bis 4500 rpm[42] und im Frequenzbereich von 0 bis 600 Hz dargestellt.

[39] Vgl. Brandl, Graf und Rust. 2012, S. 2.
[40] Quelle: Graf, et al. 2011, S. 2.
[41] Vgl. Brandl, Graf und Rust. 2012, S. 2.
[42] Anm.: rpm steht für revolutions per minute und bezeichnet die Motordrehzahl in Umdrehungen/Minute.

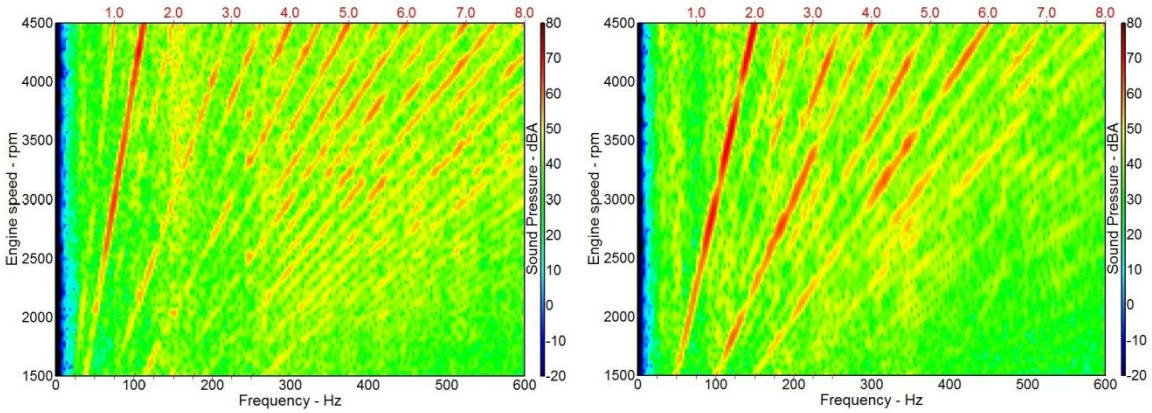


Abbildung 2-8: Campbell-Diagramme 3- (li) und 4-Zylindermotor (re)

Die dominanten Motorordnungen des 4-Zylindermotors (rechtes Diagramm) liegen bei 2,0, 4,0, 6,0 und 8,0. Beim 3-Zylindermotor (linkes Diagramm) sind dies die Motorordnungen 1,5, 3,0, 4,5, 6,0 und 7,5. Daher ist beim 3-Zylindermotor der Energieinhalt bei niedrigen Frequenzen vergleichsweise höher und das Motorgeräusch dementsprechend von niedrigeren Frequenzen dominiert.

2.3.4. Spektraler Schwerpunkt

Der spektrale Schwerpunkt bezeichnet allgemein jenen Bereich des Spektrums, in dem der Energiegehalt am höchsten ist. Nach Mauch (2011) führen eine Reduktion der Zylinderzahl und die damit verbundene Verschiebung des spektralen Schwerpunkts zu niedrigeren Frequenzen zu einem erhöhten Unwohlsein.[43] Dazu zeigt Abbildung 2-9 die unterschiedlichen Hauptfrequenzbänder und Anregungsamplituden eines 3- und eines 4-Zylindermotors und das subjektive Unwohlsein. Klar zu erkennen sind die Zunahme der Anregungsamplitude des 3-Zylinders gegenüber dem 4-Zylinder sowie die Absenkung der Hauptanregungsfrequenz (Zündordnung). Dies führt zu einer Zunahme des subjektiven Unwohlseins.

[43] Vgl. Mauch, et al. 2011, S. 536.

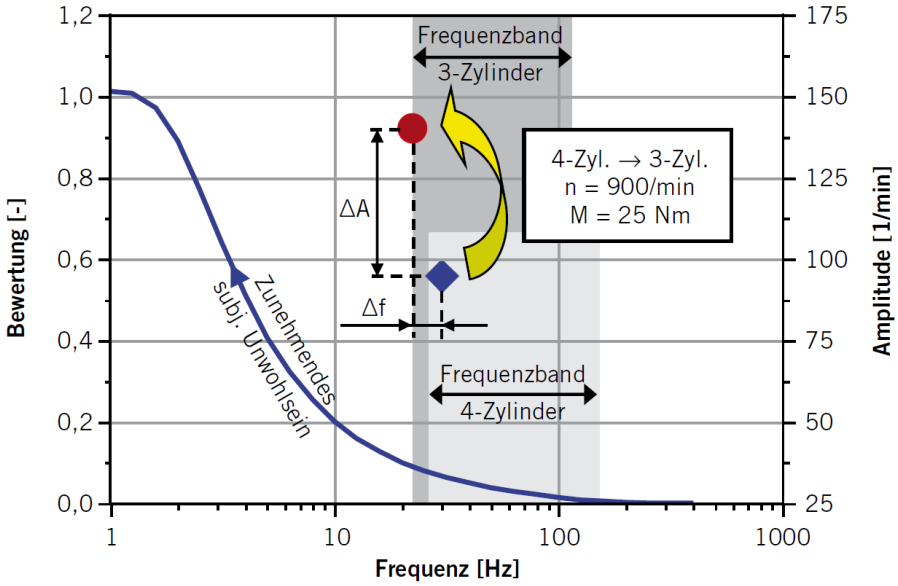


Abbildung 2-9: Subjektives Unwohlsein bei 3- und 4-Zylindermotoren[44]

2.3.5. Auswirkung auf die akustische Wahrnehmung

Die beschriebenen physikalischen Zusammenhänge können mit bestimmten psychoakustischen Effekten in Verbindung gebracht werden. Ein lauteres Innengeräusch führt zu höherer Lautheit, die unterschiedlichen Ordnungsmuster verursachen Unterschiede in der wahrgenommenen Tonhöhe und die Form der spektralen Energieverteilung hat einen Einfluss auf das harmonische Empfinden und das subjektive Unwohlsein.[45]

2.3.6. Harmonische Zusammenhänge

Zusätzlich zu den bisher genannten Zusammenhängen und Betrachtungsweisen ist eine Verbindung zwischen Motorakustik und Musikalischer Akustik möglich, indem der Klangcharakter von Motoren unter Aspekten der Harmonielehre[46] analysiert wird. Werden die Motorordnungen – z.B. von der Zündordnung beginnend im Abstand von 0,5 bis zur 12. Ordnung – betrachtet und in Verhältnisse gesetzt, so können diese wie in der Harmonielehre üblich mit Intervallbezeichnungen versehen werden. Als Intervall wird das Verhältnis zweier Frequenzen bezeichnet. Für die Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen ergeben sich andere dominante Motorordnungen (siehe Abschnitt 2.3.3) und in weiterer Folge andere Intervallverhältnisse. Es erfolgt eine Einteilung in konsonante Intervalle, welche wohlklingend sind und dissonante Intervalle mit einem spannungsvollen Klangcharakter. Beinhaltet etwa der Klang eines 4-Zylindermotors überwiegend konsonante Intervalle, so treten beim 3-Zylindermotor verstärkt auch Dissonanzen auf. Dies sorgt nach Gesichtspunkten der Harmonielehre für einen weniger gewohnten Höreindruck und einen subjektiven Unwohlklang.[47]

[44] Quelle: ebd., S. 536.
[45] Vgl. ebd., S. 536.
[46] Vgl. Alt und Jochum. 2003, S. 48ff.
[47] Vgl.ebd., S. 56.

Eine genauere Behandlung des Einflusses der Anordnung, Anzahl und Ausprägung von Motorordnungen bei Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen und eine Zusammenfassung der entsprechenden Auswirkungen bei einer harmonischen Analyse erfolgt in Abschnitt 6.1.

2.4. Sound-Design bei kleinen Motoren

Im Folgenden werden einige Beispiele zum Sound-Design bei Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen vorgestellt, welche zum Teil bereits praktische Umsetzung finden oder bisher nur als theoretische Ansätze existieren. Der Einsatz derartiger Systeme ist nicht nur bei Motoren kleiner Zylinderzahlen interessant, sondern zum Beispiel auch bei 4- oder 6-Zylindermotoren, welche auf Grund von Zylinderabschaltung in temporären 2- oder 3-Zylindermodi betrieben werden. Dabei sind die akustischen Unterschiede noch deutlicher wahrnehmbar[48], da ein schneller A-B-Vergleich zwischen Abschaltbetrieb und voll gefeuertem Betrieb möglich ist.

2.4.1. 2 = 4: 2-Zylinderfahrzeug mit 4-Zylinder-Innengeräusch

Diese Methode ist Teil eines Forschungsprojekts bei AVL und IEM und basiert auf der Kombination des vorhandenen Motorgeräusches mit aktivem Sound-Design[49] mittels Synchronisation und entsprechender Filterung. Ziel ist es, für ein Fahrzeug mit einem 2-Zylindermotor im Innenraum den Klangcharakter eines 4-Zylinderfahrzeugs zu generieren.

Dazu wird das Ordnungsmuster des 2-Zylindermotors beeinflusst. Abbildung 2-10 zeigt das Ordnungsmuster des 2-Zylindermotors mit der typischen 1,0. Motorordnung und deren stark ausgeprägten ganzzahligen Vielfachen. Abbildung 2-11 zeigt das durch Sound-Design erzeugte Ordnungsspektrum mit der annähernd eliminierten 1,0. Motorordnung und stattdessen einer dominanten 2,0. Motorordnung, sodass der Motor als 4-Zylinder empfunden wird.[50]

[48] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 201.
[49] Vgl. Graf, et al. 2011, S. 18.
[50] Vgl. ebd., S. 21.

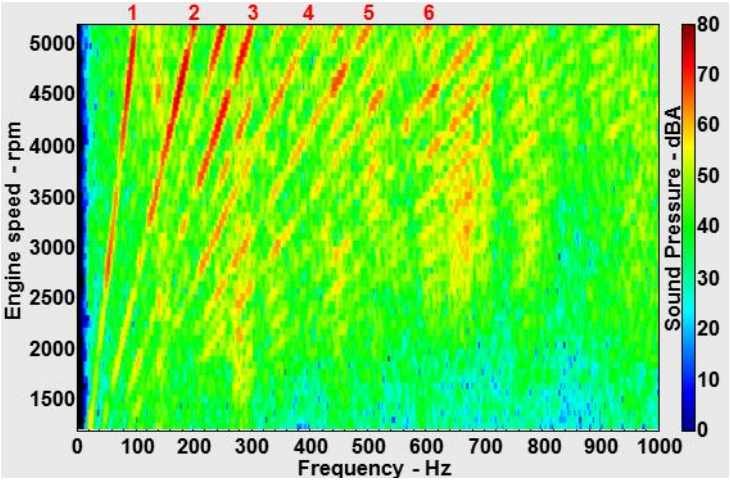


Abbildung 2-10: 2 = 4 – 2-Zylinder Baseline[51]

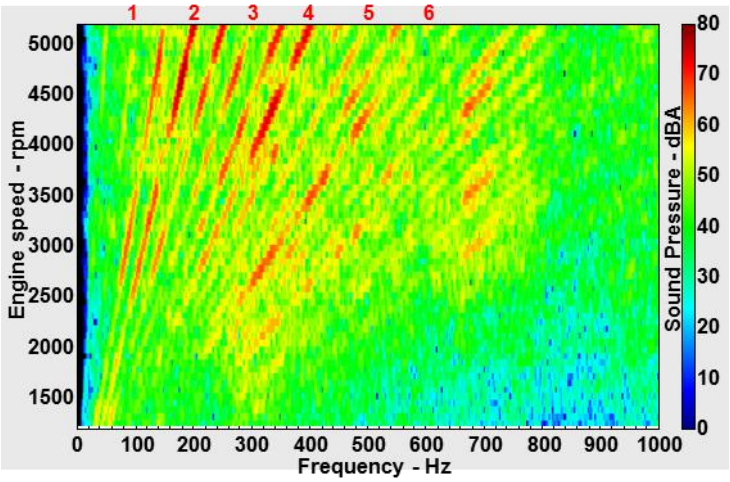


Abbildung 2-11: 2 = 4 – 4-Zylinder Sound-Design[52]

Der prinzipielle Aufbau des Systems[53] ist in Abbildung 2-12 skizziert. Ein Mikrophon im Motorraum erfasst das Originalgeräusch des 2-Zylindermotors und ein Controller extrahiert die Zündzeitpunkte. Dazu werden um 180° Kurbelwinkel[54] verschobene virtuelle Zündungssoundsignale generiert und im Fahrzeuginnenraum durch Lautsprecher und eine Anregung der Karosserie mit Shakern wiedergegeben.

[51] Vgl. ebd., S. 21.
[52] Vgl. ebd., S. 21.
[53] Vgl. ebd., S. 19.
[54] Anm.: Kurbelwinkel wird häufig mit KW abgekürzt.

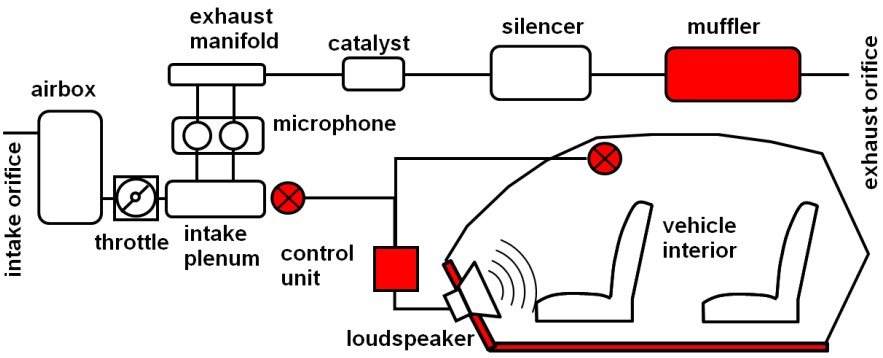


Abbildung 2-12: 2 = 4 – Systemübersicht[55]

Dabei ist eine Signalverarbeitung in Echtzeit notwendig, da das künstlich erzeugte Signal sowohl in der Zeit- als auch der Frequenzdomäne exakt zum existierenden 2-Zylindergeräusch passen muss. Das entsprechende Schema der Überlagerung des Originalgeräusches (Abbildung 2-13) mit dem künstlichen um 180° Kurbelwinkel verschobenen Signal (Abbildung 2-14) zur Bildung des 4-Zylinder-Innengeräusches (Abbildung 2-15) zeigen die folgenden Abbildungen.

Abbildung 2-13: 2-Zylinder Originalgeräusch[56]

Abbildung 2-14: Künstliches 2-Zylindergeräusch - 180° KW verschoben[57]

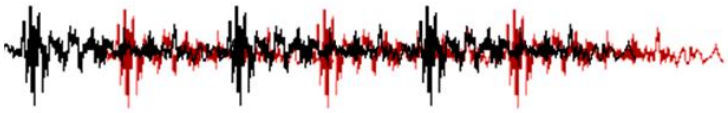


Abbildung 2-15: Überlagertes 4-Zylinder-Innengeräusch[58]

Durch die Implementierung ähnlicher Systeme ist auch eine Anwendung auf Motoren mit anderen Zylinderzahlen – zum Beispiel 3 = 6 – denkbar. Zur weiteren Verbesserung derartiger Systeme sind beispielsweise Modifikationen der Abgasanlage[59] durch den Einsatz von regelbaren Klappen denkbar. Dies wird durch den markierten Abgasschalldämpfer in Abbildung 2-12 angedeutet, darauf wird in dieser Arbeit aber nicht näher eingegangen.

[55] Vgl. ebd., S. 19.
[56] Vgl. ebd., S. 20.
[57] Vgl. ebd., S. 20.
[58] Vgl. ebd., S. 20.
[59] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 202ff.

2.4.2. Active Noise Cancelling im Fahrzeuginnenraum

Aktuell befinden sich bereits verschiedene Systeme zur aktiven Beeinflussung des Fahrzeuginnengeräusches in Modellen mehrerer Hersteller im Einsatz.[60] Diese Systeme werden in Verbindung mit Motoren mit Zylinderabschaltung eingesetzt und verwenden meist das im Fahrzeug integrierte Audio-System zur aktiven Geräuschunterdrückung. Die Systeme verschiedener Hersteller basieren auf unterschiedlichen Anzahlen von Mikrophonen (z.B. ein bis zwei bei Honda, bis zu vier bei Audi)[61] an unterschiedlichen Positionen im Fahrzeug. Das Grundprinzip ist jedoch bei fast allen Systemen ähnlich und deshalb in Abbildung 2-16 dargestellt.

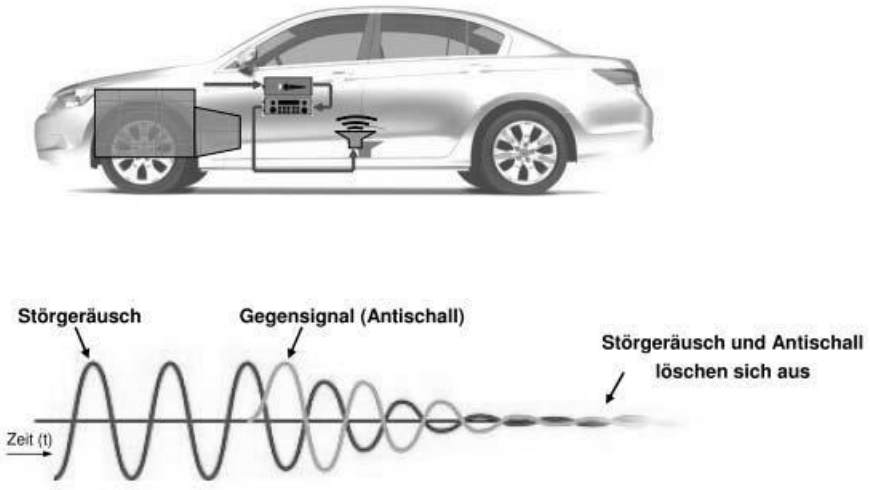


Abbildung 2-16: Grundprinzip eines ANC-Systems[62]

Jedoch ist der Einsatz eines effizienten ANC-Systems im Fahrzeuginnenraum mit vertretbarem technischen Aufwand in der Praxis nicht einfach.[63] Die skizzierte Schallauslöschung funktioniert nur bei exakt gegenphasiger Überlagerung der entsprechenden Signale.[64] Somit ist auf Grund der Inhomogenität des Schallfeldes eine wirkungsvolle Implementierung an allen Positionen des Fahrzeuginnenraums aufwendig und es kann bei Nichteinhalten der Bedingungen unter Umständen stellenweise sogar zu Verschlechterungen kommen.

2.4.3. Sound-Design nach Aspekten der Harmonielehre der Musikalischen Akustik

Wie schon in Abschnitt 2.3.6 erwähnt, können Motorgeräusche auch nach Gesichtspunkten der Harmonielehre der Musikalischen Akustik[65] betrachtet und analysiert werden. Durch Anheben und Absenken entsprechender Motorordnungen können die harmonischen Verhältnisse eines Motorgeräusches gestaltet und so dessen Klangcharakter verändert werden. Dies ist

[60] Vgl. ebd., S. 207.
[61] Vgl. ebd., S. 205.
[62] Vgl. ebd., S. 205.
[63] Vgl. ebd., S. 207.
[64] Vgl. Müller. 2004, S. 401.
[65] Vgl. Alt und Jochum. 2003, S. 48ff.

theoretisch zwar möglich, insbesondere da die Motorordnungen streng deterministische Komponenten darstellen und somit zu jedem Zeitpunkt vorhersagbare Frequenzen besitzen, jedoch ist eine praktische Realisierung äußerst aufwendig. Das grundsätzliche Ordnungspotential (ganze und halbe Motorordnungen) wird bereits durch die Bauart des Motors festgelegt. Während ein Anheben von Motorordnungen prinzipiell noch einfacher möglich wäre, allerdings die Gesamtlautheit erhöhen würde, ist ein Absenken durch aktive Geräuschunterdrückung (ANC) nur schwer umsetzbar (siehe Abschnitt 2.4.2).[66] Alt und Jochum (2003) schlagen in diesem Zusammenhang sowohl die Modifizierung der Mündungsgeräusche von Ansaug- und Auspuffsystem (in Verbindung mit Schaltorganen) als auch Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrzeugübertragungsverhaltens vor.[67]

2.5. Objektivierung subjektiver Geräuschbewertung

Die Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit des menschlichen Gehörs zur Schallanalyse übertrifft die Eigenschaften jeglichen technischen Systems.[68] In der Regel ist es somit nicht ausreichend, die Wirkung von Geräuschen auf den Menschen ausschließlich mit physikalischen Mess- und Analyseverfahren zu beurteilen.

Die Grundaufgabe der Psychoakustik ist das Beschreiben der Beziehungen zwischen physikalisch definierten Schallreizen und den von ihnen hervorgerufenen menschlichen Hörwahrnehmungen[69]. Während die quantitative Beschreibung physikalischer Größen durch die entsprechenden technischen Hilfsmittel schnell und einfach durchführbar ist, ist dies für die Hörwahrnehmung nicht so einfach möglich. Üblicherweise werden aus den bei speziellen Hörversuchen mit zahlreichen Versuchspersonen ermittelten Zusammenhängen zwischen Reiz und menschlicher Empfindung mathematische Beschreibungen abgeleitet und entsprechende Modelle erstellt.[70] Anhand der Ergebnisse kann eine Metrik für die Hörwahrnehmung erarbeitet werden, welche der physikalischen Metrik entspricht. Viele objektive Bewertungsgrößen der Psychoakustik wurden und werden auf diese Weise entwickelt.

2.6. Psychoakustische Bewertungsgrößen

In Standardwerken für Psychoakustik[71] finden sich Parameter zur Beschreibung sowohl von zeitlichen als auch von spektralen Zusammenhängen und anderen psychoakustischen Effekten. Nicht alle dieser Parameter sind in der Fahrzeug- und Motorakustik im Einsatz.[72] Die folgenden Abschnitte stellen einige Parameter zur objektiven Geräuschbeurteilung in der Fahrzeugakustik

[66] Vgl. ebd., S. 401.
[67] Vgl. ebd., S. 56.
[68] Vgl. Sottek. 1993, S. 1.
[69] Vgl. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung. 1994, S. 61.
[70] Vgl. Sottek. 1993, S. 1.
[71] Fastl und Zwicker. 2007.
[72] Vgl. Pischinger, et al. 2009, S. 1.

vor, welche zum Teil bei den Literaturrecherchen gefunden wurden oder bei den Untersuchungen im Zuge dieser Masterarbeit intensiver betrachtet werden bzw. auch zur Berechnung des entwickelten Parameters verwendet werden.

2.6.1. Bewertungsgrößen aus der Literaturrecherche

2.6.1.1. Booming/Rumbling-Index

Sang-Kwon Lee (2008) nimmt eine Bewertung der Fahrzeuginnengeräuschqualität anhand eines Booming-Index und eines Rumbling-Index vor.[73] Dabei korreliert Booming (Dröhnen) mit Lautheit und Schärfe und Rumbling (Rumpeln) mit Lautheit und Rauigkeit. Die Bewertung basiert auf Modellen von künstlichen neuronalen Netzwerken und die beiden Indizes werden zu einem Parameter zusammengefasst. Eine vereinfachte Darstellung des Prinzips der Parameterermittlung[74] zeigt Abbildung 2-17 links. Das Modell zur Erhöhung der Korrelation zwischen subjektiven Aussagen und dem entwickelten Sound Index[75] zeigt Abbildung 2-17 rechts.

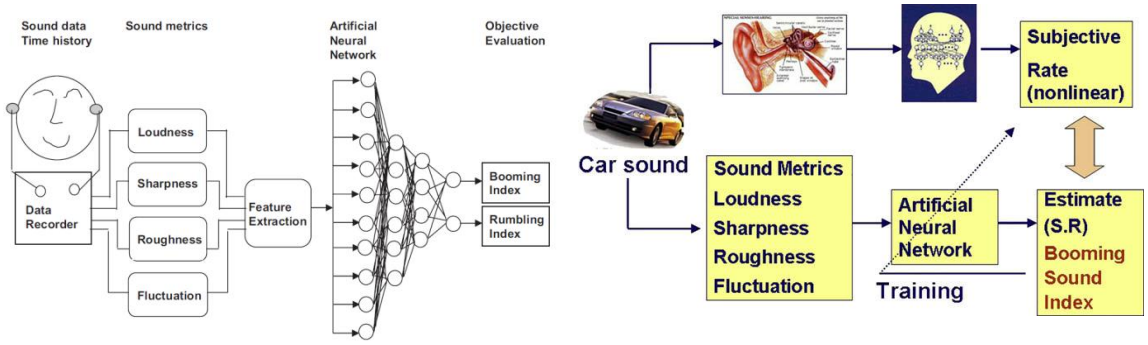


Abbildung 2-17: Modelle des Booming/Rumbling-Index[76]

Als Basis zur Entwicklung des Index dienten Innengeräuschaufnahmen von Fahrzeugen mit 4-, 6- und 8-Zylindermotoren bei Volllastbeschleunigungen auf einer Teststrecke im Drehzahlbereich von 1600 bis 4500 rpm. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Parameterentwicklung sind Systeme zur aktiven Beeinflussung des Fahrzeuginnengeräusches einsetzbar.[77]

2.6.1.2. Rauigkeitsmodell von BMW[78]

Im vorliegenden Modell wird die Motorrauigkeit als wesentliches Kriterium zur subjektiven Bewertung des Motorgeräuschcharakters beschrieben und die Entstehung der Motorrauigkeit wird durch Modulationen benachbarter ganz- und halbzahliger Motorordnungen begründet. Das entwickelte Modell zur Bestimmung der Motorrauigkeit beruht auf einer ordnungsgesteuerten

[73] Vgl. Lee. 2008.
[74] Vgl. Lee und Lee. 2009, S. 2
[75] Vgl. ebd., S. 3.
[76] Quelle: ebd., S. 2-3.
[77] Vgl. Lee. 2008, S. 2.
[78] Vgl. Martner, et al. 2000.

Frequenzanalyse. Die aus der Rauigkeitsdefinition von Zwicker und Fastl (siehe Abschnitt 2.6.2.1) bekannten Zusammenhänge zwischen Rauigkeit, Trägerfrequenz und Modulationsfrequenz (vgl. Abbildung 2-20) werden auf Motorordnungsspektren angewandt. Daraus wird in weiterer Folge ein fester Bereich maximaler Rauigkeitsempfindung in Abhängigkeit von Trägerfrequenz und Modulationsfrequenz abgeleitet. Bei der Auswertung eines Ordnungsspektrums an einer bestimmten Drehzahl wird dieser Bereich zur Bestimmung der für die Rauigkeit maßgeblichen Ordnungsverhältnisse herangezogen. Abbildung 2-18 zeigt die Zusammenhänge zwischen Rauigkeitsempfindung und Motorordnungen beispielhaft für Drehzahlen von 3070 rpm (links) und 5220 rpm (rechts).

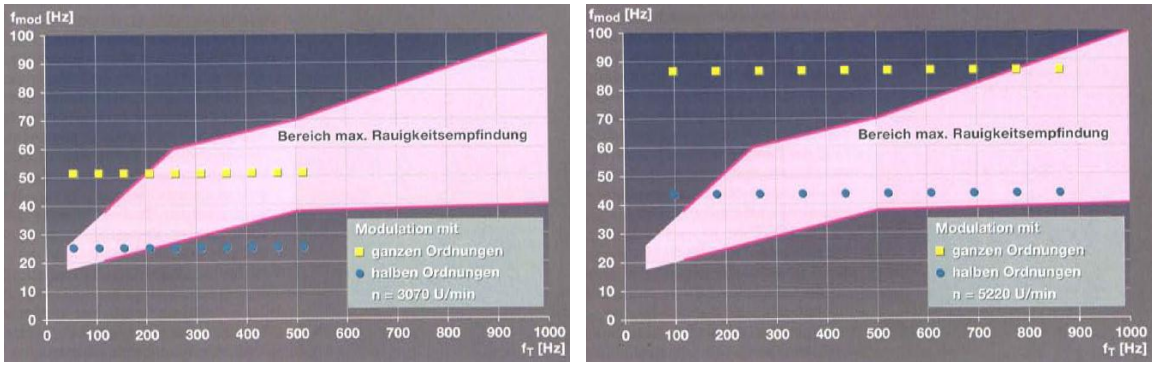


Abbildung 2-18: Bereiche maximaler Rauigkeit[79]

Die gelben und blauen Markierungen repräsentieren die Trägerfrequenzen der ganzzahligen Motorordnungen von der 1. bis 10. Ordnung bei der jeweiligen Drehzahl und die sich jeweils daraus ergebenden Modulationsfrequenzen bei Modulation benachbarter ganzzahliger (gelbe Quadrate) bzw. halbzahliger (blaue Punkte) Motorordnungen. Bei 3070 rpm ergibt sich vor allem dann ein Rauigkeitseindruck, wenn ganzzahlige Ordnungen oberhalb der 4. Motorordnung energetisch stark hervortreten, während bei 5220 rpm vor allem die durch Halbordnungen verursachten Modulationsfrequenzen im relevanten Bereich liegen. Anhand dieser Erkenntnisse werden Filter mit variablen Mittenfrequenzen in Abhängigkeit der ganz- und halbzahligen Ordnungen verwendet. Damit wird erreicht, dass im betrachteten Analysefrequenzband immer mindestens drei Ordnungen liegen und diese zur Bestimmung des Modulationsgrades verwendet werden können.

Für die Untersuchungen zur Modellentwicklung wurden Kunstkopfaufnahmen von Volllastbeschleunigungen im 2. Gang bei Fahrten auf einer Teststrecke verwendet. Höhere Gänge und sehr hohe Drehzahlen wurden aufgrund des stärkeren Einflusses von Wind- und Rollgeräuschen nicht untersucht.

[79] Quelle: ebd., S. 681.

2.6.1.3. Kennzahlen für Geräuschphänomene[80]

Pischinger, Lange et al. gehen davon aus, dass eine objektive Motorgeräuschbeurteilung nicht mit einem einzelnen Parameter möglich ist.[81] Stattdessen werden die bei verschiedenen Betriebspunkten unterschiedlicher Motoren auftretenden Geräuschphänomene mit verschiedenen akustischen Kennzahlen beschrieben. Die wichtigste Unterteilung erfolgt in impulshaltige und tonale Geräusche. Anhand der vorliegenden Geräuschform, werden die entsprechenden objektiven Bewertungsgrößen verwendet. Diese setzen sich im Wesentlichen aus Anteilen von Lautheit und Modulation zusammen. Eine Übersicht über die Gültigkeitsbereiche der objektiven Parameter gibt Abbildung 2-19.

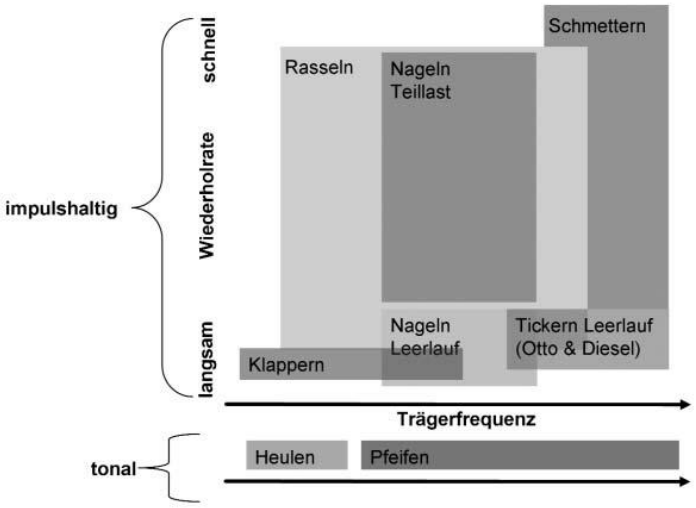


Abbildung 2-19: Gültigkeitsbereiche der objektiven Parameter[82]

Zur Parameterentwicklung wurden auch die Aussagen subjektiver Tests berücksichtigt. Zusammenfassend kamen die Untersuchungen zum Ergebnis, dass ein „gutes“ Geräusch im Allgemeinen leise und wenig moduliert ist.

2.6.2. Erste Annahmen

Von FahrzeugakustikerInnen werden im Zusammenhang mit der Klangbeschreibung von Motoren kleiner Zylinderzahlen immer wieder die Begriffe „Rauigkeit“ oder „rau“ genannt. Diese Aussagen werden auch anhand der in Abschnitt 2.6.1.2 präsentierten Erkenntnisse bestätigt. Basierend auf früheren Untersuchungen wurde von AVL und Forschungspartnern ein Parameter zur Bewertung der Motorrauigkeit entwickelt. Daher wurden die ersten Untersuchungen im Zuge dieser Masterarbeit anhand der Rauigkeit durchgeführt. Der folgende Abschnitt gibt eine Zusammenfassung der Definition der psychoakustischen Bewertungsgröße Rauigkeit[83,84].

[80] Vgl. Pischinger, et al. 2006.
[81] Vgl. ebd., S. 897
[82] Quelle: ebd., S. 902.
[83] Vgl. Fastl und Zwicker. 2007, S. 257ff.
[84] Vgl. Sottek. 1993, S. 133ff.

2.6.2.1. Rauigkeit

Amplituden- oder frequenzmodulierte Töne führen je nach Frequenz der Hüllkurvenänderungen (d.h. Modulationsfrequenzen) zu zwei unterschiedlichen Hörempfindungen.[85]

Bei langsamen Änderungen, d.h. Modulationsfrequenzen bis 20 Hz, kann das Gehör den zeitlichen Lautstärkeänderungen folgen und die resultierende Hörempfindung wird durch den Begriff Schwankungsstärke beschrieben. Modulationsfrequenzen zwischen 20 und 300 Hz werden als Veränderungen der Tonqualität empfunden und durch die Empfindungsgröße Rauigkeit beschrieben.

Rauigkeiten frequenzmodulierter und amplitudenmodulierter Töne werden sehr ähnlich wahrgenommen.[86] Das heißt, dass nicht die zeitliche Binnenstruktur des Signals, sondern die Frequenzlage, die Modulationsfrequenz und der Modulationsgrad für den Rauigkeitseindruck entscheidend sind. Der Einfluss des Schallpegels ist relativ gering, sodass bei einem Pegelanstieg von 20 dB die Rauigkeit maximal um den Faktor zwei zunimmt.[87]

Die Angabe der Rauigkeit erfolgt mit der Einheit asper. Eine Normierung[88] auf 1 asper erfolgt für einen Sinuston mit einer Frequenz von 1 kHz und einem Pegel von 60 dB, dessen Amplitude zu 100 % (Modulationsgrad = 1) mit einer Frequenz von 70 Hz moduliert wird. In Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz kann für die Rauigkeit somit eine Bandpasscharakteristik angeben werden.[89] Die Mittenfrequenz liegt bei 70 Hz, für niedrigere Frequenzen nimmt die Rauigkeit ab und geht schließlich in die Hörempfindung Schwankungsstärke über, oberhalb von 70 Hz ergibt sich ebenfalls eine Abnahme.[90] Abbildung 2-20 zeigt die Abhängigkeit der Rauigkeit von der Modulationsfrequenz (f_{mod}) bei verschiedenen Mittenfrequenzen (f_c) und einem Modulationsgrad von 1.

[85] Vgl. ebd., S. 133 und Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung. 1994, S. 92.
[86] Vgl. Sottek. 1993, S. 133.
[87] Vgl. ebd., S. 133.
[88] Vgl. Fastl und Zwicker. 2007, S. 257.
[89] Vgl. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung. 1994, S. 92.
[90] Vgl. Fastl und Zwicker. 2007, S. 258.

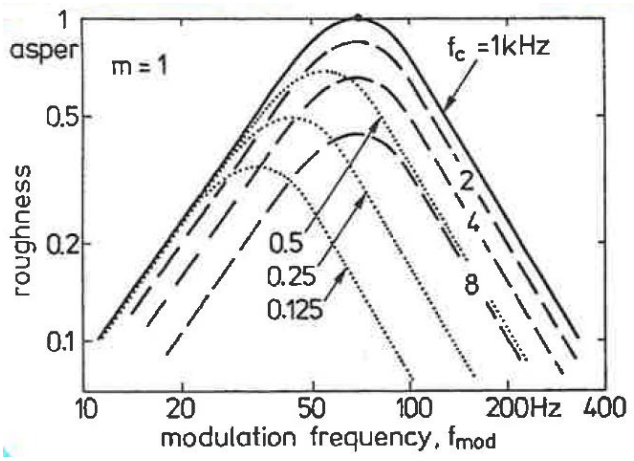


Abbildung 2-20: Rauigkeit in Abhängigkeit von f_{mod}[91]

Die in Abschnitt 4.5.1 dokumentierten Untersuchungen belegen, dass der auf der Rauigkeitsempfindung basierende Harshness Index keine geeignete Größe zur Beschreibung der Klangcharaktere der Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen ist. Dies liegt daran, dass mit dem Harshness Index eine bestimmte Rauigkeit beschrieben wird, aber den Fahrzeuggeräuschen je nach Zylinderzahl subjektiv unterschiedliche Arten von Rauigkeit zugeordnet werden. Eine Beschreibung mit mehr oder weniger rau ist in diesem Zusammenhang folglich nicht ausreichend. Zusätzlich müsste der Charakter der Rauigkeit an sich näher beschrieben werden. In Abschnitt 6.5 wird auf diesen Ansatz noch einmal näher eingegangen.

2.6.3. Bewertungsgrößen für die Parameterentwicklung

Die für den entwickelten Parameter verwendeten Bewertungsgrößen Loudness, Low Frequency Content und Extended Articulation Index sind im Folgenden beschrieben.

2.6.3.1. Loudness nach ISO 532B (DIN 45631)

Die Lautheit (engl. Loudness) laut Norm ISO 532B (bzw. DIN 45631[92]) berechnet sich nach dem von Zwicker (2007)[93] beschriebenen Verfahren. Dieses ermöglicht die Einordnung von Schallempfindung nach ihrer subjektiv wahrgenommenen Lautstärke – diese wird als Lautheit bezeichnet. Die Lautheitsbewertung entspricht der menschlichen Hörempfindung wesentlich besser als eine reine Schalldruckpegelangabe[94], da zum Beispiel die Frequenzabhängigkeit des Ohres sowie spektrale Maskierungseffekte berücksichtigt werden.

In der Norm wird zwischen frontal einfallendem Schall und diffusem Schallfeld unterschieden. Für die Auswertung von Fahrzeuginnengeräuschen wird ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt. Zur Bestimmung der Lautheit werden die Terzpegel für Terzbandmittenfrequenzen von 40 Hz

[91] Quelle: ebd., S. 258.
[92] Vgl. DIN. 2008.
[93] Vgl. Fastl und Zwicker. 2007, S. 203ff.
[94] Vgl. Sottek. 1993, S. 129. und Fastl und Zwicker. 2007, S. 203.

bis 12,5 kHz in Diagramme (siehe als Beispiel Abbildung 2-21) eingetragen und die zugehörige Lautheit S_{GF} auf der entsprechenden Achse abgelesen.

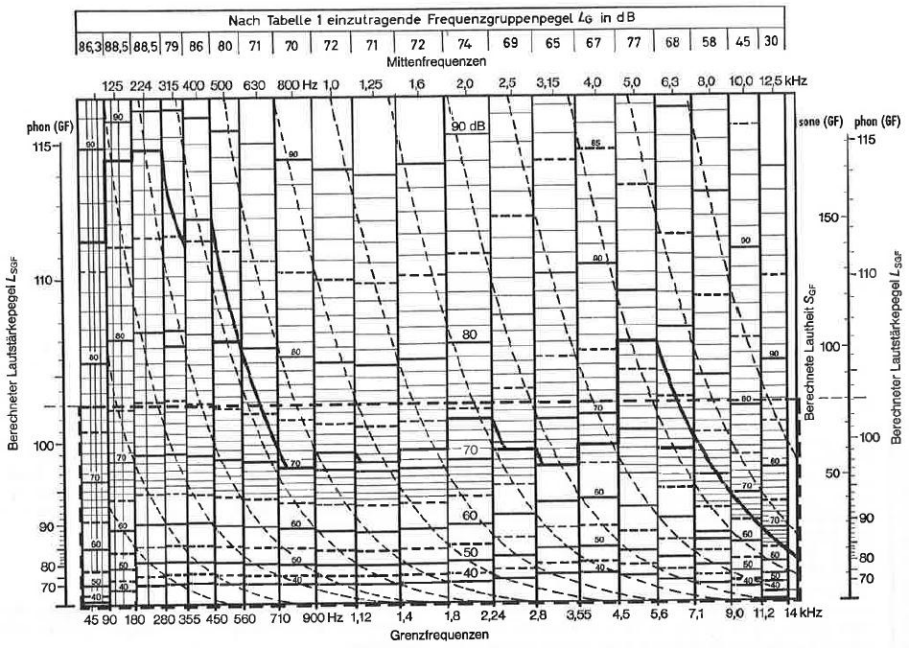


Abbildung 2-21: Beispiel für Lautheitsberechnung nach DIN 45631[95]

Die zur Angabe der Lautheit verwendete Einheit ist sone. Eine Normierung von 1 sone erfolgt auf einen Referenzton von 1 kHz mit einem Pegel von 40 dB.[96]

2.6.3.2. Low Frequency Content (LFC)

Der Low Frequency Content (LFC)[97] ist ein bei AVL entwickeltes Maß für die Beschreibung der Signalenergie bei tiefen Frequenzen. Zur Berechnung des LFC wird der Schalldruck des bandpassgefilterten Signals zwischen 10 und 400 Hz verwendet. Prinzipiell ist der LFC einheitenlos, er wird aber mit dB-Werten dargestellt.

2.6.3.3. Extended Articulation Index

Der Extended Articulation Index basiert auf der Berechnung des ursprünglichen Articulation Index[98] und ist ein Maß für die Verständlichkeit von Sprache in einer bestimmten Umgebung. Die Sprachverständlichkeit wird häufig zur Bewertung des akustischen Komforts im Fahrzeuginnenraum herangezogen.[99]

Es gilt die Annahme, dass die Sprachverständlichkeit vom Pegel und von den spektralen Eigenschaften des Hintergrundgeräusches abhängt.[100] Im Diagramm in Abbildung 2-22 ist eine Fläche eingezeichnet, welche einerseits durch den Schalldruck (von Flüstern bis Schreien) und

[95] Quelle: DIN. 2008.
[96] Vgl. Fastl und Zwicker. 2007, S. 205.
[97] Vgl. Biermayer. 2013, S. 12.
[98] Vgl. ebd., S. 11.
[99] Vgl. Zeller. 2009, S. 155.
[100] Vgl. Head Acoustics GmbH. 1993, S. 17.

andererseits durch den relevanten Frequenzbereich (200 Hz bis 6300 Hz) für menschliche Sprache begrenzt wird und dementsprechend als Sprachfläche bezeichnet wird.

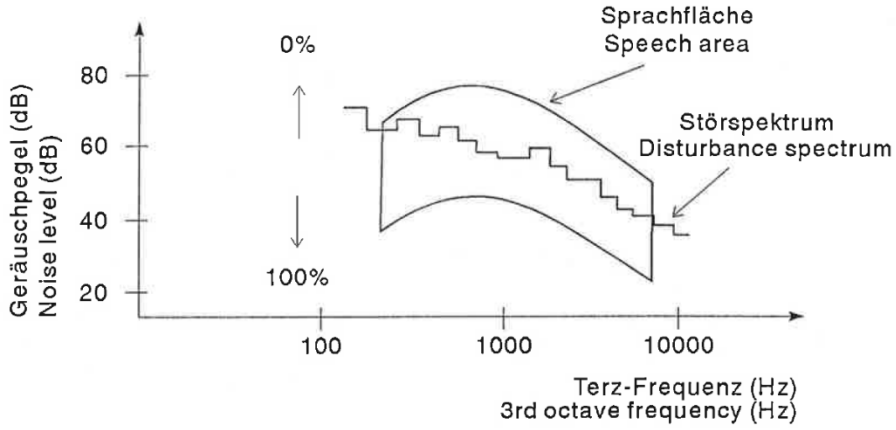


Abbildung 2-22: Articulation Index Prinzip[101]

Im Bereich der Sprachfläche in Abbildung 2-22 ist beispielhaft ein Spektrum eines Störgeräusches in Terzpegeln eingetragen. Liegt das Störspektrum im unteren Bereich der Sprachfläche, wird die Sprachverständlichkeit nur leicht gestört und der Articulation Index nimmt hohe Werte an. Dies wird durch den Pfeil in Richtung 100 % angedeutet. Wenn das Störspektrum allerdings im oberen Bereich der Sprachfläche liegt, sind niedrige Werte des Articulation Index (nahe an 0 %) zu erwarten, was gleichbedeutend mit einer schlechten Sprachverständlichkeit ist.[102]

Die Berechnung des Index erfolgt mit einer Bewertungstabelle (Tabelle 9-3 im Anhang), in der allen Terzbandpegeln Werte zugewiesen werden. Diese werden über das gesamte betrachtete Spektrum aufsummiert. Dabei können sich Werte zwischen 0 % und 100 % ergeben.

Da diese Form der Berechnung nur einen begrenzten Pegelbereich abdeckt, wurde auch ein sogenannter Extended Articulation Index[103,104] entwickelt. Für dessen Berechnung wird die Bewertungstabelle in jedem Terzband zu niedrigeren und höheren Pegeln hin erweitert. Somit ergeben sich für den erweiterten Artikulationsindex auch Werte, welche kleiner als 0 % bzw. größer als 100 % sein können. Auf Grund der größeren Dynamik des Extended Articulation Index wird dieser für sämtliche Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

2.6.4. Weitere untersuchte Bewertungsgrößen

Die folgenden Abschnitte fassen Bewertungsgrößen zusammen, welche die Charakterisierung bestimmter Fahrzeuggruppen ermöglichen, aber für die Parameterentwicklung nicht verwendet werden.

[101] Vgl. ebd., S. 17.
[102] Vgl. ebd., S. 18.
[103] Vgl. ebd., S. 18.
[104] Anm.: Als Abkürzung für den Extended Articulation Index wird EAI verwendet.

2.6.4.1. Annoyance (Europe)

Die Annoyance ist eine von AVL entwickelte Größe zur Beschreibung der Lästigkeit eines Geräusches.[105] Auf Grund unterschiedlicher Auslegungen für Europa und für Japan, wird zur näheren Beschreibung „Europe“ in Klammern angeführt.

Die Annoyance setzt sich aus bestimmten Grundgrößen wie beispielsweise der Lautheit, der Rauigkeit, der Schärfe und weiteren Größen zusammen.[106] Die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Grundgrößen sowie zusätzliche Konstanten wurden hinsichtlich einer hohen Übereinstimmung mit subjektiven Lästigkeitsbewertungen optimiert und gehorchen somit keinen strengen mathematischen Gesetzen.

Da es sich beim Parameter Annoyance bereits um eine zusammengesetzte Bewertungsgröße handelt und diese primär durch die Lautheit gekennzeichnet ist, wurde sie in weiterer Folge nicht für die Entwicklung der neuen Bewertungsgröße verwendet. Außerdem ist das Potential zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Fahrzeugen mit Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen im Besonderen für benzinbetriebene Fahrzeuge gering, wie Tabelle 4-3 in Abschnitt 4.5.3 zeigt.

2.6.4.2. Sharpness nach Aures

Die Schärfe repräsentiert einen wesentlichen Teil der menschlichen Klangfarbenwahrnehmung[107] und beschreibt die Verteilung von Energie im Spektrum, im Besonderen den Anteil bei hohen Frequenzen im Verhältnis zu jenem bei tieferen Frequenzen[108]. Spektrale Feinstrukturen werden nicht berücksichtigt, entscheidend ist die Lage des Schwerpunkts der Fläche unter der Einhüllenden des Spektrums (auch als Lautheits – Tonheitsmuster bezeichnet)[109]. Je weiter dieser Schwerpunkt bei hohen Frequenzen liegt, desto schärfer klingt das Geräusch.[110]

Die Literatur beschreibt drei gängige Berechnungsverfahren.[111] Im einfachsten Fall wird die ungewichtete Schärfe betrachtet, welche durch einfache Verhältnisbildung aus der spezifischen Lautheit in 24 Barkbändern zur Gesamtlautheit berechnet wird und mit der Einheit Bark(G) beschrieben wird. Daneben gibt es noch zwei gewichtete Verfahren, nach Zwicker bzw. nach Aures. Diese sind in der Berechnungsweise ähnlich und verwenden lediglich verschiedene Gewichtungsfunktionen. Als Einheit wird bei beiden Verfahren acum(G) verwendet und es gilt, dass die Schärfe eines Sinustons mit 1 kHz und einem Pegel von 60 dB gleich 1 acum

[105] Vgl. Biermayer. 2013, S. 4.
[106] Vgl. ebd., S. 4.
[107] Vgl. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung. 1994, S. 90.
[108] Vgl. Zeller. 2009, S. 155.
[109] Vgl. Sottek. 1993, S. 132.
[110] Vgl. Zeller. 2009, S. 155.
[111] Vgl. Biermayer. 2013, S. 5-6 und Sottek. 1993, S. 132.

entspricht. Auf Grund der besser differenzierten Schärfewerte[112] wird das Berechnungsverfahren nach Aures in diesem Zusammenhang bevorzugt verwendet.

Der Parameter Schärfe ergibt bei benzinbetriebenen Fahrzeugen leicht unterschiedliche Wertebereiche für die Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen (vgl. Tabelle 4-2 in Abschnitt 4.5.2). Da der Anteil hochfrequenter Geräusche im Fahrzeuginnenraum stark von der Dämmung im Fahrzeug abhängig ist[113], können Schärfeunterschiede nur sehr bedingt auf den Motor zurückgeführt werden. Daher wird die Schärfe zur Berechnung des entwickelten Parameters nicht verwendet.

2.6.4.3. CKI – Combustion Knocking Index

Der CKI ist ein Parameter zur objektiven Bewertung von Nagelgeräuschen bei Verbrennungsmotoren[114], welches besonders bei Dieselaggregaten aber auch bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung auftreten und die Klangqualität mindern kann. Der Berechnungsalgorithmus wurde hinsichtlich einer hohen Korrelation mit den Bewertungen von Versuchspersonen optimiert.

Die Berechnung des CKI[115] umfasst einige wesentliche Schritte. Zu Beginn erfolgt eine Gewichtung und Unterteilung des betrachteten Zeitsignals in Frequenzbänder und die Berechnung der Einhüllenden. Die Eigenschaften des menschlichen Gehörs hinsichtlich zeitlicher Maskierung werden vom Algorithmus berücksichtigt. Durch die Bestimmung des Modulationsgrades des Signals und durch die Berücksichtigung spektraler Maskierungseffekte werden die einzelnen Frequenzbänder wieder zusammengefasst und ein Einzahlwert für den CKI kann bestimmt werden.

Anhand des CKI können die Fahrzeuggruppen gleicher Zylinderzahl bezüglich der beiden Brennverfahren im Mittel unterschieden werden. Eine Unterscheidung anhand der Zylinderzahlen ist im hohen Drehzahlbereich nicht möglich (vgl. Ergebnisse der Klassifizierungen in Abschnitt 4.14.2).

2.7. Boxplotdarstellung

Um die Form von Datenverteilungen optisch nachvollziehen zu können und bereits erste Aussagen über die Unterscheidbarkeit von Gruppen machen zu können, werden für die Darstellung Boxplots verwendet. Zur Erklärung der Darstellungsform zeigt Abbildung 2-23 einen in MATLAB® erzeugten Boxplot.

[112] Vgl. Zeller. 2009, S. 155.
[113] Vgl. Basshuysen. 2012, S. 1023.
[114] Vgl. Graf, et al. 2013, S. 479.
[115] Vgl. ebd., S. 480.

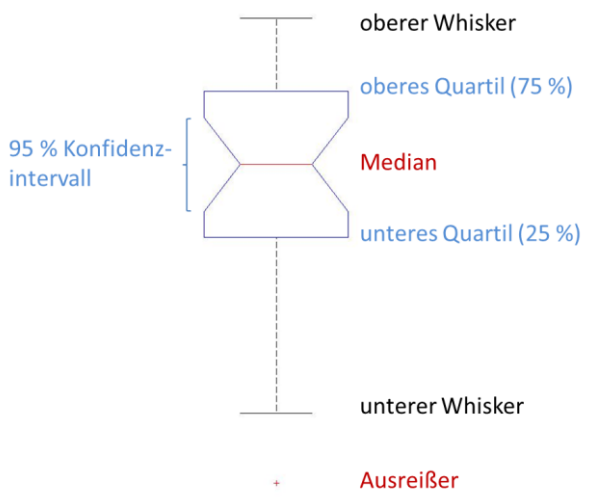


Abbildung 2-23: Boxplotdarstellung[116]

Anhand der Boxplotdarstellung kann gleichzeitig eine zentrale Tendenz und die Variabilität einer Verteilung veranschaulicht werden.[117] Die durch unteres und oberes Quartil (Interquartilsbereich, IQR) begrenzte Box repräsentiert die mittleren 50 % einer Verteilung. Die Whisker kennzeichnen Werte der Verteilung, welche kleiner als das erste Quartil bzw. größer als das dritte Quartil sind. Die Länge der Whisker wird standardmäßig mit 1.5*IQR festgelegt. Werte, welche nicht mehr innerhalb dieser Whiskergrenzen liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Zusätzlich zu den genannten Standardgrößen einer Boxplotdarstellung kann das 95 % Konfidenzintervall um den Median eingezeichnet werden. Anhand der Lage der Konfidenzintervalle können erste Abschätzungen der Unterscheidbarkeit von Gruppen getätigt werden.[118] Liegen keine Überschneidungen zwischen den Konfidenzintervallen der betrachteten Gruppen vor, so kann von einer Unterscheidbarkeit ausgegangen werden. Überschneiden sich die Konfidenzintervalle, so ist eine sichere Unterscheidbarkeit nicht mehr garantiert.

[116] Vgl. Bortz und Schuster. 2010, S. 44.
[117] Vgl. ebd., S. 44.
[118] Vgl. Keller. 2012.

3. Datenbasis und Ausgangssituation

Dieses Kapitel beschreibt die zur Durchführung dieser Arbeit verwendete Datenbasis. Diese basiert auf der AVL VOICE Datenbank mit Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen und wurde für die Verwendung entsprechend adaptiert.

3.1. Eigenschaften der Fahrzeug-Datenbank

3.1.1. AVL VOICE

AVL VOICE – Vehicle Objective Index Calculation und Evaluation (Logo siehe Abbildung 3-1) – wurde bei AVL entwickelt, um eine Datenbank an Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen zu verwalten.

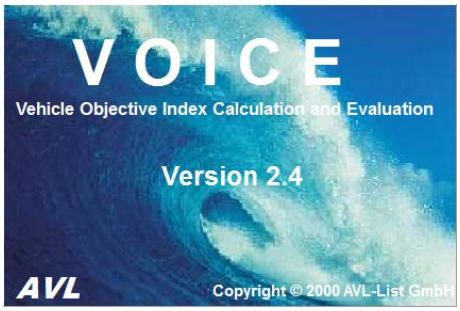


Abbildung 3-1: AVL VOICE Logo[119]

Neben der Verwaltung der Datensätze werden anhand der Geräuschaufnahmen 30 verschiedene akustische und psychoakustische Bewertungsgrößen mit Drehzahlbezug berechnet. Somit besteht die Möglichkeit, in der Datenbank befindliche Fahrzeuge anhand dieser Parameter[120] zu bewerten und zu vergleichen. Eine Liste der VOICE-Parameter befindet sich in Tabelle 9-2 im Anhang.

3.1.2. Aufnahmeverfahren

Um eine gleichbleibende Qualität und somit die Vergleichbarkeit aller Innengeräuschaufnahmen in der Datenbank zu garantieren, werden diese mit dem standardisierten Aufnahmeverfahren AVL SOURCE[121] aufgezeichnet. Dazu wird an einer definierten Position auf dem Beifahrersitz ein Kunstkopf (siehe Abbildung 3-2) mit zwei Mikrofonen befestigt.

[119] Quelle: Eigene Abbildung.
[120] Anm.: Diese Parameter werden in weiterer Folge häufig als VOICE-Parameter bezeichnet.
[121] Vgl. AVL Acoustic. 2010.

Abbildung 3-2: SOURCE Kunstkopfaufnahmesystem[122]

Über ein Vorverarbeitungssystem werden die kalibrierten Mikrofonsignale und ein Drehzahlsignal mit dem AVL Recorder[123] aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt in einem konventionellen Stereo Wave-File, wobei die Drehzahlinformation im Bit der kleinsten Quantisierungsstufe (least significant bit, LSB) kodiert wird.

Um die Einflüsse durch Veränderungen des Straßenbelags und der Umgebung gering zu halten, werden alle Aufnahmen auf der AVL Teststrecke durchgeführt.

3.1.3. Fahrzustände

Um einen Gesamteindruck über die akustischen Eigenschaften eines Fahrzeuges erlangen zu können, werden etwa 30 definierte stationäre und dynamische Fahrzustände aufgezeichnet.

Stationäre Zustände sind beispielweise Leerläufe sowie Konstantfahrten in definierten Gängen bei vorgegebener konstanter Geschwindigkeit oder Drehzahl. Instationäre (dynamische) Fahrzustände sind Beschleunigungen in verschiedenen Gängen bei vorgegebenen Beschleunigungswerten (g-Werte), Schubzustände sowie Start-Stopp-Vorgänge.

3.1.4. Fahrzeugtypen

Die AVL VOICE Datenbank beinhaltet Aufnahmen von etwa 400 Fahrzeugen. Diese bilden ein breites Spektrum an verschiedenen Motorisierungen, Klassen und Marken ab. Die Datenbank beinhaltet Fahrzeuge mit Diesel- und Ottomotoren verschiedener Zylinderzahlen (zwei bis zwölf) und unterschiedlichen Hubraumvolumina (von 800 ccm bis 6000 ccm) sowie Elektro- und Hybridfahrzeuge. Darunter befinden sich Fahrzeuge mit manuellen Schaltgetrieben und mit verschiedenen Varianten von Automatikgetrieben. Sämtliche Fahrzeugkategorien und -klassen werden abgedeckt, sodass die Datenbank einen repräsentativen Ausschnitt weltweiter Serienfahrzeuge namhafter Hersteller der letzten zehn Jahre bietet.

[122] Quelle: Eigene Abbildung.
[123] Vgl. AVL Acoustic. 2008, S. 3ff.

3.1.5. Eigenschaften der Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen

Da es sich bei den Aufnahmen in der Datenbank um Fahrzeuginnengeräusche handelt, beinhalten diese neben dem in der Fahrgastzelle hörbaren Motorgeräusch auch Nebengeräusche. Die wichtigsten sind Wind- und Reifenrollgeräusche sowie eventuell auftretende Moden im Fahrgastraum oder Resonanzen im Fahrzeugübertragungsverhalten, welche bei Anregung im entsprechenden Frequenzbereich hörbar werden können.

3.2. Aufbereitung der Datenbasis

Im Zuge dieser Masterarbeit wird nicht die gesamte beschriebene Datenbank untersucht. Die verwendete Datenbasis besteht aus einer Auswahl von Fahrzeugen und den Aufnahmen eines ausgewählten Fahrzustands. Sämtliche Untersuchungen und Auswertungen werden anhand dieser Datenbasis durchgeführt.

3.2.1. Auswahl der Fahrzeuge

Das Fahrzeuginnengeräusch wird nicht vom Motorgeräusch alleine geprägt. Großen Einfluss haben die Übertragungspfade zwischen Motor und Fahrgastzelle,[124] sowohl für Körperschall- als auch für Luftschallübertragung. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Fahrzeugklasse. Fahrzeuge der Mittel- oder Oberklasse sind im Allgemeinen akustisch komfortabler ausgelegt als Klein- oder Kompaktwägen. Die Gründe dafür sind unter anderem der Einsatz schallabsorbierender Vorsatzschalen am Motor, bessere Dämmungen der Spritzwand und auch eine effizientere Körperschallentkopplung.[125] Zusätzlich ist die Größe der Fahrgastzelle entscheidend für die Ausbildung von Raummoden und Resonanzen.[126]

In weiterer Folge werden nur Fahrzeuge mit 2-, 3- und 4-Zylindermotoren betrachtet, jedoch sind gerade 4-Zylindermotoren in sehr vielen Fahrzeugen unterschiedlichster Klassen zu finden, da sie über Jahre hinweg die gängigste Motorbauweise in PKWs darstellten.[127] Außerdem werden Motoren mit 4 Zylindern über einen weiten Hubraumbereich von etwa 1100 ccm bis durchaus 2500 ccm und mehr gebaut. Somit werden derartige Motoren sowohl in Kleinstwagen als auch in Oberklassefahrzeugen eingesetzt. Bei Untersuchung aller verfügbaren 4-Zylinderfahrzeuge würden somit Vergleiche zwischen unterschiedlichen Fahrzeugklassen und in weiterer Folge sehr unterschiedlichen akustischen Ausgangssituationen stattfinden.

Durch eine Begrenzung des Motorhubraums wird eine Einschränkung der Datenbasis auf vergleichbare Fahrzeugklassen vorgenommen. Als Hubraumlimit wird für die weiteren Untersuchungen ein Maximum von 1600 ccm gewählt. Durch diese Restriktion wird die Datenbasis auf Klein- und Kompaktfahrzeuge eingegrenzt und somit eine gute Vergleichbarkeit der akustischen Voraussetzungen erreicht.

[124] Vgl. Basshuysen. 2012, S. 1027.
[125] Vgl. ebd., S. 1028.
[126] Vgl. Graber und Weselak. 2008, S. 46.
[127] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 20.

Zusammenfassend wird die Auswahl von Fahrzeugen somit auf diesel- und benzinbetriebene Fahrzeuge mit 2-, 3- und 4-Zylindermotoren (Viertaktmotoren in Reihenbauweise) mit einem Hubraumvolumen bis 1600 ccm getroffen.

3.2.2. Wahl der Fahrzustände

Innengeräuschaufnahmen von der Teststrecke enthalten neben vom Motor erzeugten Geräuschen auch Nebengeräusche, z.B. in Form von Wind- oder Reifenrollgeräuschen. Diese sind stark vom Fahrzeug selbst abhängig und prägen sich mit steigender Geschwindigkeit stärker aus. Um eine Dominanz des Motorgeräusches zu haben, müssen Fahrzustände mit einem hohen akustischen Feedback des Motors gewählt werden. Fahrzustände unter geringer Last wie Konstantfahrten oder langsame Beschleunigungen sind daher nicht geeignet.

Ein hohes akustisches Feedback des Motors ist dann zu erwarten, wenn dieser unter Volllastbedingungen betrieben wird. Daher wird als Basis für die Untersuchungen eine Volllastbeschleunigung im niedrigen Gang gewählt – das heißt, ein Drehzahlhochlauf im zweiten Gang mit 100 % Last von niedriger Startdrehzahl (ca. 1100 rpm) bis zur Begrenzerdrehzahl. Zusätzlich zum guten akustischen Feedback des Motors unter Volllast weist dieser Zustand eine gute Realitätsnähe und kommt im Straßenverkehr praktisch häufig vor. Auch bei den in Abschnitt 2.6.1 angeführten Bewertungsmethoden aus der Literaturrecherche werden Volllastbeschleunigungen als geeignetster Fahrzustand beschrieben.

3.2.3. Wahl des Drehzahlbereichs

Nach Wahl des Betriebszustands (Volllastbeschleunigung im 2. Gang) ist eine nähere Betrachtung des untersuchten Drehzahlbereichs sinnvoll. Der Drehzahlumfang von der Start- bis zur Begrenzerdrehzahl ist nicht für alle Fahrzeuge gleich groß. Zum einen ist bei einigen Fahrzeugaufnahmen die Startdrehzahl höher und zum anderen unterscheiden sich die Begrenzerdrehzahlen. Während diese bei üblichen Ottomotoren bei etwa 6000 bis 6500 rpm liegen, sind sie bei Dieselmotoren mit 4500 bis 5000 rpm deutlich niedriger.

Um für alle Fahrzeuge denselben Drehzahlbereich untersuchen zu können, ist eine Einschränkung des betrachteten Bereichs sinnvoll. Auch aus akustischer Sicht macht eine Einschränkung Sinn, um ungewollte Einflüsse wie durch Raummoden verursachtes tieffrequentes Dröhnen (Booming) bei sehr niedrigen Drehzahlen zu verringern. Hierzu zeigt Abbildung 3-3 ein Campbell-Diagramm mit einer deutlich sichtbaren modenbedingten Resonanz bei etwa 40 Hz, die zu einer starken Überhöhung der Zündordnung (siehe rote Markierung) um 1500 rpm führt. In Folge dieser Überhöhung kommt es auch zu Beeinflussungen der berechneten VOICE-Parameter. Dies wird beispielhaft anhand der Lautheit (links) und des LFC (rechts) in Abbildung 3-4 gezeigt, wobei beide Parameter eine starke Überhöhung im Bereich um 1500 rpm aufweisen.

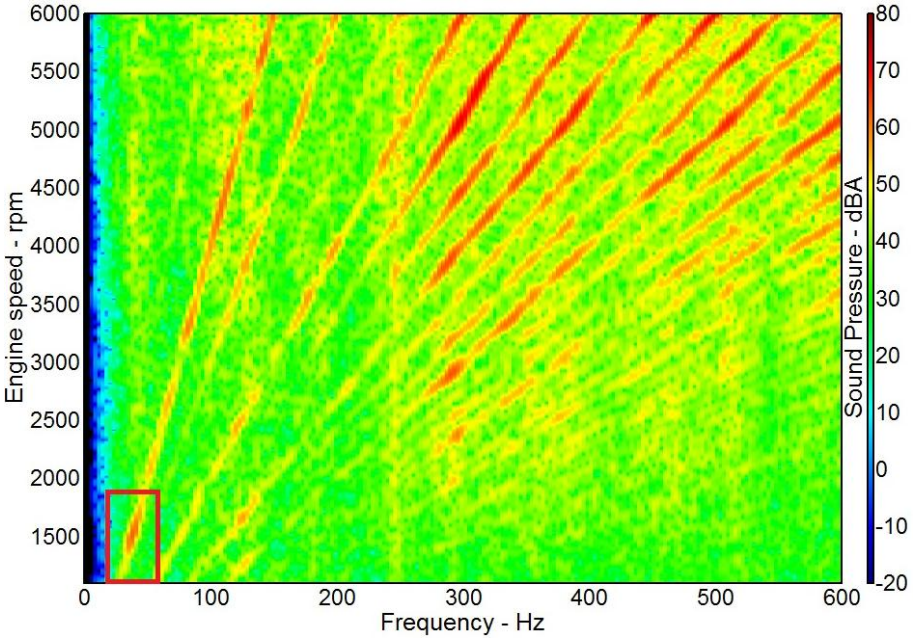


Abbildung 3-3: Beispiel für Booming bei niedrigen Drehzahlen

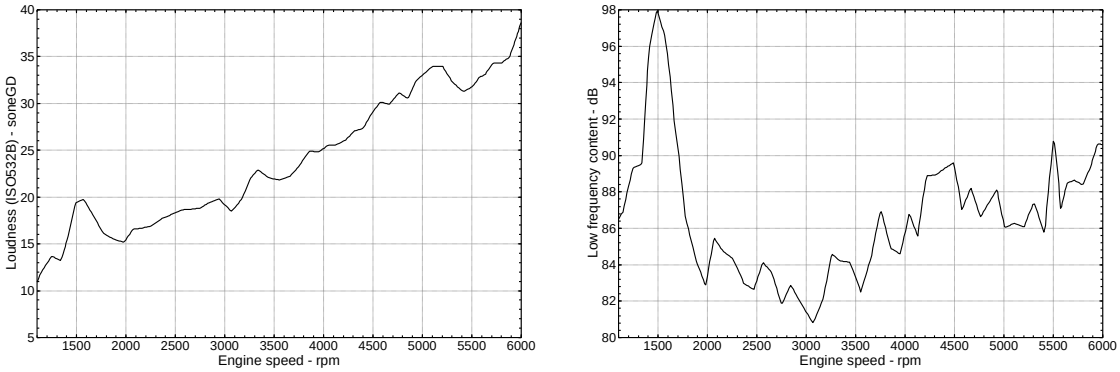


Abbildung 3-4: Beeinflussung der VOICE-Parameter durch Booming

Im obersten Drehzahlbereich wird auf Grund der hohen Fahrgeschwindigkeiten der ungewollte Einfluss von Wind- und Rollgeräuschen stärker, weshalb auch eine Einschränkung des Bereichs in Richtung hoher Drehzahl Sinn macht. Außerdem ist es ohnehin wenig sinnvoll, Aussagen über den akustischen Komfort von Klein- und Kompaktwägen bei beispielsweise 6000 rpm zu treffen, da dies ein wenig praxisrelevanter Zustand ist und dementsprechend wenig akustische Fahrzeugauslegung für diesen Bereich passiert.

Der betrachtete Drehzahlbereich erstreckt sich von 1750 bis 4250 rpm. Dieser Drehzahlumfang ist für alle Fahrzeuge der Datenbasis verfügbar und entspricht einem im praktischen Betrieb realistischen Bereich. Ein vergleichbarer Drehzahlbereich wird bei der in Abschnitt 2.6.1.1 beschriebenen Indexentwicklung[128] verwendet.

[128] Vgl. Lee und Lee. 2009, S. 2.

3.3. Fahrzeugmessungen zur Erweiterung der Datenbank

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung der bestehenden AVL VOICE-Datenbank durch Messungen von Fahrzeugen auf der AVL Teststrecke.

Da auf dem europäischen Markt nur ein Fahrzeug mit einem 2-Zylindermotor erhältlich ist und dieses bereits Teil der Datenbank ist, wurden mit diesem Fahrzeug keine zusätzlichen Messungen durchgeführt, sondern lediglich einige Probefahrten absolviert, um eine subjektive Bewertung zu ermöglichen. Allerdings wurden Fahrzeuge mit 4-Zylindermotoren und Zylinderabschaltsystemen und somit temporärem 2-Zylinderbetrieb vermessen. Auch von den auf dem Markt erhältlichen 3-Zylinderfahrzeugen sind viele bereits in der Datenbank vorhanden und es konnten nur wenige Fahrzeuge zusätzlich vermessen werden.

Insgesamt wurden vom Autor 11 Fahrzeuge mit 3- und 4-Zylindermotoren zur Erweiterung der Datenbank vermessen.

3.4. Evaluierung der Datenbasis

Anhand der in Abschnitt 3 genannten Auswahlkriterien für Zylinderzahl und Hubvolumen stehen insgesamt 97 Fahrzeuge für die weiteren Arbeitsschritte zur Verfügung. Bevor jedoch mit den Untersuchungen begonnen wird, ist eine ausführliche Sichtung dieser Datenbasis notwendig. Nicht alle der Aufnahmen sind direkt verwendbar, sodass eine Reduktion der Datenbasis durchgeführt wird.

3.4.1. Reduktion der Datenbasis durch Ausschluss von Fahrzeugen

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit ist eine gleichbleibende Qualität für alle Aufnahmen der Datenbasis notwendig.

Ausschlussgründe für einzelne Fahrzeuge sind beispielsweise das Auftreten von Störgeräuschen während der Messung. Dies können etwa Steinschlaggeräusche in den Radkästen sein, welche zu kurzen aber sehr steilen Pegelanstiegen im Fahrzeuginnengeräusch führen. Einige der berechneten VOICE-Parameter reagieren auf derartige Störgeräusche sehr empfindlich und zeigen in den entsprechenden Bereichen der Messung demzufolge wenig repräsentative Werte. Als Beispiel für den Einfluss eines Steinschlaggeräusches auf die Bewertungsparameter ist in Abbildung 3-5 (links) ein sprunghafter Anstieg der Lautheit bei knapp unter 1500 rpm rot markiert. Diese Überhöhung ist nur auf das Störgeräusch zurückzuführen und ist etwa anhand des Ordnungsspektrums (vgl. Abbildung 3-5 rechts) nicht erkennbar.

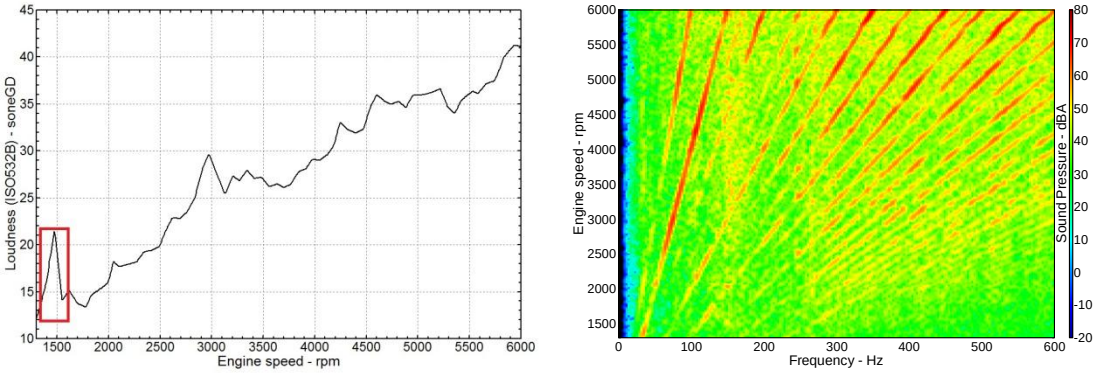


Abbildung 3-5: Störgeräuscheinfluss: Lautheit (li) und Campbell-Diagramm (re)

Der Ausschluss der betreffenden Fahrzeuge passiert durch Anhören aller Aufnahmen der gewählten Datenbasis und einer Kontrolle der dazugehörigen VOICE-Parameter.

Einen weiteren Ausschlussgrund kann ein Ausreißen bestimmter Fahrzeuge im Zuge der statistischen Untersuchungen darstellen. Weichen einer oder mehrere der betrachteten Parameter für ein Fahrzeug in einem bestimmten Drehzahlbereich weit vom Wertebereich der entsprechenden Gruppe ab, so bedarf es einer genauen Betrachtung dieser Ausreißer. Wird beim Anhören der zugehörigen Aufnahme im entsprechenden Drehzahlbereich ein Störgeräusch festgestellt, ist das betrachtete Fahrzeug in letzter Konsequenz ebenfalls auszuschließen.

Ein Beispiel hierzu zeigt Abbildung 3-6, wo im Drehzahlbereich um 2500 rpm eine deutliche Überhöhung des Harshness Index (linkes Diagramm) sichtbar ist. Anhand des 3D-Ordnungsspektrums im rechten Diagramm werden die Verläufe der Motorordnungen im entsprechenden Drehzahlbereich kontrolliert.

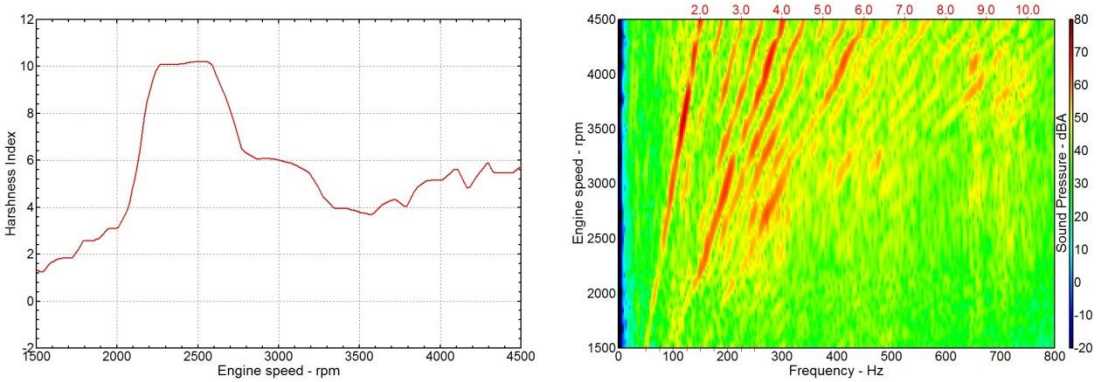


Abbildung 3-6: Beispiel für Ausreißer

Die im Diagramm erkennbare Überhöhung des Harshness Index ist subjektiv nicht nachvollziehbar, da im entsprechenden Bereich kein Anstieg der Rauigkeit feststellbar ist. Auch anhand des Ordnungsspektrums ist keine Begründung möglich.

3.5. Die Datenbasis für die Untersuchungen

Nach dem Ausschluss von Fahrzeugen besteht die Datenbasis für die durchgeführten Untersuchungen aus 77 Fahrzeugen. Diese werden in fünf Gruppen entsprechend Brennverfahren und Zylinderzahl eingeteilt. Eine Aufstellung hierzu zeigt Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Fahrzeuggruppen

Gruppe	Motor	Anzahl
1	2-Zylinder-Ottomotor	1
2	3-Zylinder-Dieselmotor	7
3	3-Zylinder-Ottomotor	12
4	4-Zylinder-Dieselmotor	24
5	4-Zylinder-Ottomotor	33

Wenn in weiterer Folge von Gruppen von Fahrzeugen die Rede ist, ist die Einteilung entsprechend Tabelle 3-1 gemeint Die betrachteten Fahrzeuge haben Reihenmotoren mit einem Hubvolumen bis 1600 ccm. Eine Auflistung aller untersuchten Fahrzeuge enthält Tabelle 9-1 im Anhang.

Als Fahrzustand wird ein Volllasthochlauf im zweiten Gang verwendet, der im Bereich von 1750 bis 4250 rpm an diskreten Punkten bei 2000, 2500, 3000, 3500 und 4000 rpm – jeweils über ein Intervall von +/- 250 rpm gemittelt – betrachtet wird.

3.6. Erste Auswertungen anhand von VOICE – Plots

Nachstehende Diagramme zeigen zwei Formen der grafischen Darstellung mit AVL VOICE. Abbildung 3-7 zeigt links die Darstellung des Parameters Lautheit und rechts ein A-gewichtetes Campbell-Diagramm, jeweils mit der Führungsgröße Drehzahl.

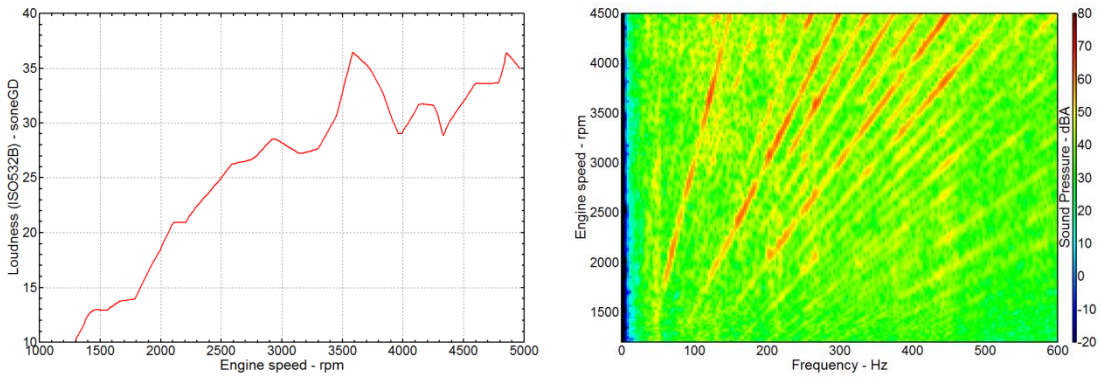


Abbildung 3-7: VOICE Plots: Lautheit (li) und Campbell-Diagramm (re)

Anfangs wird aus jeder der fünf Gruppen (lt. Tabelle 3-1) jeweils ein typischer Vertreter herausgenommen und in Parameterdiagrammen gegenübergestellt. Die Auswahl der für die jeweiligen Gruppen typischen Beispiele wurde vom Autor mit Unterstützung erfahrener Fahrzeugakustiker durchgeführt. Anhand ihrer Lage bei Bewertung mit den VOICE-Parametern werden die ausgesuchten Beispiele auf ihrer Eignung als typische Vertreter ihrer Gruppe hin untersucht. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 3-8 die Bewertung aller 3-Zylinder-Dieselfahrzeuge mit dem Harshness Index. Das als typischer Vertreter der Gruppe ausgewählte Fahrzeug ist rot markiert und liegt bei Mittelung über den betrachteten Drehzahlbereich am Medianwert der sieben Fahrzeuge.

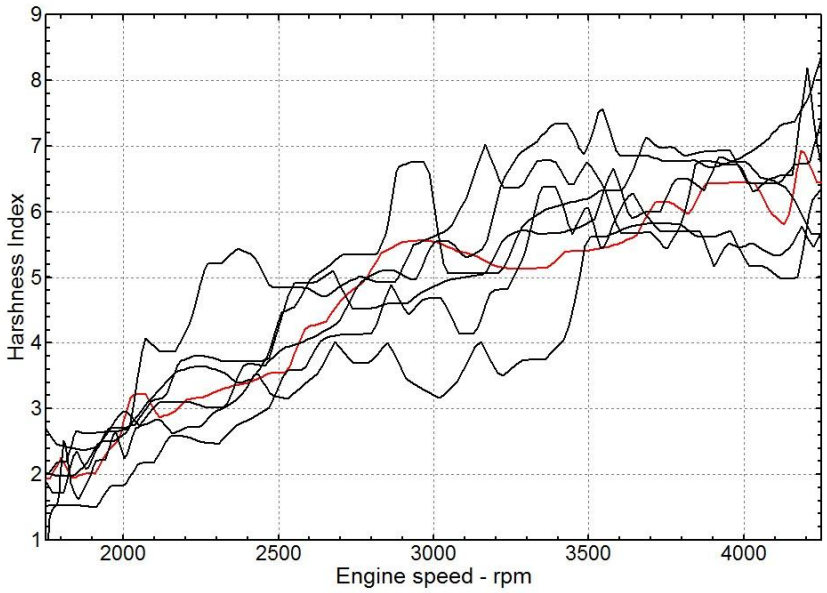


Abbildung 3-8: Lage eines typischen Vertreters

Anhand der Lage der Kurven in den Diagrammen für die verschiedenen Parameter sind erste Abschätzungen möglich - beispielsweise, ob Gruppierungen entsprechend der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl entstehen, welche Abhängigkeiten vom Führungsparameter Drehzahl vorhanden sind oder ob sich Unterschiede zwischen Otto- bzw. Dieselmotoren ergeben. Als Beispiel stellt Abbildung 3-9 für je ein Fahrzeug aus den fünf Gruppen den Harshness Index über der Drehzahl dar.

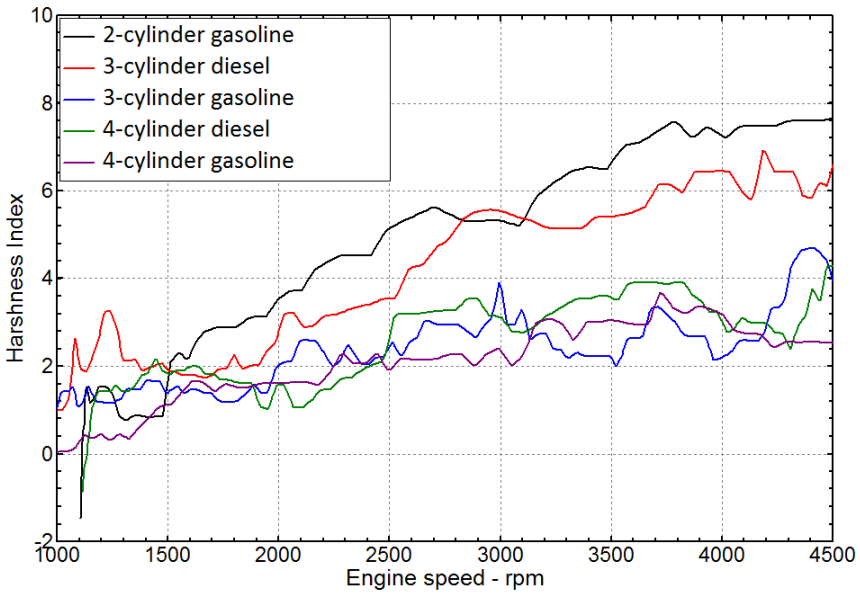


Abbildung 3-9: VOICE-Plot Harshness Index für fünf Fahrzeuge

Anhand des Beispieldiagramms fällt etwa auf, dass drei Kurven über den gesamten Drehzahlbereich sehr nahe beieinander verlaufen und über der Drehzahl nur leicht ansteigen. Darunter sind auch die Fahrzeuge mit dem 3- sowie dem 4-Zylinder-Ottomotor. Jedoch setzen sich zwei Fahrzeuge (2-Zylinder-Ottomotor und der 3-Zylinder-Dieselmotor) vom Rest etwas ab und steigen bei höherer Drehzahl stark an. Diagramme dieser Art mit der Gegenüberstellung der ausgewählten Vertreter der verschiedenen Gruppen werden für alle verfügbaren VOICE-Parameter betrachtet. Die daraus gezogenen Schlüsse können nicht für alle Fahrzeuge der Datenbasis verallgemeinert werden. Diese Auswertungen dienen aber in erster Linie dazu, die unterschiedlichen Bewertungsgrößen kennenzulernen und durch Anhören der jeweiligen Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen die Kurvenverläufe auch subjektiv referenzieren zu können.

4. Auswertungen und Parameterentwicklung

4.1. Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Alle in diesem Kapitel dokumentierten Berechnungen und Auswertungen werden mit der Software MATLAB® anhand der aus AVL VOICE exportierten Parameterdaten durchgeführt. Für alle Parameter werden die Daten erst mit Methoden der deskriptiven Statistik bezüglich deren Lage und Verteilungsform geprüft. Danach werden statistische Untersuchungen durchgeführt, um die Unterscheidbarkeit der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl anhand der Parameter zu überprüfen.

Schlussendlich werden einige der VOICE-Parameter zu einem neuen Parameter kombiniert, welcher im Mittel eine Unterscheidbarkeit der Gruppen erlaubt. Die MATLAB®-Codes inklusive der verwendeten Datensätze sowie eine Beschreibung zur Verwendung der MATLAB®-Scripts sind der beiliegenden CD-ROM zu entnehmen.

4.2. Drehzahlstufen und Mittelungsintervalle

Eine Darstellung der Auswertung anhand der vorliegenden Daten an jedem vorhandenen Drehzahlpunkt ist aus mehreren Gründen nicht sinnvoll. Erstens wird nicht der gesamte Drehzahlbereich betrachtet, sondern lediglich ein Bereich zwischen 1750 und 4250 rpm. Zweitens verlaufen die Beschleunigungsvorgänge für alle Fahrzeuge unterschiedlich schnell, sodass die Anzahl an Abtastpunkten (und somit diskreten Drehzahlschritten) für jedes Fahrzeug anders ist und der direkte Vergleich von Parametern an allen Drehzahlpunkten somit nicht möglich ist. Daher wird der Drehzahlbereich in fünf Stufen bei 2000, 2500, 3000, 3500 und 4000 rpm unterteilt. Um alle Abtastwerte im interessierenden Drehzahlbereich zu berücksichtigen und keine Lücken zwischen den Stufen zu verursachen, wird um jede der fünf Drehzahlen eine Mittelung über einen Bereich von +/- 250 rpm vorgenommen. Der kontinuierliche Anstieg der Drehzahl wird somit auf fünf Stufen mit einer Breite von jeweils 500 rpm reduziert.

Die Diskretisierung der Drehzahl führt einerseits zu einer besseren grafischen Darstellbarkeit und Vergleichbarkeit der Daten und verringert außerdem die notwendige Berechnungszeit gegenüber einer Berücksichtigung aller vorhandenen diskreten Drehzahlpunkte. Die in weiterer Folge festgelegten drehzahlabhängigen Gewichtungsfaktoren werden ebenso an diesen fünf Drehzahlpunkten definiert.

4.3. Statistische Auswertungen

4.3.1. Deskriptive Statistik

Für die statistischen Auswertungen stehen insgesamt 29 Parameter zur Verfügung. Der Parameter „Engine Speed Change“ repräsentiert lediglich die Geschwindigkeit des Hochlaufs und wird von den Auswertungen ausgenommen. Die Daten der Parameter werden sowohl für alle betrachteten Fahrzeuge gemeinsam als auch innerhalb der fünf Gruppen auf deren Verteilungsform hin untersucht. Alle Daten sind quantitativ und es liegen fast ausschließlich normalverteilte Datensätze vor. Die wenigen nicht normalverteilten Daten haben für die Parameterentwicklung keine Relevanz und werden hier nicht näher betrachtet. Für die weiteren statistischen Untersuchungen werden somit parametrische Verfahren angewandt.

4.3.2. Statistische Unterscheidbarkeit

Für die Untersuchung der Unterscheidbarkeit der Fahrzeuggruppen wird die ANOVA[129] verwendet. Dabei werden die Unterscheidbarkeiten von Gruppenmittelwerten in Hinsicht auf Gruppen- und Gesamtvarianz untersucht. Die statistische Unterscheidbarkeit wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2 % (zweiseitiger Test mit jeweils 1 %) überprüft.

Für alle VOICE-Parameter erfolgen diese statistischen Untersuchungen für die fünf Gruppen an den fünf betrachteten Drehzahlpunkten. Daraus werden die ersten Aussagen über die Unterscheidbarkeit der Gruppen anhand der Parameter abgeleitet und einige aussichtsreiche Parameter für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Abschnitt 4.14 zeigt statistisch optimierte Ergebnisse. Dabei wird die vorliegende Datenbasis anhand von PCA[130] und LDA[131] untersucht. Die ermittelten Ergebnisse werden mit jenen der beschriebenen Parameterentwicklung verglichen.

4.4. Erste Ergebnisse anhand der VOICE – Parameter

Die Untersuchung der Daten der VOICE-Parameter mit Mitteln der deskriptiven Statistik gibt bereits einen Überblick über die Möglichkeiten zur Unterscheidung der Fahrzeuggruppen. Einerseits können Parameter ausgeschlossen werden, welche keine Unterscheidung ermöglichen oder diese nur für bestimmte Gruppenkombinationen oder an wenigen Drehzahlpunkten ermöglichen. Andererseits können einige Parameter ermittelt werden, welche eine Unterscheidbarkeit der Gruppen über einen weiten Drehzahlbereich ergeben.

Diese Analyse wird für alle Parameter zuerst anhand von Boxplots durchgeführt. Liegen große Überlappungsbereiche der Konfidenzintervalle vor, so ist die Wahrscheinlichkeit einer sicheren Unterscheidbarkeit gering. Als Beispiel zeigt Abbildung 4-1 stark überlappende

[129] Vgl. Bortz und Schuster. 2010, S. 478ff.
[130] Anm.: PCA ist die Abkürzung für Principle Component Analysis.
[131] Anm.: LDA ist die Abkürzung für Linear Discriminant Analysis.

Konfidenzintervalle der Fahrzeuggruppen beim Parameter Evenness. Überlappen die Konfidenzintervalle gar nicht oder nur sehr wenig, ist eine Unterscheidbarkeit der Gruppen wahrscheinlich.

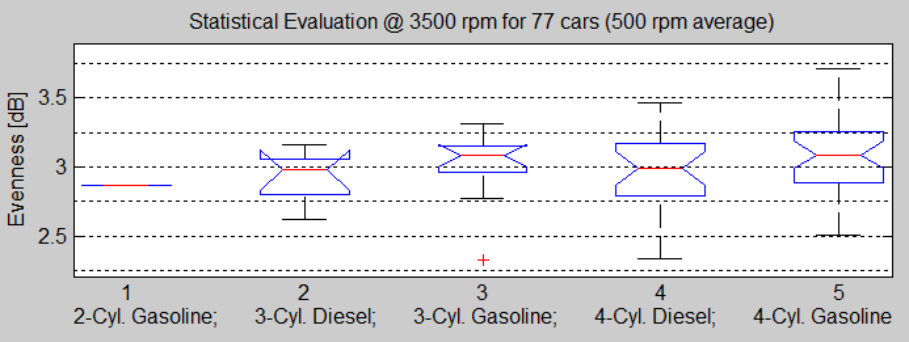


Abbildung 4-1: Überschneidung von Konfidenzintervallen

Anhand der Lagen der Konfidenzintervalle können erste Parameter für die spätere Verwendung bereits früh ausgeschlossen werden und ihre Fähigkeit zur Gruppentrennung wird der Vollständigkeit halber erst nach Behandlung der aussichtsreichen Parameter genau untersucht. Die genaue Untersuchung der Gruppenunterscheidbarkeit der VOICE-Parameter mittels ANOVA stellt den zweiten Schritt der Untersuchungen dar. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich einige Parameter mit guter Unterscheidbarkeit der Gruppen.

4.5. Darstellung mit Unterscheidbarkeitsmatrizen

Zur Darstellung der Unterscheidbarkeit der Fahrzeuggruppen unter den getroffenen Voraussetzungen werden Unterscheidbarkeitsmatrizen verwendet. Dabei wird eine statistisch signifikante Unterscheidbarkeit zweier verglichener Gruppen mit einem grünen Feld markiert. Bei einem roten Feld ist keine zuverlässige Unterscheidbarkeit entsprechend der vorgegebenen Bedingungen zu erwarten. Anhand dieser Matrizen ist eine schnelle Übersicht darüber möglich, welche Parameter in welchen Drehzahlbereichen eine Unterscheidung bestimmter Gruppen erlauben oder nicht.

Für alle Parameter gilt, dass eine Verallgemeinerung der Aussagen bezüglich der 2-Zylinderfahrzeuge (Gruppe 1) nicht sinnvoll ist, da für die Untersuchungen lediglich ein Fahrzeugbeispiel zur Verfügung steht. Eine statistische Untersuchung ist trotzdem möglich und dementsprechend sind die Ergebnisse auch in den Unterscheidbarkeitsmatrizen eingetragen.

4.5.1. Harshness Index

Die Unterscheidbarkeit der Fahrzeuggruppen mit dem Harshness Index, der die Rauigkeit beschreibt, stellt Tabelle 4-1 dar.

Tabelle 4-1: Unterscheidbarkeitsmatrizen Harshness Index

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Über den gesamten Drehzahlbereich betrachtet ist anhand des Harshness Index keine zufriedenstellende Unterscheidbarkeit der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl möglich. Speziell die Gruppen der Fahrzeuge mit Ottomotoren (3 und 5) sind nicht unterscheidbar. Der Index bietet aber die Möglichkeit zur Unterscheidung der Gruppen dieselbetriebener Fahrzeuge bei höheren Drehzahlen. Dies kann durch die stärker werdenden Nebenordnungen begründet werden. Bei niedrigerer Zylinderzahl werden die Abstände der energiereichen Ordnungen dadurch noch geringer, was zu verstärkten Modulationseffekten und somit einer höheren Rauigkeit führt.[132]

4.5.2. Schärfe (Aures)

Die Unterscheidbarkeit der Fahrzeuggruppen mit dem Parameter Schärfe nach Aures stellt Tabelle 4-2 dar.

Tabelle 4-2: Unterscheidbarkeitsmatrizen Schärfe (Aures)

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Die Schärfe ermöglicht die Unterscheidung der Fahrzeuge mit Ottomoren mit 3 und 4 Zylindern (Gruppen 3 und 5) im gesamten betrachteten Drehzahlbereich, jedoch ist eine Unterscheidung der Fahrzeuge mit Dieselmotoren (Gruppen 2 und 4) nur bei hohen Drehzahlen möglich.

4.5.3. Annoyance (Europe)

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen mit dem Parameter Annoyance (Europe), der ein Maß für die Lästigkeit ist, stellt Tabelle 4-3 dar.

[132] Vgl. Martner, et al. 2000, S. 680.

Tabelle 4-3: Unterscheidbarkeitsmatrizen Annoyance (Europe)

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Anhand der Annoyance ist eine Trennung dieselbetriebener Fahrzeuge (Gruppen 2 und 4) im gesamten Drehzahlbereich möglich. Für die Fahrzeuge mit Ottomotoren in den Gruppen 3 und 5 ist dies bei einigen Drehzahlen nicht der Fall. Anhand der Ähnlichkeit zu den Unterscheidbarkeitsmatrizen für die Lautheit (siehe Tabelle 4-6) ist die hohe Abhängigkeit der Annoyance von der Lautheit erkennbar.

4.5.4. CKI

Die Trennbarkeit der Gruppen anhand des Combustion Knocking Index (CKI) ist in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Unterscheidbarkeitsmatrizen CKI

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Der CKI zeigt für benzinbetriebene Fahrzeuge mit 3- und 4-Zylindermotoren (Gruppen 3 und 5) über den gesamten Drehzahlbereich eine gute Unterscheidbarkeit. Die Gruppen der dieselbetriebenen Fahrzeuge sind nur im unteren Drehzahlbereich unterscheidbar.

4.5.5. Low Frequency Content

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen mit dem Low Frequency Content, der ein Maß für den Energieinhalt bei tiefen Frequenzen ist, stellt Tabelle 4-5 dar.

Tabelle 4-5: Unterscheidbarkeitsmatrizen Low Freqency Content

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Der Low Frequency Content unterscheidet die 3- und 4-Zylinderfahrzeuge beider Brennverfahren von 2000 bis 3000 rpm.

4.5.6. Lautheit ISO 532B

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen anhand der Lautheitsbewertung nach ISO 532B stellt Tabelle 4-6 dar.

Tabelle 4-6: Unterscheidbarkeitsmatrizen Lautheit ISO 532 B

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Anhand der Lautheit ist eine Unterscheidung der Gruppen dieselbetriebener Fahrzeuge im gesamten Drehzahlbereich möglich. Die Unterscheidung der Gruppen mit benzinbetriebenen Fahrzeugen ist für die Gruppen 1 und 3 ab 2500 rpm möglich, für die Gruppen 3 und 5 zwischen 2500 und 3500 rpm.

4.5.7. Extended Articulation Index

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen mit dem Parameter Extended Articulation Index, welcher ein Maß für die Sprachverständlichkeit ist, stellt Tabelle 4-7 dar.

Tabelle 4-7: Unterscheidbarkeitsmatrizen Extended Articulation Index

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Mit dem Extended Articulation Index ist eine Unterscheidung der 3- und 4-Zylinderfahrzeuge beider Brennverfahren möglich. Statistisch nicht über den gesamten Drehzahlbereich voneinander unterscheidbarbar sind jedoch benzinbetriebene Fahrzeuge mit 2- bzw. 3-Zylindermotoren.

4.5.8. Erkenntnisse

Aus den obigen Resultaten ist erkennbar, dass einige Parameter eine Unterscheidung bestimmter Gruppen erlauben, jedoch nicht aller Gruppen. So unterscheidet etwa die Schärfe (Aures) die Gruppen 3 und 5 (3- und 4-Zylinder-Ottomotoren), jedoch die Dieselmotoren (Gruppen 2 und 4) nicht. Die Annoyance unterscheidet wiederum die Dieselmotoren aber die Ottomotoren nur in einem begrenzten Drehzahlbereich. Es bliebe die Möglichkeit, die Motoren

unterschiedlicher Brennverfahren mit verschiedenen Parametern zu untersuchen. Dies ist aber seitens des Industriepartners nicht erwünscht, sodass ein Parameter ermittelt werden soll, der eine Unterscheidung der Gruppen sowohl für Diesel- als auch für Ottomotoren ermöglicht. Dazu werden in weiterer Folge verschiedene Kombinationen von Parametern untersucht und es wird eine Auswahl von Grundparametern zur Bildung eines neuen Parameters getroffen.

Bei der Verwendung eines VOICE-Parameters als einzelne Bewertungsgröße ergibt sich die in Summe beste Möglichkeit zur Unterscheidung der Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen mit dem Extended Articulation Index. Die Fahrzeuggruppen mit 3 und 4 Zylindern und gleichem Brennverfahren sind über den gesamten Drehzahlbereich unterscheidbar. Jedoch ist eine Unterscheidbarkeit der Gruppen benzinbetriebener Fahrzeuge mit 2 bzw. 3 Zylindern statistisch nicht gegeben. Wobei hier wiederum gilt, dass auf Grund des einzelnen 2-Zylinderfahrzeuges keine Verallgemeinerung der Aussagen zulässig ist.

4.6. Auswahl der verwendeten Grundparameter

Da keiner der VOICE-Parameter eine vollständige Unterscheidbarkeit der Gruppen beider Brennverfahren ermöglicht, erfolgt eine Kombination von Grundparametern zu einem neuen Parameter, welcher sowohl Dieselmotoren als auch Ottomotoren unterschiedlicher Zylinderzahlen im Mittel zufriedenstellend unterscheidet. Auf Grund der physikalischen Nachvollziehbarkeit und einer einfachen Implementierung des entwickelten Parameters in AVL VOICE, ist als Forderung des Industriepartners eine minimale Anzahl von Grundparametern zu verwenden.

Die drei verwendeten Grundparameter sind Lautheit nach ISO 532B, Low Frequency Content und Extended Articulation Index. Deren Eigenschaften sind in Abschnitt 2.6.3 beschrieben. Die Auswahl dieser Parameter erfolgt einerseits auf Grund der Resultate aus den obigen Unterscheidbarkeitsmatrizen und andererseits auf Grund der Ergebnisse der statistischen Analysen mit PCA und LDA (vgl. Abschnitt 4.14). Die PCA bestätigt vor allem die Lautheit und den Extended Articulation Index als Parameter mit hoher Relevanz. Die Lautheit wird auch subjektiv als entscheidendes Unterscheidungsmerkmal bei der Charakterisierung von Motoren unterschiedlicher Zylinderzahl wahrgenommen. Die zusätzliche Verwendung des LFC wird ebenfalls auf die subjektive Bewertung der Unterschiede zwischen den Gruppen zurückgeführt. Dazu wurden bei Hörversuchen mit Studierenden mittels Repertory Grid Technology (RGT) (siehe Abschnitt 5.7) Begriffe gesammelt. „Basslastigkeit“ wurde als häufigstes Attribut zur Differenzierung der Fahrzeuggeräusche bei unterschiedlichen Zylinderzahlen genannt und von den Testpersonen wurden signifikante Unterschiede im Rating der Fahrzeuge attestiert.

4.7. Neuer Parameter

Nachfolgend werden der Aufbau des neu entwickelten Parameters beschrieben und die Ergebnisse der Auswertungen zusammengefasst. Bei AVL wird der Parameter zukünftig mit der Bezeichnung AVL Downsizing Comfort Index (DCI) versehen.

4.7.1. Aufbau

Basieren auf dem Extended Articulation Index wird eine Verbesserung der Unterscheidbarkeit der Gruppen angestrebt. Als zweiter Parameter wird die Lautheit gewählt. Diese bietet zusätzlich die Möglichkeit, die Gruppen 1 und 3 über weite Teile des Drehzahlbereichs zu unterscheiden.

Der Low Frequency Content wird als dritter Parameter verwendet. Bei subjektiver Bewertung der Klangcharakteristika von Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen wird der Anteil tieffrequenter Komponenten als bedeutendes Unterscheidungsmerkmal wahrgenommen und darüber hinaus zeigt der Parameter in der objektiven Datenanalyse vor allem bei niedrigeren Drehzahlen eine weitere Verbesserung der Unterscheidbarkeit von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen.

4.7.2. Ermittlung von Gewichtungsfaktoren

Zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für die drei Grundparameter gibt es einen empirischen und einen statistischen Lösungsweg. Bei der empirischen Vorgehensweise werden die Gewichte hinsichtlich der Erhöhung der Gruppenunterscheidbarkeit anhand der ANOVA sequentiell adaptiert. Bei der statistischen Variante wird die logistische Regression verwendet, welche die Gewichtungsfaktoren hinsichtlich einer höchstmöglichen wahrscheinlichkeitsbasierten Trennbarkeit der Gruppen berechnet.

4.7.2.1. Händisch iterative Vorgehensweise

Beim Festlegen der Gewichtsfaktoren muss zu Beginn die Bedeutung der Ausgangsparameter berücksichtigt werden. Während Lautheit und Low Frequency Content bei guter Geräuschqualität niedriger Werte annehmen und somit gleichläufig sind, ist der Extended Articulation Index zu den ersten beiden Parametern gegenläufig, da eine gute Sprachverständlichkeit eine hohe Geräuschqualität indiziert. Davon ausgehend weisen die Gewichtungsfaktoren für die ersten beiden Parameter das entgegengesetzte Vorzeichen des dritten auf.

Zuerst wird als das Verhältnis zwischen Lautheit und Ext. Articulation Index durch die Wahl der Gewichtungsfaktoren festgelegt. Da beide Parameter über den gesamten Drehzahlbereich ein gleichmäßig gutes Verhalten zeigen, sind die Gewichtungsfaktoren konstant. Die Unterscheidung aller interessierenden Gruppen ist mit diesen beiden Parametern bereits möglich. Durch Hinzufügen des LFC wird lediglich die Trennbarkeit der Gruppen 3 & 5 und 2 & 4 im unteren Drehzahlbereich erhöht. Die Faktorenermittlung passiert so, dass die

Unterscheidbarkeit dieser Gruppen maximal wird, aber gleichzeitig die Gruppen 1 & 3 unterscheidbar bleiben. Da der LFC bei höheren Drehzahlen eine schlechte Unterscheidbarkeit aufweist, nimmt sein Anteil mit der Drehzahl stetig ab und geht bei 4000 rpm gegen Null. Die ermittelten Gewichtungsfaktoren der Grundparameter sind in Tabelle 4-8 dargestellt

Tabelle 4-8: Gewichtungsfaktoren händisch ermittelt

	2000 rpm	2500 rpm	3000 rpm	3500 rpm	4000 rpm
Lautheit	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
Ext. Art. Index	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
LFC	-1,50	-1,10	-0,70	-0,30	0,00

Die an den fünf diskreten Drehzahlstufen festgelegten Gewichtungsfaktoren werden für die praktische Umsetzung über den gesamten Drehzahlbereich interpoliert. Dies gilt im Besonderen für die Gewichtungsfaktoren des LFC, da diese eine Änderung über der Drehzahl aufweisen.

4.7.2.2. Ermittlung mittels logistischer Regression

Eine Möglichkeit zur statistisch optimierten Berechnung der Gewichtungsfaktoren für die Grundparameter stellt die logistische Regression[133] dar.[134] Dabei wird für alle Gruppen ein Set von Gewichtungsfaktoren zu den jeweiligen Parametern berechnet. In Folge werden bei der Zuordnung die jeweiligen Gewichtssets zur Anwendung gebracht. Durch die Wahl des entsprechenden Gewichtssets wird die Anzahl richtiger Zuordnungen maximiert, indem die Auftrittswahrscheinlichkeit für die Zielräume erhöht wird. Folgende Gewichtungsfaktoren (Tabelle 4-9) werden anhand der Logit-Regression ermittelt.

[133] Anm.: Logistische Regression wird häufig mit Logit-Regression abgekürzt.
[134] Vgl. Kopp und Lois.

Tabelle 4-9: Gewichtungsfaktoren lt. Logit-Regression

		2000 rpm	2500 rpm	3000 rpm	3500 rpm	4000 rpm
Gruppe 1	Lautheit	100,0	37,6	-2,6	18,5	46,5
	Ext. Art. Index	26,8	43,4	6,0	13,2	9,1
	LFC	12,1	144	33,9	35,3	-48,3
	Offset	-5337,3	-16981	-3466,7	-4598,4	2337,2
Gruppe 2	Lautheit	-3,7	205	77,5	64	-14,8
	Ext. Art. Index	-15,7	-2,0	6,6	-7	-17,5
	LFC	1,3	-266	-83,7	-117	8,6
	Offset	1320,3	18927	4965,6	9038	636,3
Gruppe 3	Lautheit	-164,2	-177	-5,7	-26	2,71
	Ext. Art. Index	-15,5	-5	-17,1	-26	-17,7
	LFC	68,8	219	-70,0	-86	-114,4
	Offset	-1775,2	-15011	7523,5	9956	11128,0
Gruppe 4	Lautheit	-65,7	-24	-113,2	-146	-32,3
	Ext. Art. Index	-25,2	-46	-22,9	-20	19,7
	LFC	-28,9	-162	99,4	191	202,3
	Offset	5905,1	18406	-4418,9	-11777	-18394,2
Gruppe 5	Lautheit	66,3	94	48,7	23	1,3
	Ext. Art. Index	19,9	22	20,8	16	16,0
	LFC	-29,9	-80	-34,3	-16	26,4
	Offset	-459,1	3156	228,7	-321	-3451,4

Die mittels logistischer Regression ermittelten Gewichtungsfaktoren sind hinsichtlich der statistischen Unterscheidbarkeit der Gruppen optimiert. Für die Implementierung in AVL VOICE ergeben sich aber Nachteile. Mit den durch Iteration ermittelten Gewichtungsfaktoren ist ein Überblick über das Verhalten des Parameters über der Drehzahl und über die erreichten Wertebereiche möglich. Die Faktoren aus der Logit-Regression liegen an den betrachteten Drehzahlstufen bei sehr unterschiedlichen Werten und die Anteile der Grundparameter unterscheiden sich stark, sodass eine Skalierung auf einen gewünschten Endbereich und auch das Abschätzen einer Drehzahlabhängigkeit schwierig ist.Außerdem sind die Anteile der Grundparameter am Gesamtwert physikalisch nicht begründbar, wodurch eine Interpretation der Ergebnisse bzw. das Ableiten von Problemen und in weiterer Folge von Verbesserungsmöglichkeiten im praktischen Einsatz schwer möglich sind. Daher werden in weiterer Folge für die DCI-Berechnung die händisch iterativ ermittelten Gewichtsfaktoren verwendet.

4.8. Unterscheidbarkeit der Gruppen

Die Wertebereiche des unskalierten Downsizing Comfort Index für die fünf untersuchten Gruppen sind für alle betrachteten Drehzahlstufen in Abbildung 4-2 dargestellt.

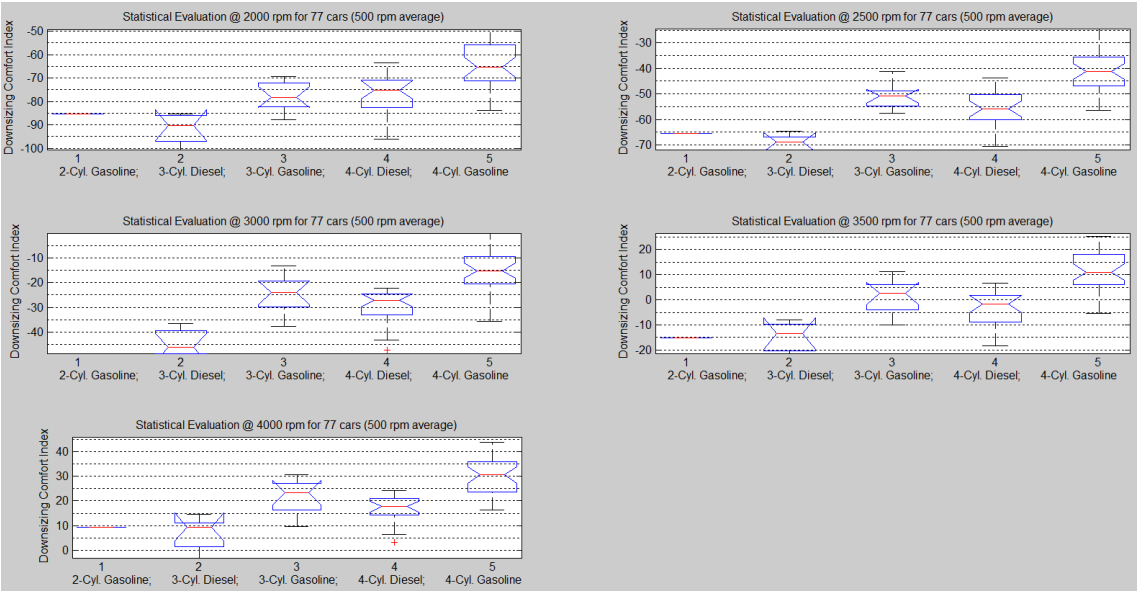


Abbildung 4-2: DCI Boxplots unskaliert

Bei der Betrachtung der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen sind bei gleichem Brennverfahren keine Überschneidungen der Konfidenzintervalle zu erkennen. Dies deutet bereits auf eine Unterscheidbarkeit der entsprechenden Gruppen hin, die wiederum mittels ANOVA für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 2 % untersucht wird. Die Streuungen innerhalb der Gruppen sind deutlich geringer als der gesamte Streubereich der DCI-Werte, außerdem sind die Gruppenstreuungen nahezu ident.

Zur Veranschaulichung der Unterscheidbarkeit der Gruppen anhand des Downsizing Comfort Index werden wiederum Unterscheidbarkeitsmatrizen (Tabelle 4-10) verwendet. Diese sind nachstehend für die fünf Gruppen an den fünf Drehzahlstufen dargestellt.

Tabelle 4-10: Unterscheidbarkeitsmatrizen Downsizing Comfort Index

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Anhand der Unterscheidbarkeitsmatrizen ist erkennbar, dass nun über den gesamten betrachteten Drehzahlbereich eine Unterscheidung fast aller Gruppen möglich ist. Abgesehen vom Drehzahlpunkt bei 2000 rpm gibt es nur Probleme bei der Unterscheidung der Gruppen 1 und 2 bzw. 3 und 4. Darauf wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

4.9. Unterscheidung aller Gruppen vs. Unterscheidung bei gleichem Brennverfahren

Wie aus Tabelle 4-10 ersichtlich ist, ist mit dem DCI eine Unterscheidung aller Gruppen nicht möglich. Eine Unterscheidung anhand des Parameters ist jedoch zwischen Fahrzeugen mit gleichem Brennverfahren und unterschiedlichen Zylinderzahlen möglich. Daneben zeichnet sich bei den Überschneidungen der Gruppen ein Trend ab. Anhand der Boxplot-Darstellungen der Daten für die fünf Gruppen ist eine deutliche Überlappung der Wertebereiche zwischen den 3-Zylinder-Ottomotoren und den 4-Zylinder-Dieselmotoren erkennbar. Auch der betrachtete 2-Zylinder-Ottomotor liegt im Wertebereich der 3-Zylinder-Dieselmotoren. Diese Überlappungen lassen sich dadurch begründen, dass die Geräuschqualität von Dieselmotoren im Allgemeinen niedriger ist als jene von Ottomotoren.[135] Werden zum Vergleich andere Bewertungsgrößen wie Annoyance (siehe Tabelle 4-3) oder Harshness Index (siehe Tabelle 4-1) betrachtet, so ist dieser Trend auch dort zu finden.

Somit erfolgen Vergleiche anhand des entwickelten Parameters in erster Linie zwischen Fahrzeugen mit gleichem Brennverfahren. Das heißt, dass sich quasi eine Einteilung der präsentierten Ergebnisse in zwei Cluster – einerseits für Dieselmotoren und andererseits für Ottomotoren – ergibt.

4.10. Form der Parameterdarstellung

4.10.1. Datenlage und Verteilungsform

Die durch den DCI berechneten Daten für die Fahrzeuge der Datenbasis werden wiederum hinsichtlich deren Lage und Verteilungsform untersucht. Die vorliegenden Daten sind für alle betrachteten Drehzahlstufen normalverteilt. Ein von MATLAB® markierter Ausreißer tritt zweimal auf (vgl. Abbildung 4-2). Dies trifft beide Male für die Gruppe 4 (4-Zylinder-Dieselmotoren) zu. Dieser Ausreißer führt aber zu keiner Abweichung von der Normalverteilung.

4.10.2. Form der Bewertung

Die mit den in Tabelle 4-8 definierten Faktoren gewichteten Grundparameter Lautheit und Low Frequency Content werden vorzeichengleich und der Extended Articulation Index mit entgegengesetztem Vorzeichen addiert. Aus dieser Vorgabe ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Auslegung des Parameters.

Die Wahl der Vorzeichen ergibt sich auf Grund der Interpretation und der Benennung des Parameters. Da der Index den akustischen Komfort bewertet, sollen die Fahrzeuge mit einem höheren akustischen Komfort höhere Indexwerte erhalten. Üblicherweise werden 4-

[135] Vgl. Spessert. 1999, S. 508ff.

Zylinderfahrzeuge positiver bewertet. Daraus ergibt sich die Vorzeichensetzung. Lautheit und Low Frequency Content werden negativ gewichtet und der Extended Articulation Index positiv.

4.10.3. Offset und Skalierung

Wie in Abbildung 4-2 zu sehen ist, ergeben sich für den DCI Werte zwischen -100 und 45. Das heißt, dass einerseits ein großer Wertebereich von etwa 145 vorliegt und dass andererseits sowohl positive als auch negative Ergebnisse möglich sind. Um das zu verhindern, werden die Daten mit einem Faktor skaliert und um einen Offset verschoben. Dadurch verändern sich die Daten qualitativ nicht, da alle Verhältnisse, Verteilungsformen und die Unterscheidbarkeit der Gruppen gleich bleiben. Es wird lediglich eine Verschiebung in einen gewünschten Wertebereich vorgenommen.

Die Bewertungsergebnisse sollen für die vorliegende Datenbasis bei positiven Werten liegen. Der Wertebereich wird zwischen etwa 5 und 45 festgelegt. Damit soll unterhalb der momentan niedrigsten Werte noch Raum für andere Fahrzeuge mit eventuell niedrigerer Qualität bleiben. Die obere Grenze wird bewusst so gewählt, da keiner der schon vorhandenen VOICE-Parameter einen ähnlichen Wertebereich abdeckt und auch keine unbeabsichtigte Interpretation als Prozentwert erfolgen kann, wie dies z.B. bei einem Wertebereich zwischen 0 und 100 oder zwischen 0 und 1 der Fall sein könnte.

Es erfolgt eine Werteverschiebung um einen Offset von +30 und eine Skalierung der Daten mit dem Faktor ¼. Entsprechende Ergebnisse hierzu befinden sich im folgenden Abschnitt 4.11. Die verwendete Skala ist in beide Richtungen offen. Beispielsweise könnten 2-Zylinderfahrzeuge Werte nahe an 0 oder sogar darunter erreichen. Fahrzeug höherer Klassen und mit größeren Motoren bzw. einer höheren Zylinderzahl werden den Wertebereich nach oben hin vermutlich deutlich ausweiten. Jegliche weitere Anpassung des gewählten Wertebereichs ist durch eine Änderung von Offset und/oder Skalierungsfaktor möglich und hat keinen Einfluss auf die Parameterqualität.

4.11. Darstellung der Ergebnisse

Die skalierten und verschobenen Werte des Downsizing Comfort Index für alle betrachteten Gruppen an den fünf Drehzahlstufen sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Rangordnungen der fünf Gruppen über den gesamten betrachteten Drehzahlbereich quasi konstant bleiben. Die niedrigsten Werte werden jeweils von 3-Zylinder-Dieselmotoren erreicht und die höchsten von 4-Zylinder-Ottomotoren. Wird eine Clusterung in diesel- (Gruppen 2 & 4) und benzinbetriebene (Gruppen 1, 3 & 5) Fahrzeuge vorgenommen, sind keine Überlappungen von Konfidenzintervallen erkennbar.

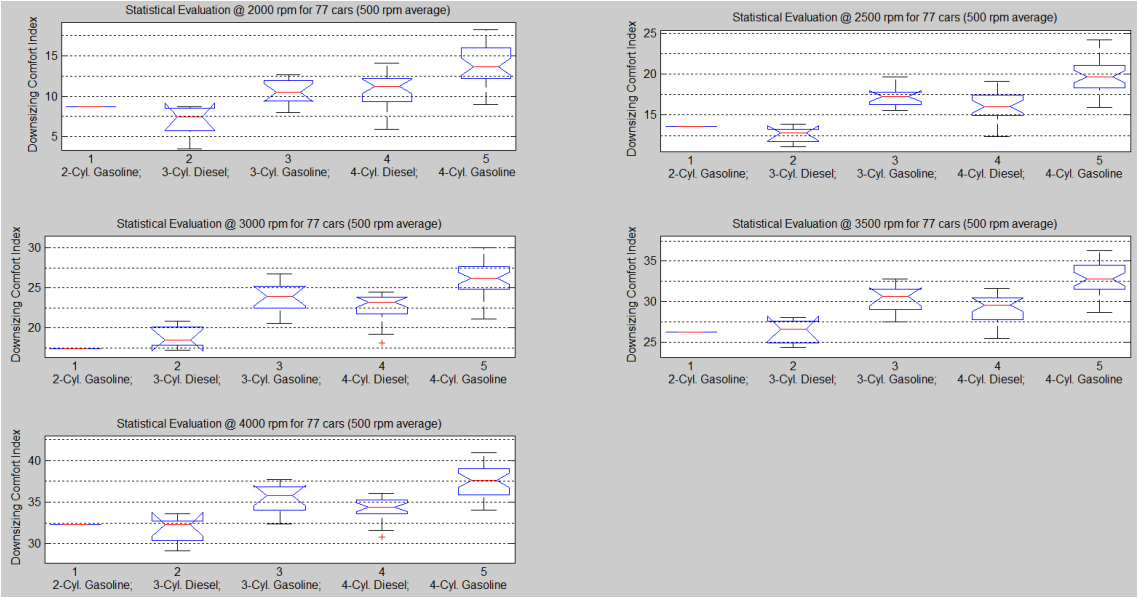


Abbildung 4-3: DCI Gruppenvergleiche

Abbildung 4-4 stellt das Verhalten des DCI über der Drehzahl dar. Für alle untersuchten Fahrzeuggruppen liegt ein gleichmäßig monotones Ansteigen in Abhängigkeit von der Drehzahl vor. Auch die Überlappungen der Wertebereiche der Gruppen 1 & 2 (2-Zylinder-Ottomotoren und 3-Zylinder-Dieselmotoren) bzw. der Gruppen 3 & 4 (3-Zylinder-Ottomotoren und 4-Zylinder-Dieselmotoren) werden in der Abbildung deutlich.

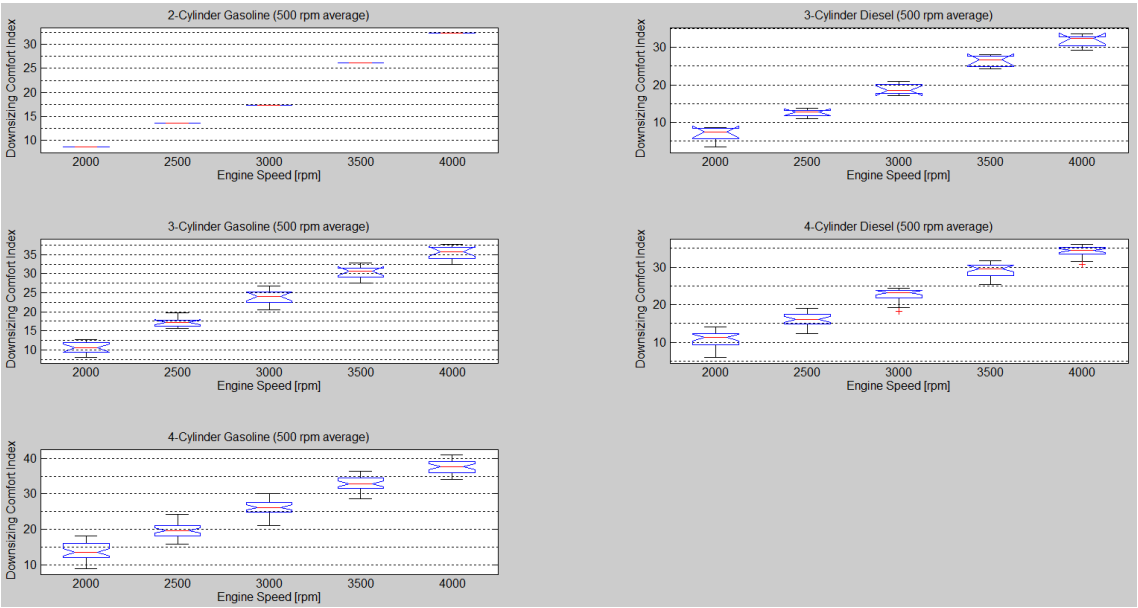


Abbildung 4-4: DCI Drehzahlverhalten

Die folgenden Histogramme zeigen die Werte des DCI für 3- und 4-Zylinder-Dieselmotoren (Abbildung 4-5), 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren (Abbildung 4-6) bzw. für 2-, 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren (Abbildung 4-7). Die fünf Teilabbildungen entsprechen jeweils den Drehzahlstufen bei 2000, 2500, 3000, 3500 und 4000 rpm.

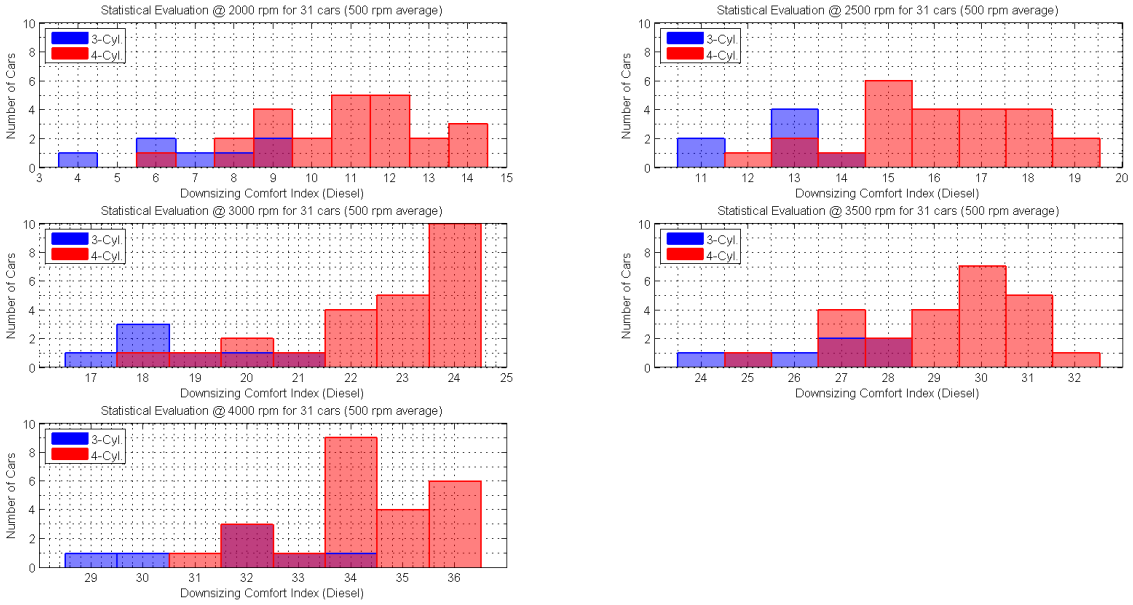


Abbildung 4-5: DCI für 3- und 4-Zylinder-Dieselmotoren

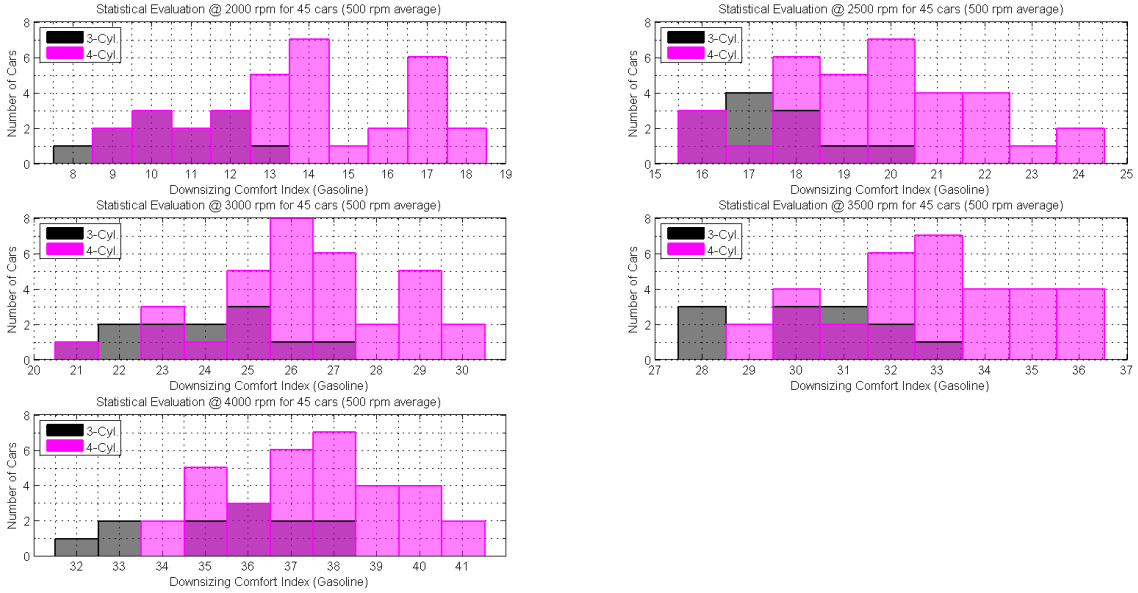


Abbildung 4-6: DCI für 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren

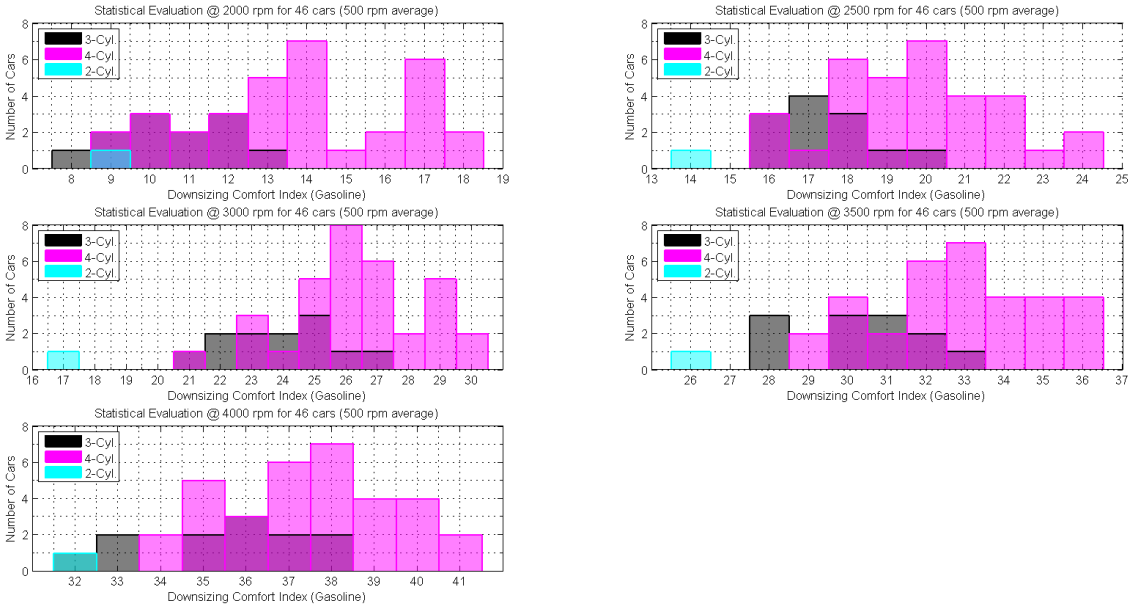


Abbildung 4-7: DCI für 2-, 3- und 4-Zylinder-Ottomotoren

Es zeigt sich, dass die Unterscheidbarkeit bei niedrigeren Drehzahlen besser ausgeprägt ist als bei hohen, da es zu weniger Überlappung der Wertebereiche der Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen kommt. Eine in Summe geringere Überlappung der Wertebereiche der Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen liegt für die Dieselmotoren vor. Da der entwickelte Index eine Qualitätsbewertung darstellt, sind die Überdeckungen von Bereichen mit Fahrzeugen unterschiedlicher Gruppen für spätere Untersuchungen besonders interessant. In diesen Bereichen liegen jene Fahrzeuge, welche anhand der DCI-Bewertung eine vergleichbare Qualität bei unterschiedlicher Zylinderzahl besitzen. Einige konkrete Beispiele hierzu werden in Abschnitt 5.6 genauer untersucht und verglichen.

4.12. Ausweitung der Auswertungen

Die Parameterentwicklung und die Optimierung der Ergebnisse erfolgt für Fahrzeuginnengeräuschaufnahmen bei einer Volllastbeschleunigung im 2. Gang im Drehzahlbereich zwischen 1750 und 4250 rpm. Nachfolgend wir der DCI anhand anderer Betriebszustände untersucht.

4.12.1. Erweiterung des Drehzahlbereichs

Eine Erweiterung des betrachteten Drehzahlbereichs für die Auswertungen ist bei der vorliegenden Datenbasis nicht möglich, da der ursprüngliche Drehzahlbereich schon so festgelegt wurde, dass er für die vorliegenden Fahrzeuge maximal ist. Eine Ausdehnung zu niedrigeren oder höheren Drehzahlen führt dazu, dass bestimmte Fahrzeugen nicht mehr den gesamten Bereich abdecken können. Das bedeutet, dass nicht mehr bei allen Drehzahlen dieselbe Datenbasis ausgewertet würde und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse folglich verloren ginge.

Als Ergänzung zu den obigen Betrachtungen zeigen die folgenden Abbildungen die Ergebnisse des DCI für Auswertungen der Datenbasis bei diskreten Drehzahlpunkten zwischen den fünf bisher verwendeten Drehzahlstufen. Um die Beeinflussung der Ergebnisse durch die Mittelung gering zu halten, wird eine Mittelungsintervall von +/- 25 rpm gewählt. Die Anpassung der Gewichtungsfaktoren für die Grundparameter erfolgt durch Interpolation zwischen den entsprechenden Werten aus Tabelle 4-8. Abbildung 4-8 zeigt die Wertebereiche des DCI für die fünf Fahrzeuggruppen in Form von Boxplotdarstellungen bei 1775, 2250, 2750, 3250 und 3750 rpm.

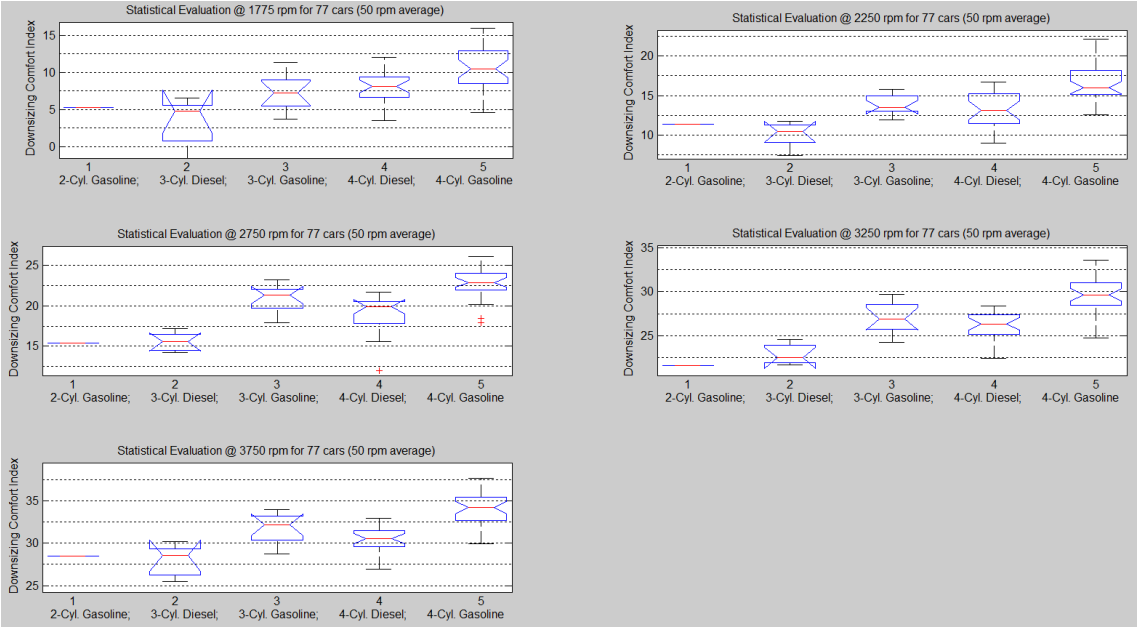


Abbildung 4-8: DCI Gruppenvergleiche bei weiteren Drehzahlpunkten

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen mittels ANOVA ergibt die gleichen Ergebnisse wie bei den bisherigen Betrachtungen (vgl. Unterscheidungsmatrizen in Tabelle 4-10). Das heißt, dass die Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl bei gleichem Brennverfahren bei allen betrachteten Drehzahlen unterscheidbar sind (mit 1 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Der DCI zeigt somit auch bei anderen Drehzahlpunkten und kleinen Mittelungsintervallen die gewünschten Ergebnisse.

4.12.2. Erweiterung um andere Fahrzustände

Für die Untersuchungen der Ergebnisse des DCI bei der Anwendung auf die Daten anderer Fahrzustände wird erstens eine Teillastbeschleunigung im 2. Gang und zweitens eine Volllastbeschleunigung im 3. Gang gewählt. Der betrachtete Drehzahlbereich bleibt gleich und die Unterscheidbarkeit der Gruppen wird wiederum anhand von Unterscheidbarkeitsmatrizen dargestellt.

Die Unterscheidbarkeitsmatrizen für die Teillastbeschleunigung im 2. Gang zeigt Tabelle 4-11. Zu beachten ist dabei, dass sich die Datenbasis leicht von der bisher verwendeten unterscheidet, da ein Fahrzeug aus der Gruppe mit den 3-Zylinder-Dieselmotoren fehlt. Es stehen also insgesamt 76 Fahrzeuge für die Auswertung zur Verfügung.

Tabelle 4-11: DCI Unterscheidbarkeitsmatrizen 2. Gang Teillastbeschleunigung

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Die Unterscheidbarkeit der Gruppen mit 3- und 4-Zylindermotoren bleibt sowohl für diesel- als auch für benzinbetriebene Fahrzeuge erhalten. Jedoch steigt der DCI des 2-Zylinderfahrzeugs für den betrachteten Betriebszustand im Verhältnis zu den Fahrzeugen in Gruppe 3 deutlich stärker an, sodass die Unterscheidbarkeit verloren geht. Allgemein liegen die Wertebereiche des DCI bei der Teillastbeschleunigung etwas höher als bei der Volllastbeschleunigung, jedoch ergeben sich auch deutlich größere Streuungen innerhalb der Gruppen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lastvorgaben für die einzelnen Fahrzeuge nicht (wie etwa bei Volllast) exakt festgelegt werden können[136] und somit die Vergleichbarkeit geringer wird.

Die Unterscheidbarkeitsmatrizen zum DCI bei einer Volllastbeschleunigung im 3. Gang zeigt Tabelle 4-12. Auch hier liegt wiederum eine geänderte Datenbasis vor, da für diesen Fahrzustand lediglich 70 der ursprünglich verwendeten Fahrzeuge für die Auswertungen zur Verfügung stehen.

Tabelle 4-12: DCI Unterscheidbarkeitsmatrizen 3. Gang Volllastbeschleunigung

2000 rpm						2500 rpm						3000 rpm						3500 rpm						4000 rpm					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1						1						1						1						1					
2						2						2						2						2					
3						3						3						3						3					
4						4						4						4						4					
5						5						5						5						5					

Die Unterscheidbarkeit der Dieselfahrzeuge ist weiterhin über den gesamten Drehzahlbereich gewährleistet. Jedoch sinken in den Gruppen mit Ottomotoren die Werte der 4-Zylinderfahrzeuge gegenüber jenen der 3-Zylinderfahrzeuge im Durchschnitt stärker ab, sodass es zu einer stärkeren Überlappung der Wertebereiche und somit einer schlechteren Unterscheidbarkeit kommt. Allgemein liegen die Wertebereiche für die Volllastbeschleunigung im 3. Gang etwas niedriger als im 2. Gang. Ursache dafür ist der größer werdende Einfluss von Roll- und Windgeräuschen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.

4.12.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Anhand der betrachteten Fahrzustände wird gezeigt, dass die Aussagen des DCI im Wesentlichen auch für andere Fahrzustände gelten. Jedoch sinkt die Unterscheidbarkeit der

[136] Vgl. Kiebusch, Richter und Weiland. 2005.

Gruppen im Allgemeinen ab. Ein exakter Vergleich der Aussagen für verschiedene Fahrzustände ist allerdings nicht möglich, da sich die verwendeten Datenbasen voneinander unterscheiden. Untersuchungen von stationären Fahrzuständen wurden bisher nicht durchgeführt. Bedingt durch den deutlich geringeren Motorgeräuschanteil am Gesamtgeräusch werden weniger aussagekräftige Ergebnisse erwartet.

4.13. Klassifizierung

Die Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl sind durch die Bewertung mit dem Downsizing Comfort Index im Mittel unterscheidbar. Um die Qualität der Zuordnung der Fahrzeuge zu den entsprechenden Gruppen zu zeigen, wird eine Klassifizierung durchgeführt. Dabei werden jeweils die Gruppen mit 3- und 4-Zylinderfahrzeugen des gleichen Brennverfahrens betrachtet. Als Grenzwert wird der Mittelwert aller Fahrzeuge der beiden Gruppen verwendet. Das heißt, dass Fahrzeuge, welche unterhalb des Grenzwerts liegen, den 3-Zylindern zugeordnet werden, und jene oberhalb dementsprechend den 4-Zylindern. Die Ergebnisse der Klassifizierung unter den vorgegebenen Bedingungen zeigt Tabelle 4-13.

Tabelle 4-13: DCI Klassifizierung

Drehzahl	2000 rpm	2500 rpm	3000 rpm	35000 rpm	4000 rpm
3-Zyl. Diesel vs. 4-Zyl. Diesel	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
3-Zyl. Otto vs. 4-Zyl. Otto	100 %	91,6 %	83,3 %	100 %	83,3 %
4-Zyl. Diesel vs. 3-Zyl. Diesel	79,2 %	83,3 %	79,2 %	79,2 %	79,2 %
4-Zyl. Otto vs. 3-Zyl. Otto	78,8 %	75,6 %	78,8 %	66,7 %	66,7 %

Speziell bei den 4-Zylinderfahrzeugen können einige Fahrzeuginnengeräusche nicht den richtigen Gruppen zugeordnet werden. Die Streuung der Fahrzeuge dieser Gruppen ist groß und es gibt somit große Unterschiede der Geräuschqualität innerhalb der Gruppen. Eine vollständige Unterscheidbarkeit ist aber auch gar nicht notwendig. Werden jene Fahrzeuge betrachtet, welche über den gesamten Drehzahlbereich einer anderen Gruppe zugeordnet werden, sind daraus einige Gemeinsamkeiten feststellbar. Beispielsweise werden von den im 3-Zylinderbereich liegenden 4-Zylinderfahrzeugen mit Ottomotor drei vom gleichen Aggregat angetrieben und die falsch zugeordneten 4-Zylinderfahrzeuge sind allesamt Modelle von nur vier verschiedenen Herstellern. Ähnliche Zusammenhänge sind auch bei den Dieselfahrzeugen feststellbar.

4.14. Statistische Optimierung

Nachfolgende Ergebnisse werden an der höchsten Drehzahlstufe bei 4000 rpm ermittelt. Die statistische Optimierung dient zur alternativen Datenevaluierung, wird in der DCI-Entwicklung aber nicht berücksichtigt. Ein Vergleich zwischen den obigen Ergebnissen und den statistisch optimierten Ergebnissen wird in Abschnitt 4.14.3 durchgeführt.

4.14.1. Hauptkomponentenanalyse

Zur Bestimmung statistisch unabhängiger, redundanzfreier Parameter wird eine Hauptkomponentenanalyse[137,138] anhand der VOICE-Parameter durchgeführt. Die Reihenfolge der untersuchten VOICE-Parameter entspricht jener in Tabelle 9-2 im Anhang, jedoch wird der Parameter Engine Speed Change nicht berücksichtigt, sodass 29 Parameter für die Analyse zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe der Kovarianzmatrix können die einzelnen Parameter auf deren lineare Unabhängigkeiten untersucht werden. Der Grad der linearen Unabhängigkeit der normalisierten Parameter wird in Abbildung 4-9 mittels einer Farbskala dargestellt. 0 indiziert eine vollkommen lineare Unabhängigkeit an, +1 eine totale positive und -1 eine totale negative lineare Abhängigkeit.

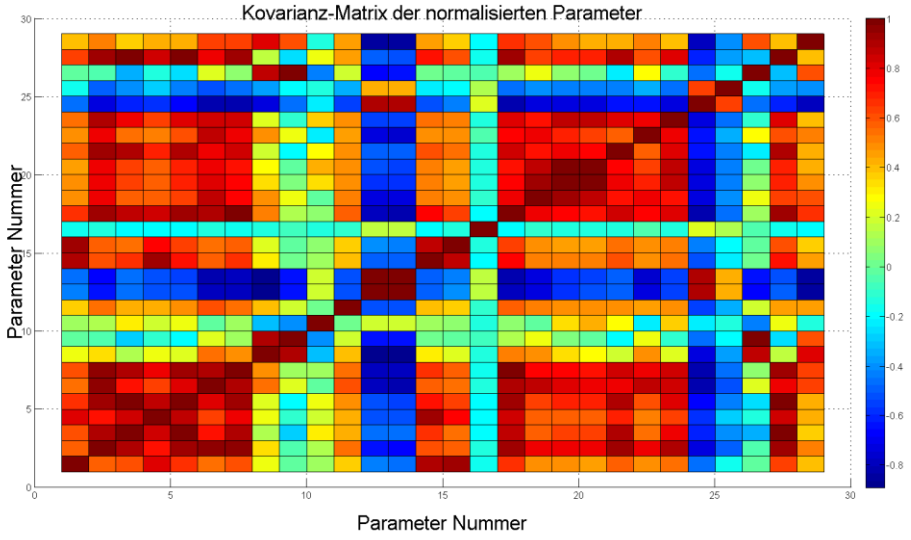


Abbildung 4-9: Kovarianzmatrix der normalisierten VOICE-Parameter @ 4000 rpm

In Tabelle 4-14 wird 0,1 als obere Schwelle für die lineare Unabhängigkeit gewählt. Dabei markiert „1“, dass die betreffenden Parameter linear unabhängig sind und „0“, dass eine lineare Abhängigkeit besteht.

[137] Vgl. Siegemund. 2003
[138] Vgl. Bortz und Schuster. 2010, S. 388ff.

Tabelle 4-14: Unabhängigkeitstabelle mit Gruppenbildung @ 4000 rpm

Lineare Unabhängigkeit der VOICE-Parameter																												
	Linear SPL	A-weighted SPL	B-weighted SPL	C-weighted SPL	D-weighted SPL	AD-weighted SPL	Loudness ISO 532B	Sharpness (Aures)	Sharpness (Zwicker)	Tonality	Roughness (AVL)	Articulation Index	Ext. Articulation Index	Low Frequency Content	Standard Deviation	Impulsiveness (Kurtosis)	Annoyance (Europe)	DCO Sport	Sportiness (Europe)	Sportiness (Japan)	DOC Power	REO Power	Powerfulness	Luxury	Evenness	Unweighted Sharpness	Annoyance (Japan)	CKI	Harshness Index
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
3			0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
4				0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
5					0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
6						0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
7							0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
8								0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
9									0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
10										0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
11											0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
12												0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
13													0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
14														0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
15															0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
16																0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
17																	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
18																		0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
19																			0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
20																				0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
21																					0	1	0	1	1	1	0	0	0
22																						0	0	1	1	0	0	0	0
23																							0	1	1	1	0	0	0
24																								0	1	1	1	1	1
25																									0	1	1	1	1
26																										0	1	0	0
27																											0	0	0
28																												0	1
29																													0

1 --> Parameter sind unabhängig; 0 --> Parameter sind abhängig

Gruppe 1 --> Schalldruckbasierte Parameter; **Gruppe 2** --> AI/EAI/Luxury; **Gruppe 3** --> Schärfe-/Rauigkeitsparameter

Anhand der Unabhängigkeitsmatrix können drei Gruppen von linear abhängigen Parametern zusammengefasst werden. Die große Gruppe 1 (violett) bilden Parameter, die basierend auf unterschiedlichen Gewichtungen aus dem Schalldruckspektrum berechnet werden. Gruppe 2 (orange) besteht aus „Articulation Index“, „Extended Articulation Index“ und „Luxury“ und Gruppe 3 (türkis) sind Parameter zur „Schärfe“- bzw. „Rauigkeitsbewertung“.

Des Weiteren wird anhand der Koeffizienten-Matrix die Beladung der Hauptkomponenten durch die Parameter untersucht. Eine grafische Darstellung hierzu zeigt Abbildung 4-10. Die Stärke

der Beladung der Hauptkomponenten durch die Parameter wird mittels einer Farbskala dargestellt.

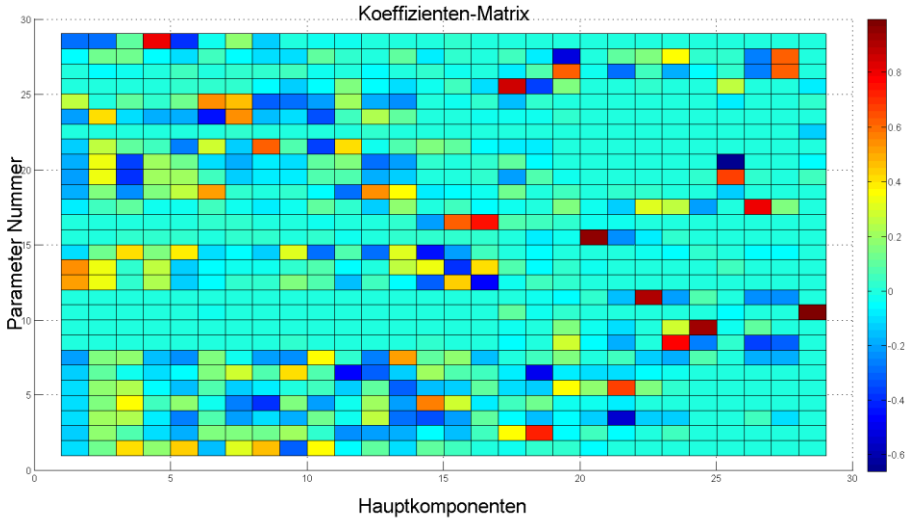


Abbildung 4-10: Koeffizienten-Matrix @ 4000 rpm

Das große Potential zur Beschreibung der Daten anhand des Extended Articulation Index (Parameter Nr. 13) wird durch dessen eindeutig höchste Beladung der ersten Hauptkomponente bestätigt. Im Allgemeinen sind auf den ersten Hauptkomponenten nur hohe Beladungen durch Parameter der Parametergruppen 1 und 2 vorhanden.

Die Erklärung von mehr als 88 % der Gesamtvarianz der Datenbasis am betrachteten Drehzahlpunkt ist bereits mit zwei transformierten Komponenten möglich, wie Abbildung 4-11 zeigt.

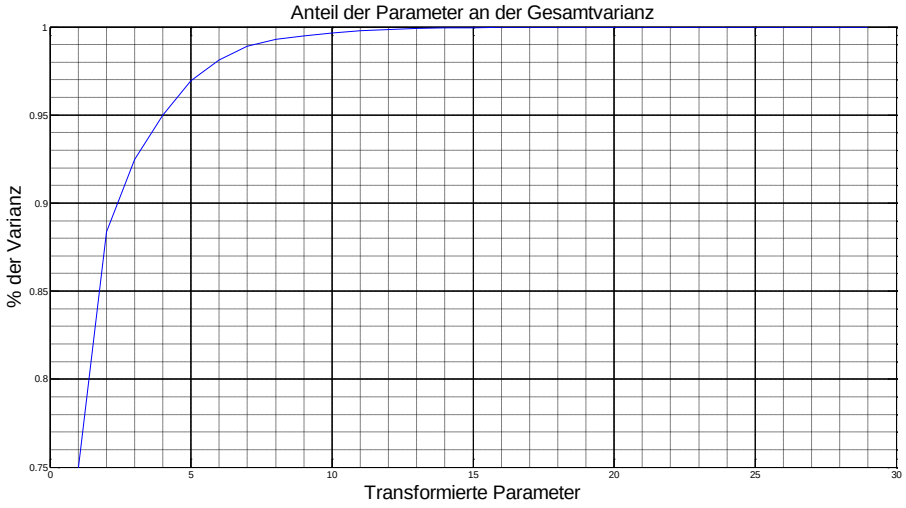


Abbildung 4-11: Anteil der transformierten Parameter an der Gesamtvarianz @ 4000 rpm

4.14.2. Klassifizierung

Anhand der LDA[139] (Linear Descriptive Analysis) wird für die gewählten Parameter die Trennbarkeit und in Folge die Qualität der Klassifizierung analysiert. Dafür wird aus dem

[139] Vgl. Balakrishnama und Ganapathiraju. 1998, S. 1.

bestehenden Datensatz jeder zweite Eintrag zum Training des Algorithmus verwendet und die übrigen Einträge werden demnach klassifiziert. Die Qualität der Zuordnung zu den Gruppen anhand ausgewählter Parameter ist in Tabelle 4-15 dargestellt. Dabei wird die Klassifizierung nach zwei Kriterien durchgeführt – einerseits nach Zylinderzahl und andererseits nach Brennverfahren.

Die Auswahl der Parameter ergibt sich aus den höchsten Beladungen der ersten drei Hauptkomponenten entsprechend der Koeffizientenmatrix in Abbildung 4-10. Die letzten beiden Zeilen ergeben sich durch schrittweise Zusammensetzung der Parameter, die zur Berechnung des Downsizing Comfort Index verwendet werden.

Tabelle 4-15: Klassifizierungstabelle LDA @ 4000 rpm

VOICE-Parameter	Zylinderzahl	Brennverfahren
Lautheit	50,97 %	74,72 %
Extended Articulation Index	47,60 %	74,54 %
Articulation Index	46,36 %	74,44 %
Luxury	46,92 %	62,59 %
Powerfulness	42,54 %	64,52 %
Sportiness	46,71 %	61,62 %
CKI	20,96 %	80,47 %
Low Frequency Content	39,01 %	72,44 %
EAI + Lautheit	54,10 %	75,97 %
EAI + Lautheit + LFC	55,04 %	77,85 %

Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass Lautheit und Extended Articulation Index die höchste Klassifizierungsqualität bezüglich der Zylinderzahl aufweisen. Der Articulation Index erreicht annähernd so hohe Werte wie der Extended Articulation Index, was sich aber durch die fast idente Berechnungsweise und die lineare Abhängigkeit (> 95 %) erklärt. Dies trifft auch für den Parameter Luxury zu, welcher ebenfalls eine lineare Abhängigkeit von über 90 % mit dem Extended Articulation Index zeigt. Powerfulness und Sportiness (Europe und Japan) zeigen beide hohe Beladungen der ersten drei Hauptkomponenten und ebenfalls eine hohe Klassifizierungsrate anhand der Zylinderzahl, jedoch sind diese beiden Größen in hohem Maße (> 80%) linear von der Lautheit abhängig. Die letzten beiden betrachteten Größen sind bei dieser Drehzahl zur Trennung anhand der Zylinderzahl weniger gut geeignet, wobei besonders der CKI sehr niedrige Werte zeigt. Dies ist auf die schlechte Unterscheidbarkeit der Dieselmotoren bei CKI-Bewertung zurückzuführen. Jedoch erreicht der CKI eine sehr hohe Klassifizierungsrate anhand des Brennverfahrens.

Während bei allen anderen betrachteten Parametern die Qualität der Klassifizierung über den gesamten Drehzahlbereich annähernd konstant bleibt, nimmt diese für CKI und Low Frequency Content bei tieferen Drehzahlen deutlich zu. Sowohl CKI als auch LFC zeigen eine lineare Abhängigkeit von der Lautheit, jedoch ist diese mit etwa 50 % bedeutend niedriger als etwa bei Powerfulness (80 %) und Sportiness (70 %).

4.14.3. Vergleich mit dem DCI

Anhand der hier durchgeführten statistischen Untersuchungen werden Extended Articulation Index und Lautheit als Parameter mit der höchsten Relevanz für die Unterscheidung der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen bestätigt. Durch Kombination der beiden Größen ist eine richtige Zuordnung von 54,10 % aller untersuchten Fahrzeuge entsprechend deren Zylinderzahl ohne Berücksichtigung des Brennverfahrens möglich.

Der Low Frequency Content zeigt ebenfalls eine hohe Beladung der ersten Hauptkomponenten, jedoch kann bei der betrachteten Drehzahl keine gute Klassifizierung anhand der Zylinderzahl erreicht werden. Diese steigt jedoch mit niedrigeren Drehzahlen, was bei der Berechnung des DCI durch die entsprechende Wahl der Gewichtsfaktoren berücksichtigt wird. Wird der LFC bei der betrachteten Drehzahl von 4000 rpm als dritte Bewertungsgröße neben Extended Articulation Index und Lautheit verwendet, steigt der Anteil richtiger Zuordnungen auf ca. 55 %.

Die Parameter zur Schärfe- und Rauigkeitsbewertung, welche in Tabelle 4-14 als dritte linear unabhängige Gruppe identifiziert werden, zeigen weder eine hohe Beladung der Hauptkomponenten noch eine gute Trennbarkeit anhand der Zylinderzahl.

Zusammenfassend kann die Auswahl der Parameter für die Berechnung des DCI mit den gezeigten statistischen Methoden begründet werden. Auch die Gewichtung der Parameter wird bestätigt, da der Extended Articulation Index die höchste Relevanz hat und die Lautheit dahinter folgt. Die Verwendung des LFC wird anhand der Betrachtungen bei 4000 rpm nicht begründet. Allerdings ist beim DCI der Gewichtungsfaktor des LFC bei dieser Drehzahl gleich 0.

4.15. Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen der VOICE-Parameter geht hervor, dass einige Parameter die Gruppen eines der beiden Brennverfahren unterscheiden können, jedoch nicht alle Gruppen. Das heißt, dass für die Betrachtung von Fahrzeugen desselben Brennverfahrens durchaus einer der bestehenden Parameter verwendet werden könnte. Beispielsweise könnten die Schärfe (Aures) und der CKI für Fahrzeuge mit Ottomotoren oder die Annoyance (Europe) für dieselbetriebene Fahrzeuge verwendet werden. Die beste Unterscheidbarkeit der Gruppen anhand der VOICE-Parameter ist mit dem Extended Articulation Index möglich.

Daher baut der entwickelte Downsizing Comfort Index auch auf dem Extended Articulation Index auf und kombiniert diesen unter Verwendung von teilweise drehzahlabhängigen Gewichtungsfaktoren mit der Lautheit nach ISO 532B und dem Low Frequency Content. Durch

diese Parameterkombination wird eine weitere Erhöhung der Unterscheidbarkeit der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl erreicht. Eine Unterscheidbarkeit ist jedoch weiterhin nur zwischen den Gruppen desselben Brennverfahrens möglich. Dies liegt daran, dass die Geräuschqualitäten von Fahrzeugen mit Diesel- und Ottomotoren prinzipiell schwer miteinander vergleichbar sind.[140]

Alle drei Grundparameter, die den neu entwickelten Parameter bilden, geben grundsätzlich unterschiedliche Formen von Pegelbewertungen in bestimmten Frequenzbereichen wieder. Somit werden explizit keine zeitlichen oder spektralen Maskierungseffekte oder Modulationsvorgänge untersucht. Andere Bewertungsgrößen wie beispielsweise die Rauigkeit oder der CKI würden solche Effekte berücksichtigen, zeigen jedoch geringeres Potential zur Unterscheidung der einzelnen Gruppen. Das heißt, zeitliche Strukturen, die anhand von Modulationsparametern näher erfasst werden, tragen nicht primär zur Gesamtklangbeschreibung bei. Wenn der Einfluss der Lautheit reduziert werden kann, könnten diese Aspekte aber relevant werden.

[140] Vgl. Spessert. 1999, S. 508ff.

5. Interpretation und Bedeutung in der Praxis

5.1. Interpretation der Ergebnisse

Wie der Name des entwickelten Index – Downsizing Comfort Index - schon ausdrückt, so ist er ein Parameter zur objektiven Bewertung des akustischen Komforts für Fahrzeuge mit Motoren kleiner Zylinderzahlen. Eine Unterscheidbarkeit von 3- und 4-Zylindermotoren ist möglich, eine vollständig richtige Klassifizierung aller untersuchten Fahrzeuge ist allerdings nicht gegeben. Das ist jedoch nicht die vorrangigste Aufgabe des Index.

Vielmehr wird der Index auch verwendet, um die Innengeräuschqualität innerhalb einer Gruppe von Fahrzeugen gleicher Zylinderzahl und mit gleichem Brennverfahren zu vergleichen. Dazu wird der Wertebereich einer Gruppe als typisch rund um den Mittelwert und als gut bzw. schlecht in den Randbereichen interpretiert. Bereiche, in denen die Beispiele verschiedener Gruppen überlappen, sind für weitere Untersuchungen interessant. Beispielsweise können Fahrzeuge mit 3-Zylindermotoren, welche im Bereich der 4-Zylindermotoren liegen, als komfortabel bezüglich des Downsizings bezeichnet werden, und 4-Zylinder-Beispiele am unteren Rand des Wertebereichs ihrer Gruppe als wenig komfortabel im Vergleich zum durchschnittlichen 4-Zylinderfahrzeug.

Der Vorteil des Parameters ist, dass der akustische Komfort von Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderanzahl mit einem einzelnen Wert bewertet und einfach mit anderen Beispielen verglichen werden kann. Vergleiche von konkreten Fahrzeugbeispielen folgen in Abschnitt 5.6.

5.2. Einschränkungen

Um verlässliche Aussagen anhand des entwickelten Index zu bekommen, müssen einige Voraussetzungen und Einschränkungen beachtet werden. Ergebnisse mit hoher Glaubwürdigkeit sind nur für Aufnahmen von Fahrzuständen zu erwarten, bei denen das Innengeräusch vom Motorgeräusch dominiert wird. Diese Bedingung ist im Besonderen für Volllastzustände erfüllt. Auch bei sehr niedrigen und sehr hohen Motordrehzahlen sind keine Ergebnisse mit hoher Aussagekraft garantiert, da in diesen Bereichen verschiedene Nebeneffekte wie tieffrequentes Dröhnen und Brummen oder starke Nebengeräusche (Wind, Reifen, …) auftreten können.

Der vorgestellte Index wurde anhand der beschriebenen Datenbasis von Fahrzeugen kleiner Zylinderzahlen entwickelt. Daher sind die präsentierten Resultate streng genommen auch nur für Fahrzeuge der entsprechenden Gruppen gültig. Eine Ausweitung auf Fahrzeuge anderer Klassen und mit Motoren anderer Zylinderzahlen ist allerdings für die Zukunft geplant. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Ausweitung auf Fahrzeuge mit 2-

Zylindermotoren. Nachdem für die Auswertungen lediglich ein 2-Zylinderfahrzeug zur Verfügung stand, können die Aussagen des Parameters für diese Fahrzeugklasse nicht einfach verallgemeinert werden, sondern lediglich als Abschätzung interpretiert werden.

5.3. Physikalischer Zusammenhang

Wird für ein Fahrzeug ein bestimmter DCI-Wert ermittelt, so kann dieser auf die drei verwendeten Grundparameter zurückgeführt werden. Wird etwa ein Fahrzeuginnengeräusch mit einem für die jeweilige Gruppe niedrigen Wert durch den Index bewertet, so liegt dies entweder an einer großen Lautheit, einem hohen Anteil tiefer Frequenzen oder einer schlechten Sprachverständlichkeit im Fahrzeug. Mindestens eine dieser Bedingungen muss erfüllt sein, es können aber auch mehrere oder alle zutreffen. Jedes untersuchte Beispiel muss somit bezüglich der Beiträge der Grundparameter analysiert werden, um Begründungen für die jeweilige Bewertung zu finden.

Zusammengefasst bilden alle drei Grundparameter eine Form der Pegelbewertung in verschiedenen Frequenzbereichen. Die Lautheit (nach ISO 532B) wird anhand der Gewichtung von Terzbandpegel zwischen 40 Hz und 12,5 KHz berechnet und repräsentiert die wahrgenommene Lautstärke mit einem Einzahlwert. Die Berechnung des Anteils tiefer Frequenzen erfolgt mit dem Low Frequency Content durch eine Betrachtung des linearen Bandpasspegels bei tiefen Frequenzen. Die Sprachverständlichkeit wird durch den Extended Articulation Index beschrieben. Dabei werden Terzbandpegel zwischen 200 und 6300 Hz unterschiedlich gewichtet und aufsummiert. Pegel im Frequenzbereich zwischen 500 und 1250 Hz haben dabei den größten Einfluss.

Low Frequency Content und Extended Articulation Index decken somit zusammen jenen Frequenzbereich ab, in dem die deterministischen Anteile des Motorgeräuschs – das heißt, die Motorordnungen mit hohen Amplituden – hauptsächlich auftreten.[141] Oberhalb dieses Frequenzbereichs sind keine stark ausgeprägten Motorordnungen mehr zu erwarten und der Einfluss von Störgeräuschen wird höher. Die Lautheit als dritter Parameter hat deshalb große Relevanz, da eine höhere Lautheit des Fahrzeuggeräusches subjektiv meist mit einem niedrigeren akustischen Komfort verbunden wird.[142]

Durch eine Analyse der Anteile der drei Grundparameter können somit Probleme in bestimmten Frequenzbereichen identifiziert und entsprechende konstruktive Verbesserungsmaßnahmen gesetzt werden. Beispielsweise könnten spezielle Absorber entworfen und installiert werden, um den Einfluss bestimmter Frequenzbänder zu reduzieren.

[141] Vgl. Braess und Seiffert. 2013, S. 62.
[142] Vgl. Biermayer. 2013, S. 4.

5.4. Einfluss von Fahrzeuggröße und -klasse

Durch die Limitierung des Hubvolumens zur Auswahl der Fahrzeuge der verwendeten Datenbasis wird eine Beschränkung auf Kleinst-, Klein- und Kompaktwagen erreicht. Trotzdem ist der Einfluss der Fahrzeugklasse und somit der Fahrzeuggröße nicht auszuschließen. Da der Parameter anhand von Innengeräuschaufnahmen entwickelt wurde und in weiterer Folge auch zur Bewertung der Qualität des Fahrzeuginnengeräusches dienen soll, werden Geräusche verarbeitet, die nicht dem reinen Motorgeräusch entsprechen, sondern zum Beispiel auch Geräuschanteile von Ansaug- und Abgasanlagen und Nebenaggregaten beinhalten und durch das Übertragungsverhalten des Gesamtfahrzeugs beeinflusst werden. Gerade das Fahrzeugübertragungsverhalten hängt von der Fahrzeuggröße und Klasse ab[143], aber durch die festgelegten Auswahlkriterien ist eine bestmögliche Vergleichbarkeit innerhalb der Datenbasis gesichert.

5.5. Verwendung von Motorprüfstandsaufnahmen

Alle Geräuschaufnahmen in der Datenbank von AVL VOICE stammen von Messungen auf einer Teststrecke. Bei den Auswertungen sind durch die Wahl des entsprechenden Fahrzustands und durch die Eingrenzung des Drehzahlbereichs zwar die Anteile des Motors jene, die das Fahrzeuginnengeräusch dominieren, aber es sind auch Störanteile durch Reifenrollgeräusche oder Windgeräusche vorhanden. Diese können bei derartigen Aufnahmen auf der Teststrecke niemals vollständig ausgeschlossen werden. Bei Aufnahmen am akustischen Rollenprüfstand gibt es zwar keine nennenswerten Windgeräusche, aber auch hier ist ein Reifenrollgeräusch vorhanden.

Um diese Einflüsse vollständig auszuschließen, müssten Aufnahmen vom akustischen Motorprüfstand für die Auswertungen herangezogen werden. Dabei gibt es allerdings einige Nachteile. Zwar bieten Motorprüfstandsaufnahmen das direkteste akustische Abbild des Motors, da es wenig Beeinflussung durch andere Geräuschquellen (abgesehen von Nebenaggregaten) gibt, jedoch haben diese Aufnahmen ohne Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen in die Fahrgastzelle wenig mit dem Fahrzeuginnengeräusch gemeinsam.

Der größte Nachteil ist allerdings, dass von Motoren der interessierenden Gruppen nur eine kleine Anzahl an Prüfstandsaufnahmen vorhanden ist und diese teilweise mit unterschiedlichen Setups aufgezeichnet wurden. Somit gibt es keine vergleichbare Datenbasis, anhand derer Untersuchungen in einem ähnlichen Umfang möglich wären. Zwar gibt es eine Vielzahl von Aufnahmen von 4-Zylindermotoren beider Brennverfahren, jedoch nur einige wenige Aufnahmen von 3-Zylinder-Ottomoren und überhaupt keine von 3-Zylinder-Dieselmotoren. Einige dieser Beispiele werden nach Abschluss dieser Arbeit für die Verarbeitung mit AVL

[143] Vgl. Basshuysen. 2012, S. 1028.

VOICE aufbereitet und danach mit dem entwickelten Parameter bewertet, um so auch einen Eindruck davon zu bekommen, in wieweit eine Anwendung auf reine Motorgeräusche möglich ist.

5.6. Vergleiche konkreter Fahrzeugbeispiele

Um die Aussagekraft des DCI anhand von konkreten Beispielen untersuchen zu können, werden im Folgenden modell- und seriengleiche Fahrzeuge gegenübergestellt, welche mit Motoren verschiedener Zylinderzahlen und verschiedener Brennverfahren ausgestattet sind. Das heißt, dass eine hohe Vergleichbarkeit der gewählten Beispiele gegeben ist, da der Einfluss von Fahrzeugübertragungsverhalten sowie von Wind- und Rollgeräuschen als annähernd ident angenommen werden kann. Die gewählten Fahrzeugbeispiele werden anonymisiert präsentiert, um eine objektive Interpretation der Ergebnisse zu garantieren. Es werden lediglich Zylinderzahl, Brennverfahren und Hubvolumen angegeben.

Die beiden Diagramme in Abbildung 5-1 zeigen die Bewertungen von zwei Fahrzeugen für jeweils drei verschiedene Motorisierungen, die in den Legenden beschrieben sind.

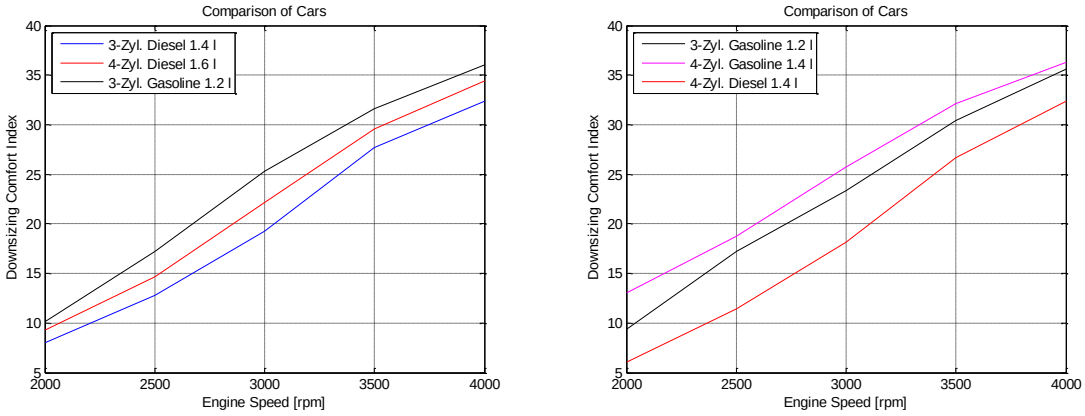


Abbildung 5-1: DCI Fahrzeugvergleiche 1 und 2

Anhand der Diagramme werden einige der gewonnenen Erkenntnisse bestätigt. Beispielsweise zeigt sich die im Allgemeinen niedrigere Geräuschqualität von Dieselmotoren gegenüber Ottomotoren. Für beide Fahrzeuge liegt die Kurve des 4-Zylinder-Dieselmotors niedriger als jene des 3-Zylinder-Ottomotors. Der 3-Zylinder-Dieselmotor ist im linken Diagramm erwartungsgemäß am niedrigsten bewertet. Er liegt über den gesamten Drehzahlbereich aber trotzdem etwas höher als der 4-Zylinder-Dieselmotor im rechten Diagramm. Das heißt, dass hier eine Überschneidung der Wertebereiche von 3- und 4-Zylindermotoren sichtbar ist. Im rechten Fahrzeug erreicht der 3-Zylinder-Ottomotor eine deutlich höhere Bewertung als der 4-Zylinder-Dieselmotor und liegt relativ nahe am 4-Zylinder-Ottomotor. In beiden Diagrammen bleiben die Reihungen der untersuchten Motoren über den gesamten Drehzahlbereich konstant.

Das linke Diagramm in Abbildung 5-2 vergleicht einen 2-Zylinder- mit einem 4-Zylinder-Ottomotor im gleichen Fahrzeug. Rechts erfolgt die Gegenüberstellung eines 4-Zylinder-Dieselmotors mit einem 3-Zylinder-Ottomotor.

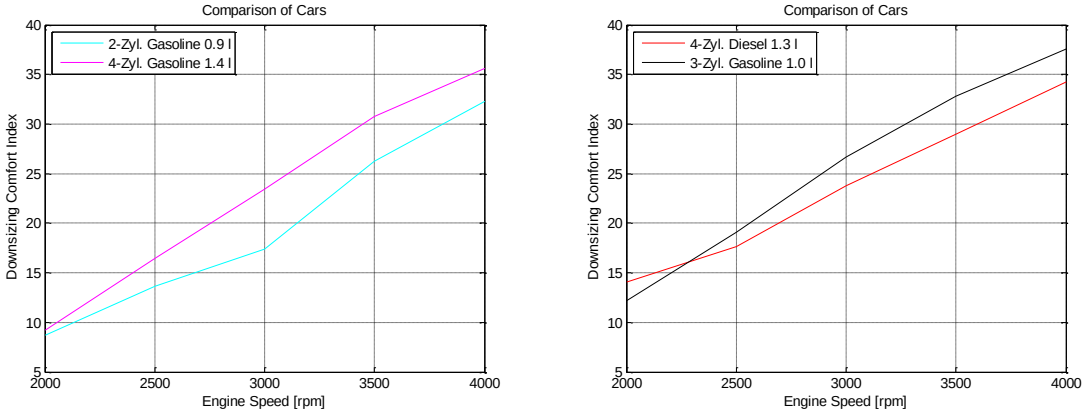


Abbildung 5-2: DCI Fahrzeugvergleiche 3 und 4

Der 2-Zylindermotor nimmt im gesamten Drehzahlbereich niedrigere Werte an als der 4-Zylindermotor. Der Abstand vergrößert sich im mittleren und hohen Drehzahlbereich gegenüber den niedrigen Drehzahlen. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass der betrachtete 4-Zylindermotor im Vergleich mit anderen Beispielen seiner Gruppe im tiefen Drehzahlbereich sehr niedrige Werte annimmt. Wird der 2-Zylinder-Ottomotor jedoch mit dem 3-Zylinder-Dieselmotor im linken Diagramm von Abbildung 5-1 verglichen, so ergeben sich ähnliche Wertebereiche. Das heißt, dass der vom DCI bewertete akustische Komfort bei beiden Beispielen vergleichbar ist. Der im rechten Diagramm dargestellte 3-Zylinder-Ottomotor weist einerseits über weite Strecken des betrachteten Drehzahlbereichs eine höhere Bewertung als der 4-Zylinder-Dieselmotor im gleichen Fahrzeug auf und hat andererseits auch eine deutlich höhere Bewertung als der 4-Zylinder-Ottomotor im linken Fahrzeug.

Die Diagramme in Abbildung 5-3 stellen für zwei Fahrzeuge jeweils die DCI-Bewertungen eines 4-Zylinder-Dieselmotors und eines 4-Zylinder-Ottomotors gegenüber.

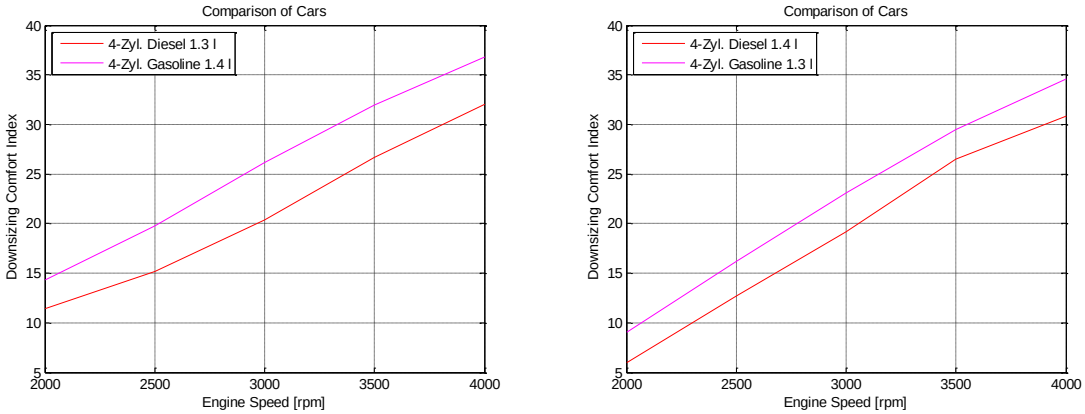


Abbildung 5-3: DCI Fahrzeugvergleiche 5 und 6

Bei beiden Fahrzeugen wird deutlich, dass der DCI die Geräuschqualität von Dieselmotoren niedriger bewertet als von Ottomotoren. Die Unterschiede zwischen den beiden Motorisierungen fallen im rechten Diagramm kleiner aus, jedoch liegen hier die Wertebereiche insgesamt niedriger, wie auch im Vergleich zu vergleichbaren Beispielen in den anderen Diagrammen zu erkennen ist.

5.7. Vergleich mit subjektiven Bewertungen

In Zuge einer Lehrveranstaltung wurden anhand von Geräuschaufnahmen aus der Datenbasis informelle Hörversuche mit Studierenden zur Unterscheidbarkeit von Fahrzeugen mit Motoren unterschiedlicher Zylinderzahl durchgeführt.

5.7.1. Versuchssetup

Die bei den Hörversuchen verwendeten Beispiele sind allesamt Fahrzeuge mit Ottomotoren. Darunter befinden sich ein 2-Zylinderfahrzeug, ein 3-Zylinderfahrzeug, zwei 4-Zylinderfahrzeuge und als Referenz ein 6-Zylinderfahrzeug. Als Fahrzustand wurde ein Volllasthochlauf im 2. Gang gewählt. Die Länge der präsentierten Stimuli betrug eine Sekunde, sodass bei einer mittleren Drehzahl von 2000 rpm ein maximaler Umfang von 1000 rpm pro Messpunkt eingehalten wurde.

In einem Versuch nach der Repertory Grid Technology[144] wurden die Beispiele den neun Probanden in fünf Stimulitripel präsentiert. Um die Vertrauenswürdigkeit der Probanden zu überprüfen, wurde das 3-Zylinderfahrzeug wiederholt präsentiert. Eine Versuchsperson wurde ausgeschlossen, sodass die Antworten von acht Probanden für die Auswertungen zur Verfügung standen.

5.7.2. Resultate

Im Zuge der Versuche wurden insgesamt 54 Attribute zur Differenzierung der Stimuli gesammelt. Diese Attribute wurden anhand ihrer semantischen Ähnlichkeiten in Gruppen eingeteilt. Dabei wurden zur Gruppe „basslastig“ neun Nennungen zugeordnet, sodass dieses Attribut als wesentliches Entscheidungsmerkmal identifiziert werden konnte.

Die Datenlagen für die fünf Gruppen (und der durch die Wiederholung zusätzlich entstandenen Gruppe) bei der Bewertung mit dem Attribut „basslastig“ zeigen die Boxplots in Abbildung 5-4.

[144] Vgl. Hemmecke. 2012.

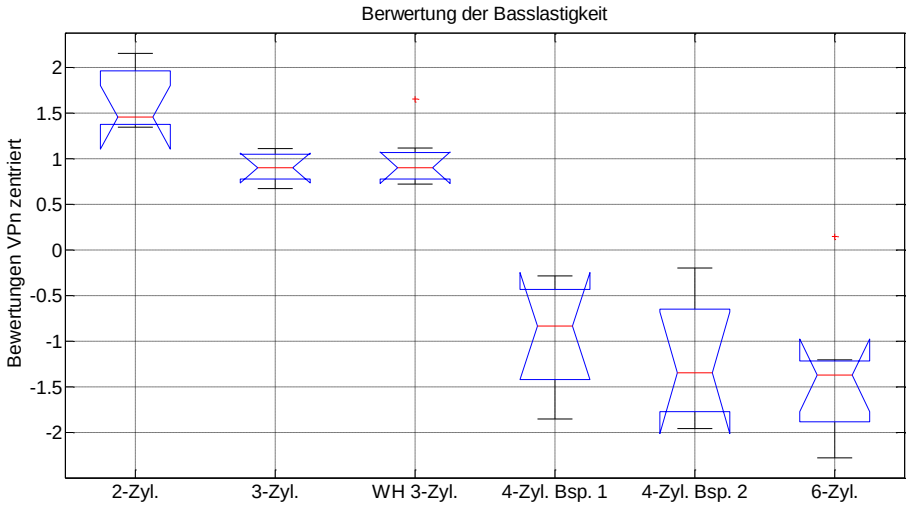


Abbildung 5-4: Datenlage bei Bewertung mit dem Attribut "basslastig"

Die vorliegenden Daten sind quantitativ und allesamt normalverteilt. Anhand des t-Tests[145] wurde überprüft, ob die Gruppen anhand des Attributes „basslastig“ im Mittel unterschieden werden können.

Die Resultate des Tests zur Unterscheidbarkeit der Gruppen werden wiederum anhand einer Unterscheidbarkeitsmatrix (Tabelle 5-1) dargestellt. Grüne Felder indizieren die Unterscheidbarkeit der verglichenen Gruppen und rote Felder die Nicht-Unterscheidbarkeit. Auf die Darstellung der Gruppe 3, welche eine Wiederholung der Gruppe 2 darstellt, wird verzichtet, da sich daraus sehr ähnliche Resultate ergeben.

Tabelle 5-1: Unterscheidbarkeit "basslastig"

2000 rpm				
Gr.	2	4	5	6
1				
2				
4				
5				

5.7.3. Schlussfolgerung

Bei Hörversuchen zur subjektiven Unterscheidbarkeit von Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen wurde von den Probanden das Attribut „basslastig“ als Unterscheidungsmerkmal besonders häufig genannt. Die Bewertungen der 3- und 4-Zylinderfahrzeuge durch die Versuchspersonen unterscheiden sich signifikant.

Für den Hörversuch wurden einzelne benzinbetriebene Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen verwendet, sodass eine Verallgemeinerung der Aussagen auf alle Fahrzeuge der entsprechenden Gruppen bzw. auf dieselbetriebene Fahrzeuge nicht möglich ist. Jedoch kann anhand dieser Ergebnisse die Verwendung des Low Frequency Contents zur Berechnung

[145] Vgl. Bortz und Schuster. 2010, S. 368ff.

des entwickelten Index begründet werden, da damit der Energieanteil bei tiefen Frequenzen – vergleichbar mit der Basslastigkeit – der Fahrzeuggeräusche bewertet wird.

6. Alternative Bewertungsmethoden

Nachfolgend werden alternative Möglichkeiten zur Unterscheidung der Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen basierend auf Klangcharakterbeschreibungen vorgestellt

Eine Klanganalyse anhand von Theorien der Harmonielehre und die damit verbundenen Möglichkeiten eines ordnungsorientierten Sound-Designs werden in Abschnitt 6.1 behandelt. Eine weitere Möglichkeit zur Klangcharakterisierung bietet die Beschreibung der Klangfarben anhand der Teiltonstrukturen. Darauf nimmt Abschnitt 6.2 Bezug. Die Darstellung von Teiltonstärken im Spektrum mittels verschiedener Tristimulus–Varianten und durch Betrachtung deterministischer und stochastischer Komponenten wird in Abschnitt 6.3 erläutert. Ideen zur Untersuchung stochastischer Anteile im Geräuschspektrum bzw. zur Entwicklung einer neuen Rauigkeitsbewertung, welche hinsichtlich einer Unterscheidung von Fahrzeuggeräuschen mit Motoren unterschiedlicher Zylinderzahl optimiert ist, werden in den Abschnitten 6.4 bzw. 6.5 präsentiert.

6.1. Harmonische Analyse der Motorordnungen

6.1.1. Grundlagen

Der Inhalt dieses Abschnitts orientiert sich am Artikel „Sound-Design unter den Aspekten der Harmonielehre der Musik“ von Alt und Jochum (2003).[146]

Für die Kultivierung eines erwünschten Klangcharakters haben die Motorordnungen und deren entsprechende Kombinationen großes Potential. Dabei können die aus der Harmonielehre bekannten und seit Jahrhunderten bewährten Erkenntnisse auf die Motorakustik umgelegt werden. Sowohl in der Musikalischen Akustik als auch in der Maschinenakustik gelten dieselben physikalischen Grundlagen und die Physiologie des Hörens dient in beiden Fällen zur Beschreibung der Hörempfindung.

Während jedoch in der Musikalischen Akustik eine detaillierte Notation und die Beschreibung von harmonischen Zusammenhängen mit Teiltonstärken und Frequenzverhältnissen erfolgt, stehen in der Maschinenakustik hauptsächlich Messwerte im Vordergrund und zur Objektivierung von Geräuschen werden Größen wie Lautstärke, Schärfe oder Rauigkeit verwendet.

Der Klangcharakter von musikalischen Klängen unterscheidet sich deutlich von Maschinengeräuschen. Während sich Geräusche aus nichtperiodischen Anteilen und inharmonischen Teiltönen zusammensetzen, werden musikalische Töne und Klänge aus periodischen Anteilen aufgebaut. Dabei bestimmen Anzahl und Stärke der vorhandenen

[146] Vgl. Alt und Jochum. 2003, S. 48ff.

Teiltöne sowie die Verhältnisse zwischen deren Frequenzen den Klangcharakter. Harmonische Verhältnisse sind ganzzahlig, wie beispielsweise 1 : 2 : 3. Bei inharmonischen Verhältnissen treten dementsprechend andere Zahlen wie zum Beispiel 1 : 1,1 : 1,3 auf.

Die Unterschiede der spektralen Zusammensetzung von Tönen eines Musikinstruments (siehe Abbildung 6-1) und eines Verbrennungsmotorengeräusches (siehe Abbildung 6-2) sind nachstehend beispielhaft dargestellt.

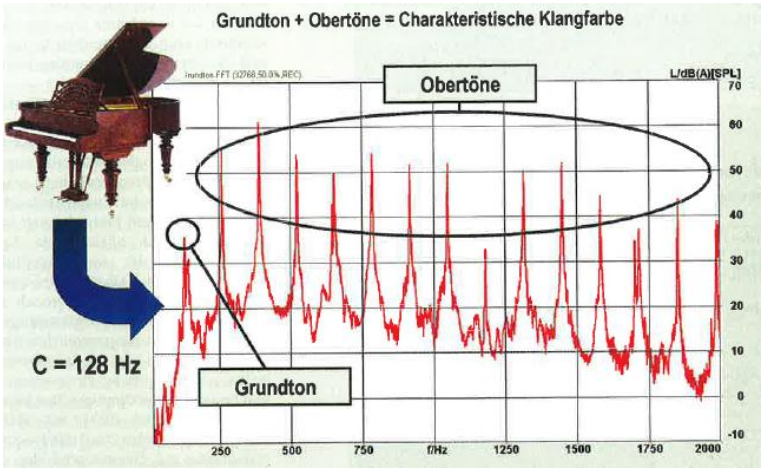


Abbildung 6-1: Spektraler Aufbau eines musikalischen Tons[147]

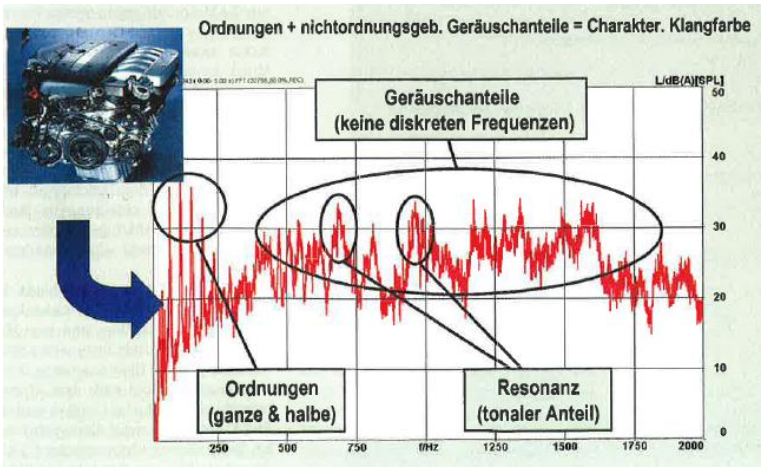


Abbildung 6-2: Spektraler Aufbau eines Motorengeräusches[148]

Während der musikalische Ton idealerweise aus dem Grundton (im obigen Beispiel mit einer Grundfrequenz von 128 Hz) und einer Reihe von Obertönen im gleichmäßigen Abstand, welche sich über den ganzen betrachteten Frequenzbereich erstrecken, besteht, sind ähnlich klare Verhältnisse beim Motorgeräusch nicht erkennbar. Der untere Frequenzbereich wird von ganz- und halbzahligen Motorordnungen geprägt, Obertöne sind dabei nur ansatzweise zu erkennen. Ein großer Teil des betrachteten Spektrums wird von Geräuschanteilen dominiert, tonale Anteile treten unter Umständen in Resonanzbereichen auf und besitzen keine Obertöne. Auf Grund des Fahrzeugübertragungsverhaltens vom Motor- in den Innenraum sind in der Fahrgastzelle die

[147] Vgl. ebd., S. 51.
[148] Quelle: ebd., S. 51.

niederfrequenten Anteile dominant. Daraus lässt sich entsprechend Abbildung 6-2 ableiten, dass harmonisches Sound-Design in erste Linie anhand der Motorordnungen möglich ist.

Der Höreindruck und das Empfinden von Wohlklang werden maßgeblich von den Frequenzverhältnissen bestimmt. Konsonante Intervalle sind wohlklingend, dissonante Intervalle dagegen klingen spannungsvoll. Abbildung 6-3 listet eine Reihe von Intervallen in Reihenfolge abnehmender Konsonanz auf.

Abbildung 6-3: Konsonante und dissonante Intervalle[149]

Prinzipiell ist der Höreindruck umso harmonischer, je einfacher das Verhältnis zweier Frequenzen angeschrieben werden kann. Diese Betrachtungen können von Intervallen auch auf Dreiklänge ausgedehnt werden. Dabei sind Dur- und Moll-Dreiklänge konsonant und bedürfen keiner Auflösung, während verminderte und übermäßige Dreiklänge dissonant sind und nach Auflösung streben. Tabelle 6-1 zeigt den Aufbau der vier genannten Dreiklangformen. Gemeinsam ist allen Dreiklängen, dass sie aus zwei übereinander geschichteten Terzen aufgebaut sind. Folgende Abkürzungen werden in dieser Tabelle und auch in den folgenden Abschnitten verwendet: „r“ für rein, „k“ für klein, „g“ für groß, „v“ für vermindert und „ü“ für übermäßig.

Tabelle 6-1: Dreiklangformen[150]

Dreiklangform	Erstes Intervall	Zweites Intervall	Rahmenintervall
Dur	große Terz (g3)	kleine Terz (k3)	reine Quinte (r5)
Moll	kleine Terz (k3)	große Terz (g3)	reine Quinte (r5)
übermäßig	große Terz (g3)	große Terz (g3)	überm. Quinte (ü5)
vermindert	kleine Terz (k3)	kleine Terz (k3)	verm. Quinte (r5)

Werden die Motorordnungen – ausgehend von der Zündordnung als Grundton halb- und ganzzahlige Ordnungen – herangezogen, so können in erster Linie Intervallabstände und in weiterer Folge auch Dreiklänge nachgebildet werden. Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 zeigen

[149] Quelle: ebd., S. 51.
[150] Quelle: Ziegenrücker. 1997, S. 132.

beispielhaft 3D-Spektren eines 4-Zylindermotors bzw. eines 6-Zylindermotors. Die eingetragenen Linien markieren ausgehend von der Zündordnung als Grundton konsonante und dissonante Motorordnungen.

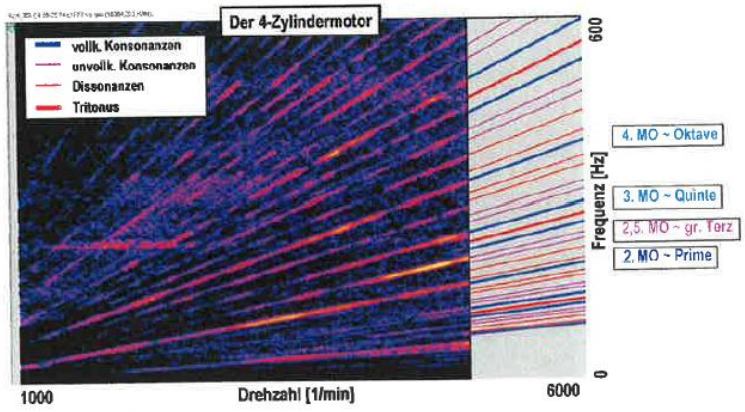


Abbildung 6-4: 3D-Spektrum eines 4-Zylindermotors[151]

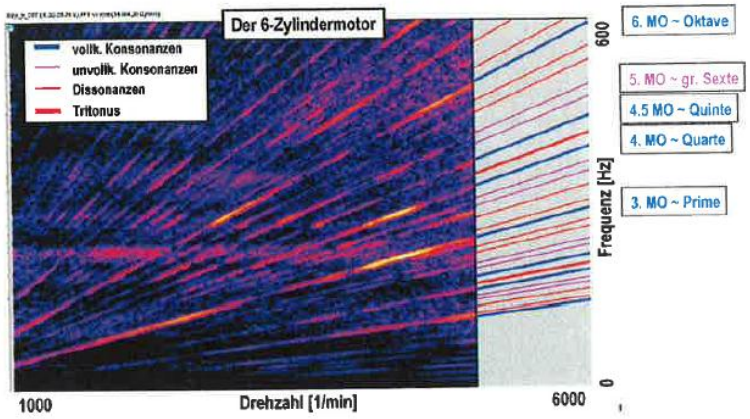


Abbildung 6-5: 3D-Spektrum eines 6-Zylindermotors[152]

Somit kann – zumindest theoretisch – durch die richtige Beeinflussung der Motorordnungen eine Verbesserung des Motorgeräusches (im Fahrzeuginneren) hinsichtlich eines harmonischen Charakters vorgenommen werden.

6.1.2. Potential für Motoren kleiner Zylinderzahlen

In diesem Abschnitt werden ausgehend von der jeweiligen Zündordnung als Grundton die Möglichkeiten zur Bildung von konsonanten Intervallfolgen bzw. zur Bildung von konsonanten Dreiklängen für Motoren unterschiedlicher Zylinderzahl analysiert. Dazu werden zunächst die Ordnungsmuster von Verbrennungsmotoren mit 2, 3 und 4 Zylindern anhand von Campbell-Diagrammen betrachtet und die möglichen harmonischen Zusammenhänge zusammengefasst. Als Referenz wird ein 6-Zylindermotor angeführt, da dieser nach den von Alt und Jochum

[151] Quelle: Alt und Jochum. 2003, S. 53.
[152] Quelle: ebd., S. 54.

(2003) erläuterten Aspekten der Harmonielehre als jener mit dem höchsten Wohlklang beschrieben wird.[153]

In Tabellen werden anhand der Ordnungsmusters der jeweiligen Zylinderzahlen die theoretisch vorhandenen (ganz- und halbzahligen) Ordnungen und die fehlenden Motorordnungen zur Bildung von konsonanten Intervallen zum Grundton aufgelistet. Ganze und halbe Ordnungszahlen sind grün markiert, alle anderen Ordnungszahlen rot.

6.1.2.1. 2-Zylindermotor

In Abbildung 6-6 ist das Ordnungsmuster eines 2-Zylindermotors dargestellt. Ausgehend von der 1,0. Motorordnung treten besonders ganzzahlige Vielfache davon (2,0., 3,0., 4,0., … Motorordnung) mit hohem Energiegehalt auf.

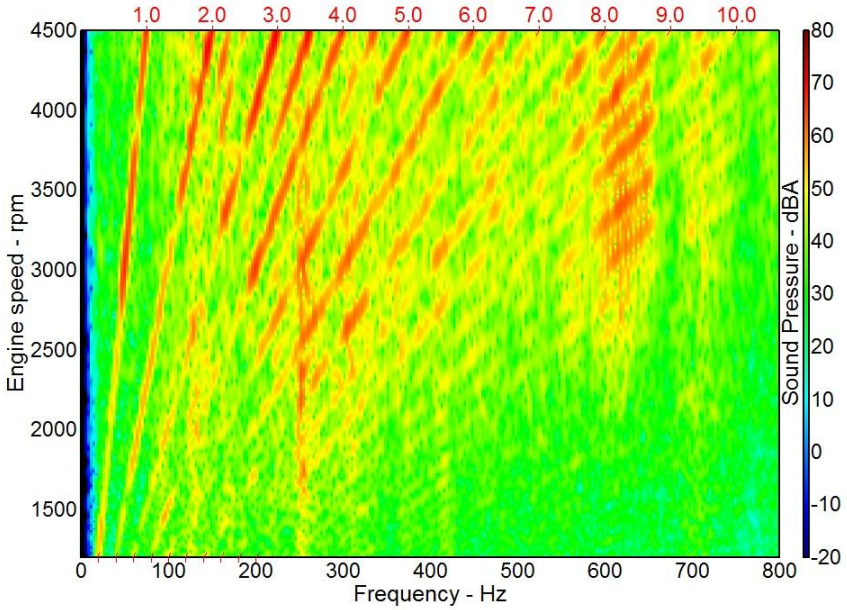


Abbildung 6-6: Campbell-Diagramm 2-Zylindermotor

Tabelle 6-2 zeigt den Zusammenhang zwischen konsonanten Intervallen und dem Ordnungsmuster eines 2-Zylindermotors.

Tabelle 6-2: Konsonante Intervalle beim 2-Zylindermotor

Intervall	r1	r8	r5	r4	g6	g3	k3	k6
Ordnungszahl	1,0	2,0	1,5					

In der Tabelle ist zu erkennen, dass beim 2-Zylindermotor in erster Linie vollkommen konsonante Intervalle auftreten. Durch das Fehlen der großen Terz kann zwar kein Dur-Dreiklang aufgebaut werden, jedoch ist dies in der zweiten Oktave mit der 2,0. Ordnung als Grundton möglich, wobei dann die 2,5. Ordnung zur großen Terz wird. Dabei würde auch die 1,0. Ordnung lediglich als nach unten oktavierter Grundton existieren und das harmonische

[153] Vgl. ebd., S. 55.

Gefüge nicht stören, aber einen unausgewogenen und tieffrequenten Gesamteindruck erzeugen. Werden nur die grün markierten Ordnungen in Betracht gezogen, stellt sich ebenfalls ein harmonischer Klang ein, da mit reiner Quinte und Oktave nur konsonante Intervalle existieren.

6.1.2.2. 3-Zylindermotor

In Abbildung 6-7 ist das Ordnungsmuster eines 3-Zylindermotors dargestellt. Ausgehend von der 1,5. Motorordnung treten besonders ganzzahlige Vielfache davon (3,0., 4,5., 6,0., … Motorordnung) mit hohem Energiegehalt auf.

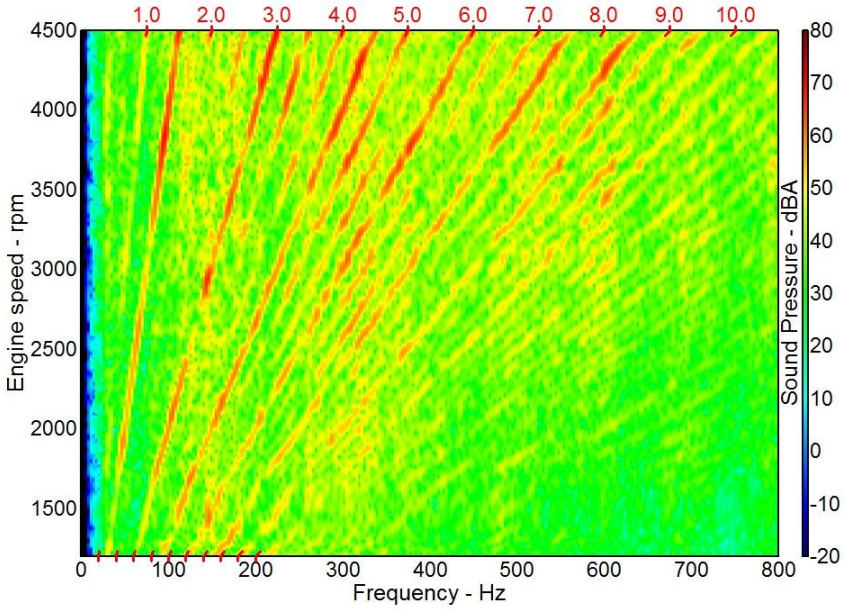


Abbildung 6-7: Campbell-Diagramm 3-Zylindermotor

Tabelle 6-3 zeigt den Zusammenhang zwischen konsonanten Intervallen und dem Ordnungsmuster eines 3-Zylindermotors.

Tabelle 6-3: Konsonante Intervalle beim 3-Zylindermotor

Intervall	r1	r8	r5	r4	g6	g3	k3	k6
Ordnungszahl	1,5	3,0		2,0	2,5			

Beim 3-Zylindermotor existieren ebenfalls in erster Linie vollkommen konsonante Intervalle. Zur Bildung eines Dur-Dreiklangs in Grundstellung fehlt die reine Quinte, jedoch kann durch Verwendung von reiner Prime, reiner Quarte und großer Sexte eine zweite Umkehrung des Dur-Dreiklangs – ein sogenannter Quart-Sext-Akkord – aufgebaut werden. Dieser klingt zwar nicht ganz so ruhig wie in Grundstellung, ist aber ebenfalls vollkommen konsonant. Auch das Hinzuziehen der 3,0. Ordnung als Oktave würde dieses Gefüge nicht stören.

6.1.2.3. 4-Zylindermotor

In Abbildung 6-8 ist das Ordnungsmuster eines 4-Zylindermotors dargestellt. Ausgehend von der 2,0. Motorordnung treten besonders ganzzahlige Vielfache davon (4,0., 6,0., 8,0., … Motorordnung) mit hohem Energiegehalt auf.

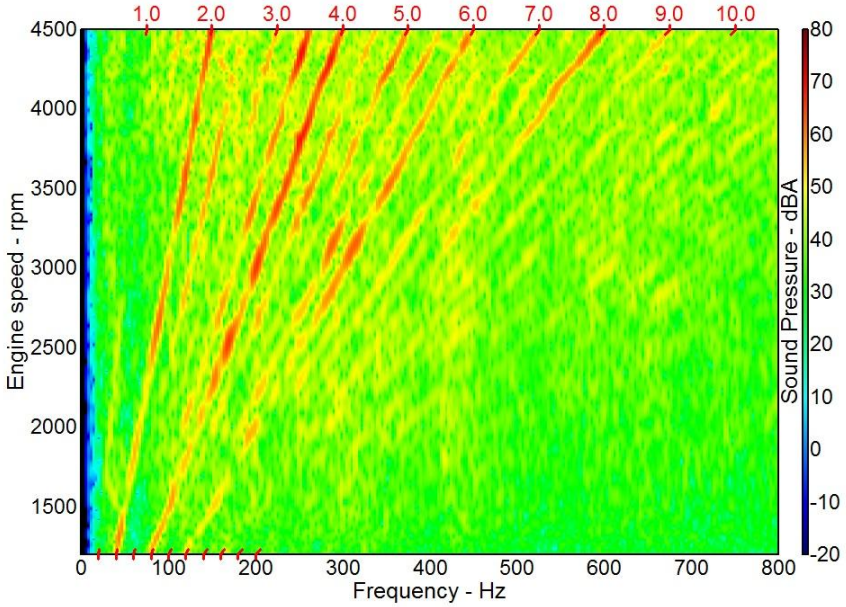


Abbildung 6-8: Campbell-Diagramm 4-Zylindermotor

Tabelle 6-4 zeigt den Zusammenhang zwischen konsonanten Intervallen und dem Ordnungsmuster eines 4-Zylindermotors.

Tabelle 6-4: Konsonante Intervalle beim 4-Zylindermotor

Intervall	r1	r8	r5	r4	g6	g3	k3	k6
Ordnungszahl	2,0	4,0	3,0			2,5		

Für den 4-Zylindermotor herrscht eine hohe Übereinstimmung zwischen den vollkommen konsonanten Intervallen und den Motorordnungen. Werden die grün markierten Motorordnungen betrachtet, so lässt sich damit ein Dur-Dreiklang in Grundstellung aufbauen.

6.1.2.4. 6-Zylindermotor

In Abbildung 6-9 ist das Ordnungsmuster eines 6-Zylindermotors dargestellt. Ausgehend von der 3,0. Motorordnung treten besonders ganzzahlige Vielfache davon (6,0., 9,0., … Motorordnung) mit hohem Energiegehalt auf.

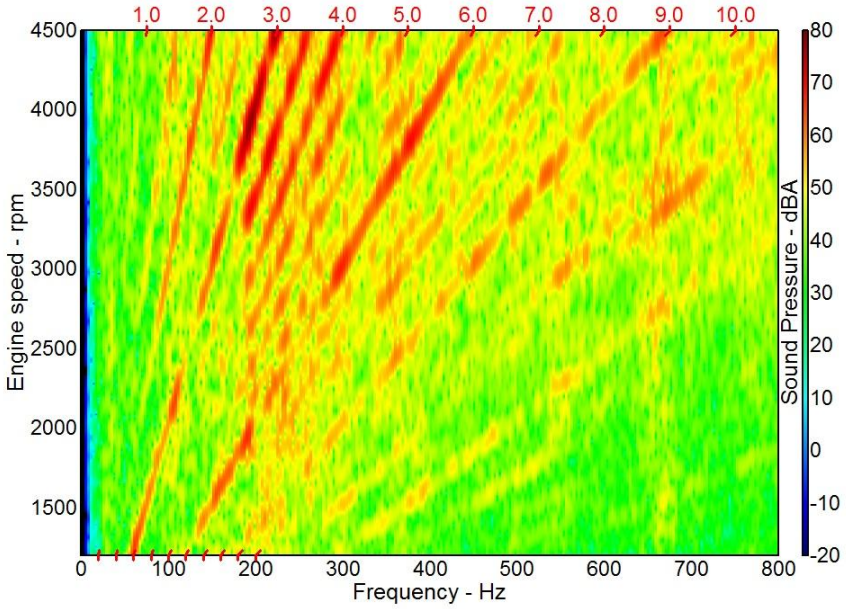


Abbildung 6-9: Campbell-Diagramm 6-Zylindermotor

Tabelle 6-5 zeigt den Zusammenhang zwischen konsonanten Intervallen und dem Ordnungsmuster eines 6-Zylindermotors.

Tabelle 6-5: Konsonante Intervalle beim 6-Zylindermotor

Intervall	r1	r8	r5	r4	g6	g3	k3	k6
Ordnungszahl	3,0	6,0	4,5	4,0	5,0			

Bei 6-Zylindermotor existiert eine hohe Übereinstimmung zwischen den vollkommen konsonanten Intervallen und den Motorordnungen. Sowohl reine Quarte, reine Quinte als auch Oktave treffen genau auf Motorordnungen. Dazu kommt noch eine große Sexte, lediglich die große Terz fällt in der ersten Oktave nicht auf eine Motorordnung (in der zweiten Oktave aber als 7,5. Ordnung vorhanden). Wiederum ließe sich wie beim 3-Zylindermotor ein Dur-Dreiklang in der zweiten Umkehrung mit der ersten Motorordnung als Basston aufbauen. Aber auch mit den Ordnungen 3,0 und 4,5 kann ein vollkommen konsonanter Klang erzeugt werden. Treten aber die 4,0. und die 4,5. Motorordnung gleichzeitig mit hohem Energiegehalt auf, so ergibt sich wiederum ein dissonanter Klang, da dazwischen ein Ganztonintervall (g2) liegt.

6.1.3. Probleme

Wird nun zum Beispiel ein 4-Zylindermotor betrachtet (siehe Abschnitt 6.1.2.3), so gibt es eine hohe Übereinstimmung zwischen vollkommen konsonanten Intervallen und den Motorordnungen. Jedoch ist auch die Stärke der einzelnen Motorordnungen für einen harmonischen Klangcharakter verantwortlich.[154] Bei 4-Zylindermotoren ohne Ausgleichswellen (was meist der Fall ist) ist die 2. Motorordnung meist deutlich stärker ausgeprägt als höhere Motorordnungen. Dies ändert zwar an den harmonischen Zusammenhängen nichts, jedoch

[154] Vgl. ebd., S. 54.

ergibt sich ein stark vom Grundton dominiertes Klangbild, das dementsprechend unausgewogen ist. Um diese Unausgewogenheit zu verhindern, sollten die einzelnen Töne (also die Motorordnungen) ungefähr gleich stark ausgeprägt sein.

Theoretisch ist ein Anheben und Absenken von Motorordnungen zum Herstellen der gewünschten harmonischen Verhältnisse – also zur Klangkultivierung – möglich, praktisch ergeben sich dabei aber einige Probleme. Während ein Anheben durch verschiedene Veränderungen des Fahrzeugübertragungsverhaltens oder durch Modifikationen des Mündungsgeräuschs sowie durch aktives Zuspielen der entsprechenden Ordnungen noch einfacher realisierbar ist, ist ein Absenken nur sehr schwer umsetzbar.[155]

Ein Unterdrücken der entsprechenden Motorordnungen durch aktive Geräuschunterdrückungssysteme (ANC) ist sehr aufwendig. Sämtliche Bedingungen zur Geräuschunterdrückung müssten an allen Punkten des Fahrzeuginnenraums erfüllt sein[156], um an allen Plätzen dieselben akustischen Voraussetzungen zu schaffen. Ebenso ist eine Reduzierung oder gar Unterdrückung von Motorordnungen durch bauliche Maßnahmen am Motor oder an dessen Anbauteilen praktisch schwer umsetzbar, da dies mit einem großen Mehraufwand und somit sehr hohen Kosten verbunden wäre. Aber auch ein Anheben von Motorordnungen ist nicht unproblematisch, da damit eine umgehende Erhöhung der Lautheit einhergeht, welche die NutzerInnen wiederum als negativ bewerten würden.[157]

6.1.4. Untersuchungen der Datenbasis

Die Methoden zur harmonischen Analyse werden auf die Fahrzeuge aus der Datenbasis angewandt. Eine Beschreibung der Vorgehensweise sowie eine Zusammenstellung einiger Ergebnisse sind nachstehend angeführt. Die beschriebenen Möglichkeiten zum Sound-Design bei Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen werden in diesem Zusammenhang nicht praktisch umgesetzt. Es wird lediglich eine Analyse der bestehenden Verhältnisse durchgeführt und nach Möglichkeiten zur Unterscheidung der Motoren unterschiedlicher Zylinderzahlen gesucht.

6.1.4.1. Vorgehensweise

Anhand der Audiofiles der Datenbasis werden mittels eines Vold-Kalman-Filters[158,159] die Motorordnungen extrahiert. Die Einhüllenden der Motorordnungen werden geglättet und deren Amplitudenverläufe dargestellt, wobei die Betrachtung mit einer A-Bewertung erfolgt. Somit stehen die Amplitudenverläufe der Motorordnungen für die weitere Verarbeitung und grafische Darstellung zur Verfügung und werden für die folgenden Auswertungen verwendet. Beispielhaft sind in Abbildung 6-10 die Einhüllenden-Amplituden der Motorordnungen von 0,5 bis 12 grafisch dargestellt. Die Darstellung der Amplitudenwerte erfolgt logarithmisch. Im oberen

[155] Vgl. ebd., S. 64.
[156] Vgl. Müller. 2004, S. 401.
[157] Vgl. Biermayer. 2013, S. 4.
[158] Vgl. Feldbauer und Holdrich. 2000, S. 1.
[159] Vgl. Herlufsen, et al. 2000, S. 1.

Drehzahlbereich sind die Erhöhungen einzelner Motorordnungen auf Grund von Resonanzen erkennbar.

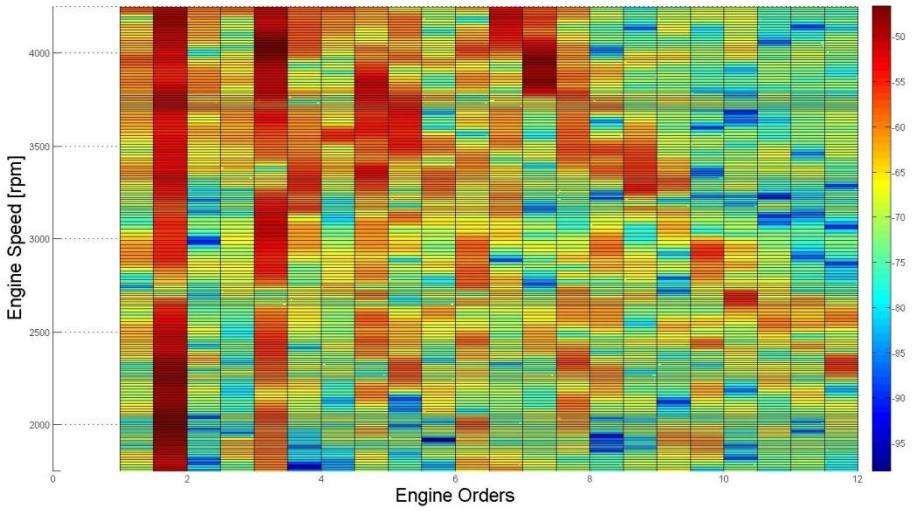


Abbildung 6-10: Ordnungsplot

Die Betrachtung der Motorordnungen erfolgt für die gesamte Datenbasis bis zur einschließlich 12. Ordnung. Darüber ist im A-bewerteten Spektrum die Erhöhung der deterministischen Komponenten gegenüber dem Hintergrundgeräusch kaum mehr feststellbar, wie das Campbell-Diagramm in Abbildung 6-11 beispielhaft zeigt, und somit ist der Energiegehalt in höher liegenden Motorordnungen bereits sehr gering.

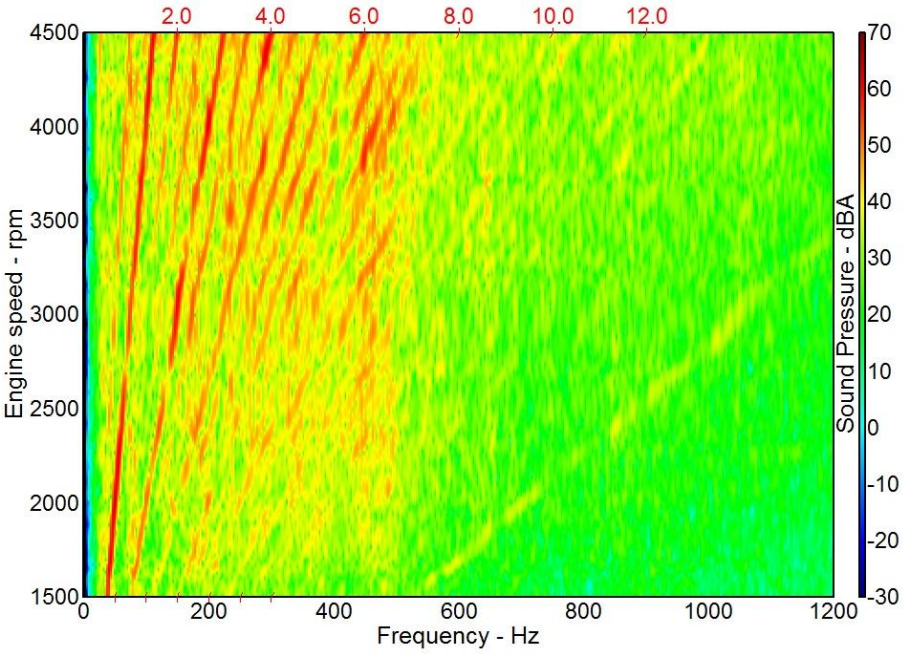


Abbildung 6-11: Ausprägung von deterministischen Komponenten

Der betrachtete Drehzahlbereich von 1750 bis 4250 rpm wird in fünf gemittelte Stufen (+/- 250 rpm) bei 2000, 2500, 3000, 3500 und 4500 rpm unterteilt. Durch diese Darstellungsweise ist ein Vergleich zu den Ergebnisse aus Abschnitt 4 möglich.

6.1.4.2. Konsonante und dissonante Motorordnungen

Zur Darstellung von konsonanten und dissonanten Intervallen wird für alle Fahrzeuggruppen die Zündordnung als Grundfrequenz interpretiert und es werden alle darüber liegenden Motorordnungen mit Schrittweiten von 0,5 bis zur einschließlich 12. MO betrachtet. Als konsonante Motorordnungen werden alle ganzzahligen Vielfachen der Zündordnung angesehen, da diese die Teiltonstruktur des Klangs bilden. Dazwischenliegende Ordnungen werden durch Bildung der Frequenzverhältnisse analog zu Abbildung 6-3 analysiert und als konsonante und dissonante Motorordnungen interpretiert. Motorordnungen unterhalb des Grundtons (Zündordnung) werden im Zuge dieser Analyse vorerst nicht betrachtet. Folgende konsonante und dissonante Motorordnungen ergeben sich für die Gruppen mit 2 bis 4 Zylindern (siehe Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Konsonante und dissonante Motorordnungen

2 Zyl.	konsonante MO	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
	dissonante MO	3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5, 11.5
3 Zyl.	konsonante MO	1.5, 2, 2.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12
	dissonante MO	3.5, 4, 5.5, 6.5, 7, 8, 8.5, 9.5, 10, 11, 11.5
4 Zyl.	konsonante MO	2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12
	dissonante MO	3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7, 7.5, 8.5, 9, 9.5, 10.5, 11, 11.5

6.1.4.3. Darstellung der Ergebnisse

Die Berechnung des Anteils konsonanter Motorordnungen erfolgt nach untenstehender Gleichung (Gl. 6.1). Die konsonanten Motorordnungen werden je nach Zylinderzahl anhand der obigen Tabelle ausgewählt. Bei der Berechnung des dissonanten Anteils wird analog vorgegangen (Gl. 6.2).

$$Konsonanter\ Anteil = \frac{\sum_n MO_{kons.}}{\sum_n MO_{kons.} + \sum_k MO_{diss.}} \qquad \text{(Gl. 6.1)}$$

$$Dissonanter\ Anteil = \frac{\sum_n MO_{dis.}}{\sum_n MO_{kons.} + \sum_k MO_{diss.}} \qquad \text{(Gl. 6.2)}$$

Eine Darstellung des Verhältnisses von konsonantem zu dissonanten Ordnungen zeigen die Boxplots in Abbildung 6-12 für die fünf Fahrzeuggruppen an den fünf gemittelten Drehzahlstufen.

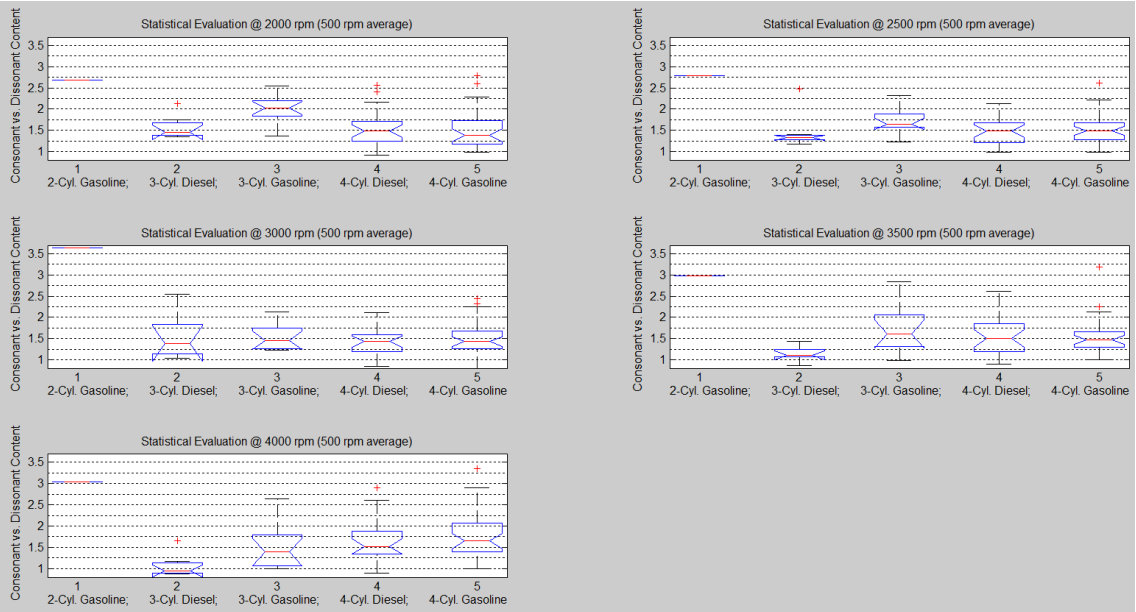


Abbildung 6-12: Konsonanter vs. dissonanter Ordnungsgehalt

Werden die Datenlagen der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen in obiger Abbildung betrachtet, so ist anhand der Konfidenzintervalle bereits erkennbar, dass die Unterscheidbarkeit von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen nicht gegeben ist, was auch durch die ANOVA (bei 2 % Irrtumswahrscheinlichkeit) bestätigt wird. Das 2-Zylinderfahrzeug zeigt über alle Drehzahlen den höchsten Anteil konsonanter Motorordnungen.

Anhand der Boxplots ist auch erkennbar, dass das Verhältnis der Amplituden-Einhüllenden von konsonanten zu dissonanten Motorordnungen für die 4-Zylindergruppen im Mittel im gesamten Drehzahlbereich relativ konstant bleibt, während sich bei den 3-Zylindergruppen stärkere Veränderungen ergeben. Um die Lagen der einzelnen Fahrzeuge besser darzustellen, werden Scatterplots verwendet, welche die Amplituden der Einhüllenden von konsonanten (Abszisse) und von dissonanten (Ordinate) Motorordnungen jeweils normiert auf die Summe der Einhüllenden-Amplituden aller Motorordnungen gegenüberstellen. Beispielhaft wird in Abbildung 6-13 ein Scatterplot bei 3000 rpm dargestellt. Die Kombination aus Zahl und Buchstabe in der Legende steht jeweils für Zylinderzahl und Brennverfahren (z.B. 3g für 3-Cylinder Gasoline – also Ottomotor).

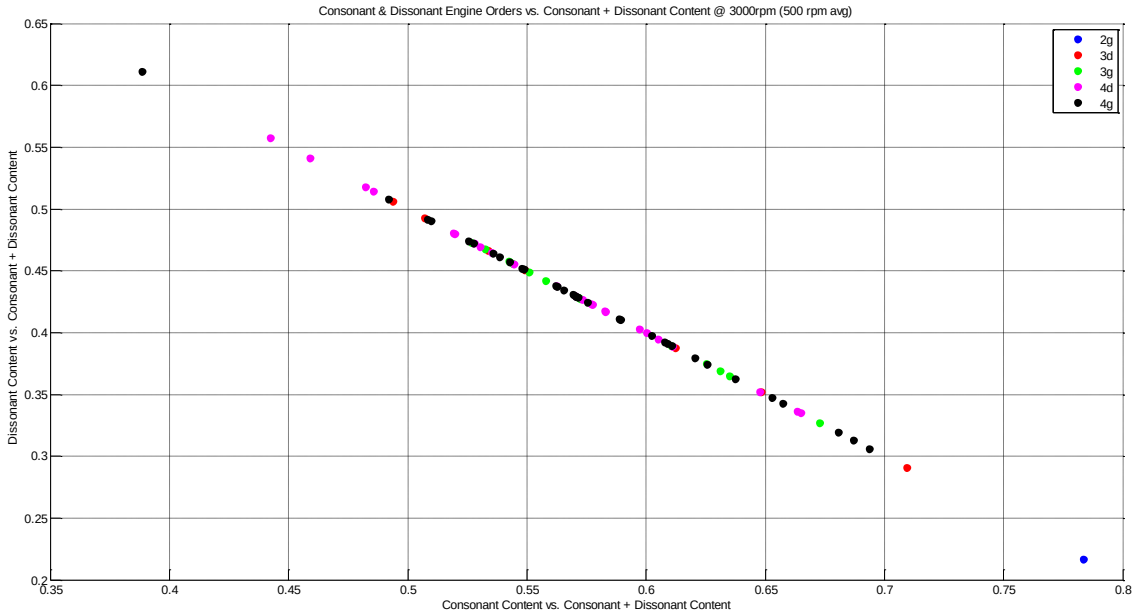


Abbildung 6-13: Konsonante vs. dissonante Anteile @ 3000 rpm

Anhand der Verteilung der Datenpunkte sind keine Gruppierungen für die Fahrzeuge gleicher Zylinderzahl erkennbar.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurden ausschließlich Motorordnungen ab der Zündordnung berücksichtigt. Im Geräuschspektrum sind jedoch auch Motorordnungen unterhalb der 1. Hauptordnung vorhanden, welche ebenfalls in die Bewertungen einbezogen werden können. Wiederum erfolgt eine Analyse der konsonanten und dissonanten Motorordnungen. Dabei bleiben alle bisherigen Einordnungen wie in Tabelle 6-6 weiterhin gültig. Je nach Zylinderzahl werden die entsprechenden Teiltöne unterhalb des Grundtons hinzugefügt. Aus den Verhältnissen der Ordnungszahlen ergeben sich für sämtliche Motorordnungen unterhalb der Zündordnung bei allen Zylinderzahlen konsonante Intervalle.

Zur Darstellung der Verhältnisse zwischen konsonanten und dissonanten Motorordnungen werden die Boxplots in Abbildung 6-14 verwendet.

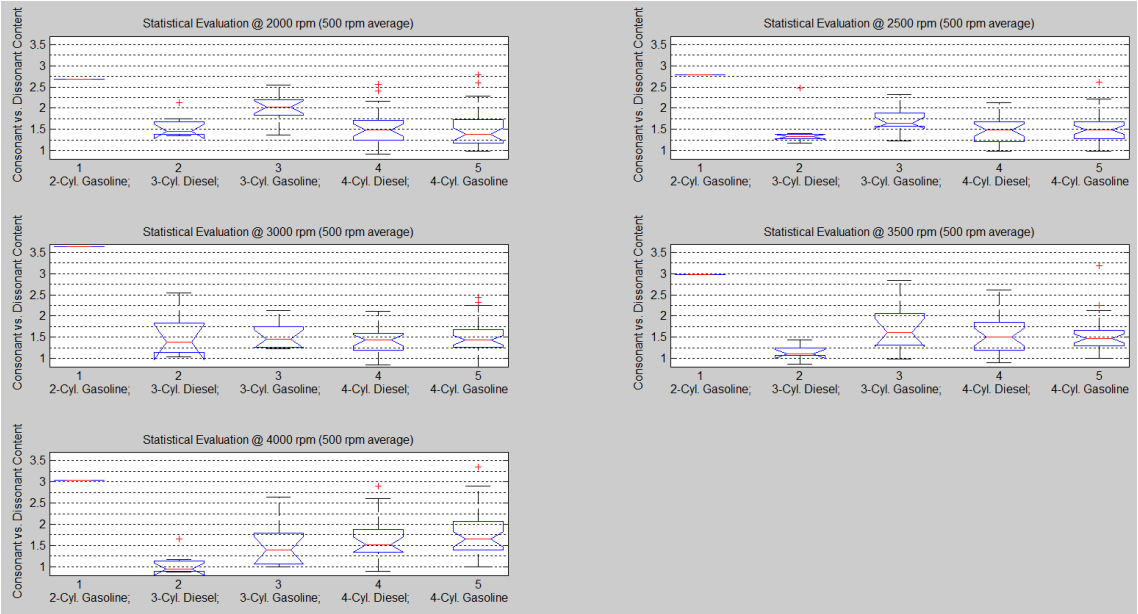


Abbildung 6-14: Kons. vs. diss. Ordnungsgehalt inkl. MO unterhalb der 1. HO

Der Vollständigkeit halber und zur besseren Vergleichbarkeit mit den obigen Ergebnissen wird in Abbildung 6-15 ebenfalls ein Scatterplot bei 3000 rpm dargestellt.

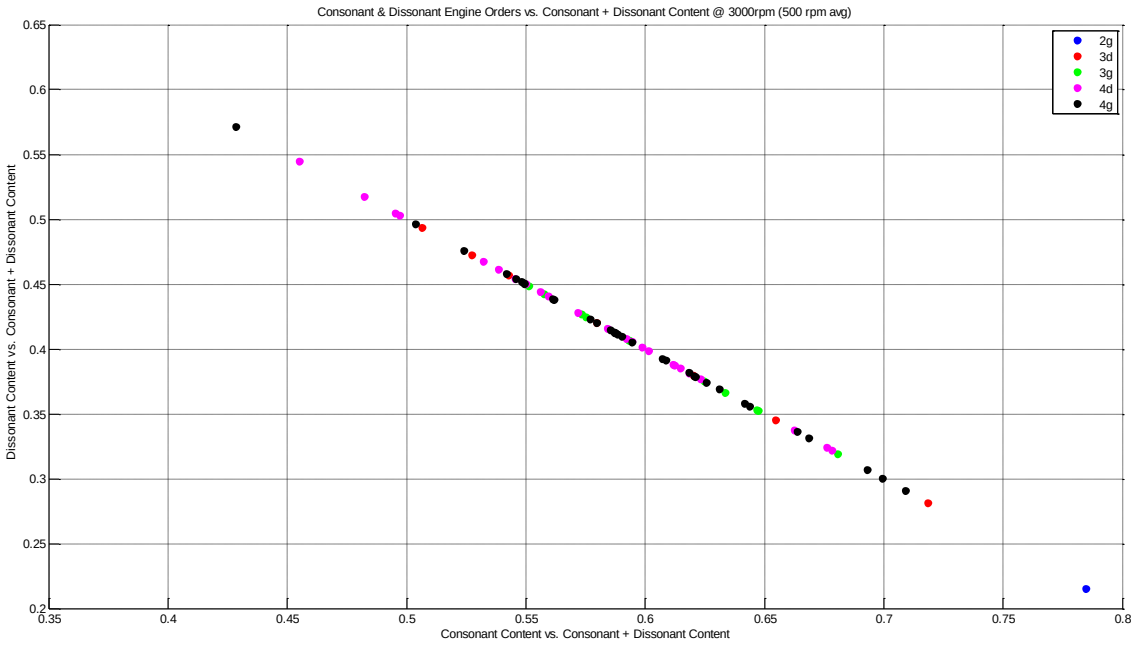


Abbildung 6-15: Kons. vs. diss. Anteile inkl. MO unterhalb der 1. HO @ 3000 rpm

Auch bei der Miteinbeziehung von Motorordnungen unterhalb der Zündordnung in die Analyse ergeben sich keine wesentlichen Änderungen. Anhand der durchgeführten Auswertungen können somit keine konkreten Aussagen über die Konsonanz oder Dissonanz von Motorgeräuschen unterschiedlicher Zylinderzahl getroffen werden.

6.1.5. Schlussfolgerung

Eine Darstellung der Klangunterschiede zwischen den Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen anhand der Analyse der Amplituden der Einhüllenden von konsonanten und dissonanten Motorordnungen ist nicht möglich. Es kommt über den gesamten Drehzahlbereich zu keinen erkennbaren Gruppierungen von Fahrzeugen gleicher Zylinderzahl. Auch wenn eine Erweiterung der Analyse zu Motorordnungen unterhalb der Zündordnung erfolgt, kann keine Unterscheidung nach Zylinderzahlen erfolgen. Eine Bewertung der Motorgeräusche unterschiedlicher Zylinderzahlen bezüglich deren Konsonanz oder Dissonanz ist anhand dieser Ergebnisse somit nicht zielführend.

6.1.6. Kritische Betrachtung

Im Gegensatz zum Klang eines Musikinstruments, das einen hohen Energieanteil in den Teiltönen und damit in rein deterministischen Komponenten enthält, sind Motorenklänge stark geräuschhaft. Das heißt, dass auch zwischen den Hauptordnungen, welche als Teiltöne betrachtet werden können, die Nebenordnungen stark ausgeprägt sein können. Aussagen über feste harmonische Zusammenhänge sind daher schwierig zu treffen, da die zugehörigen Theorien aus der Musikalischen Akustik auf der Analyse von Instrumentenklängen beruhen.

Zusätzlich ist bei Motorgeräuschen eine ständige Veränderung der spektralen Zusammensetzung über den betrachteten Drehzahlbereich zu erkennen und die Energieverhältnisse bleiben folglich nur über sehr kurze Zeiträume konstant.[160] Es ist daher schwierig, bestimmte Schlussfolgerungen über einen größeren Drehzahlbereich zu machen. So gehen beispielsweise Resonanzen stark ein und können unter Umständen bestimmte Ordnungen in einem Drehzahlbereich betonen, die über den Rest des betrachteten Bereichs nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Idee eines Sound-Designs anhand der Motorordnungen ist aber durchaus interessant, da sich damit eine Möglichkeit bieten könnte, Motorenklänge harmonischer zu gestalten und somit für einen höheren akustischen Komfort zu sorgen. Eine technische Lösung der in Abschnitt 6.1.3 genannten Probleme ist allerdings die Grundvoraussetzung für die praktische Umsetzbarkeit entsprechender Systeme mit hoher Qualität.

6.2. Klangfarbenbeschreibung

6.2.1. Grundlagen

Basierend auf den Theorien von Hermann von Helmholtz (aus dem Jahr 1863)[161] ist die Beschreibung von Klangfarben anhand des Spektrums eines Signals möglich. Dazu werden die Stärken der Teiltöne und deren Verhältnisse zueinander analysiert. Helmholtz definierte

[160] Vgl. Resch und Mast. 2006, S. 141.
[161] Vgl. Höldrich. 2008, S. 1.

verschiedene Klangfarbengruppen, welche sich je nach Dominanz bestimmter Teiltöne ergeben. Diese Klangfarbengruppen werden in Tabelle 6-7 dargestellt.

Tabelle 6-7: Klangfarbenbeschreibung[162]

Klangbeschreibung	Teiltonanalyse
Voll	Dominanz des Grundton & Teiltöne bis zum 8. Teilton
Leer	Dominanz der hohen und höchsten Teiltöne gegenüber den tiefen Teiltönen
Hart, scharf, rau	Dominanz des Grundtons und zugleich starkes Hervortreten von Teiltönen ab dem 6. Teilton
Weich	Dominanz von nur wenigen Teiltönen im tiefen Frequenzbereich des Klangspektrums
Hohl, gedeckt	Dominanz der ungeradzahligen Teiltöne
Offen, hell	Dominanz der geradzahligen Teiltöne

Zwar dienen diese Klangfarbendefinitionen ursprünglich zur Beschreibung der Klänge von Musikinstrumenten, jedoch können sie in der Fahrzeugakustik angewandt werden, wenn die Motorordnungen als Teiltöne betrachtet werden (vgl. Abschnitt 6.1.1). Wiederum wird die Zündordnung als Grundton angenommen und ganzzahlige Vielfache davon werden dementsprechend als höhere Teiltöne interpretiert. Anhand der Beispiele aus der Datenbasis wird untersucht, ob sich Klangfarbenunterschiede für die Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen ergeben und ob in weiterer Folge mittels der Klangfarbenbeschreibungen eine Charakterisierung der Fahrzeuggruppen möglich ist.

6.2.2. Untersuchungen der Datenbasis

Ähnlich zu den vorgestellten Methoden zur harmonischen Analyse in Abschnitt 6.1 werden Analysen der A-bewerteten Spektren der Fahrzeuge aus der Datenbasis durchgeführt. Die Stärken einzelner Motorordnungen werden betrachtet und Zusammenhänge mit den Klangfarbenbeschreibungen aus Tabelle 6-7 hergestellt. Zur Darstellung der Amplitudenverhältnisse der Teiltöne werden die Hauptordnungen entsprechend der jeweiligen Zylinderzahl berücksichtigt.

Aus den sechs Klangfarbenbeschreibungen werden drei Gegensatzpaare[163] gebildet. Dies sind „voll – leer“, „hart, scharf, rau – weich“ und „hohl, gedeckt – offen, hell“. Anhand dieser Paare und der dazugehörigen Teiltonzusammensetzungen werden die Innengeräuschaufnahmen der Fahrzeuge der Datenbasis analysiert.

[162] Quelle: Frank. 2011, S. 102.
[163] Vgl. Martner, et al. 2000., S. 682

6.2.2.1. Klangfarbenbeschreibung „voll – leer“

Nach der Helmholtz-Definition dominieren bei einem vollen Klang der Grundton und nachfolgende niedrige Teiltöne. Beim leeren Klang hingegen dominieren hohe und höchste Teiltöne gegenüber den niedrigen Teiltönen. Es wird der selbe Ordnungs- und Frequenzbereich wie in Abschnitt 6.1.4.1 betrachtet. Die Verhältnisse zwischen niedrigen und hohen Teiltönen werden so definiert, dass die untere Hälfte der Motorordnung (bis zur einschließlich 6. MO) als niedrige Teiltöne und dementsprechend die obere Hälfte (bis zur einschließlich 12. MO) als hohe Teiltöne interpretiert wird. Tabelle 6-8 stellt die niedrigen und hohen Motorordnungen für die Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahl dar.

Tabelle 6-8: Niedrige und hohe Motorordnungen

2 Zylinder	niedrige MO	1, 2, 3, 4, 5, 6
	hohe MO	7, 8, 9, 10, 11, 12
3 Zylinder	niedrige MO	1.5, 3, 4.5, 6
	hohe MO	7.5, 9, 10.5, 12
4 Zylinder	niedrige MO	2, 4, 6
	hohe MO	8, 10, 12

Niedrige und hohe Motorordnungen werden entsprechend (Gl. 6.3) ins Verhältnis gesetzt.

$$\frac{Niedrige\ MO}{Hohe\ MO} \qquad \text{(Gl. 6.3)}$$

Es ergeben sich für die Fahrzeuggruppen die in Abbildung 6-16 dargestellten Ergebnisse.

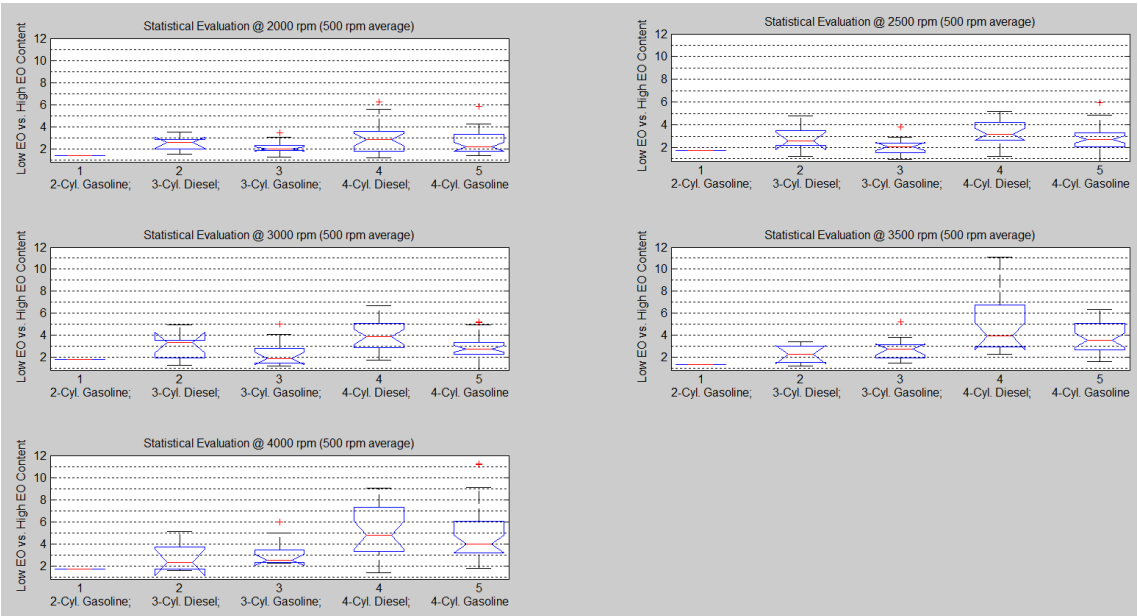


Abbildung 6-16: Niedrige zu hohen Motorordnungen

Aus den Ergebnissen der Boxplots ist eine leichte Gruppierung entsprechend der Zylinderzahlen erkennbar. Dies trifft speziell bei den beiden höchsten Drehzahlen zu. Es ergibt sich der kleinste Anteil niedriger Motorordnungen beim 2-Zylinderfahrzeug, danach folgen die 3-Zylinderfahrzeuge und die 4-Zylinderfahrzeuge mit dem größten Anteil der niedrigen im Verhältnis zu den hohen Motorordnungen. Die Fülle des Klangs nimmt somit mit steigender Zylinderzahl zu und Fahrzeuge mit 4-Zylindermotoren klingen demzufolge voller als jene mit 3 (bzw. 2) Zylindern. Im unteren Drehzahlbereich ist dieser Trend weniger deutlich ausgeprägt, sodass dort von keinen Gesetzmäßigkeiten gesprochen werden kann. Eine Untersuchung der Unterscheidbarkeit der Gruppen verschiedener Zylinderzahlen wird mittels ANOVA durchgeführt. Im Bereich von 2000 bis 3000 rpm ist lediglich das 2-Zylinderfahrzeug von den 4-Zylindergruppen unterscheidbar. Eine Unterscheidung von 3- und 4-Zylindergruppen ist bei 3500 und 4000 rpm möglich. Dies liegt daran, dass die Werte der 4-Zylinderfahrzeuge über der Drehzahl ansteigen, während diese für 3-Zylinderfahrzeuge (und für das 2-Zylinderfahrzeug) annähernd konstant bleiben.

Zusammengefasst bedeutet das, dass der Innengeräuschcharakter mit steigender Zylinderzahl im Allgemeinen voller wird und sich die Unterschiede zwischen den Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen bei höheren Drehzahlen deutlicher ausprägen als bei niedrigen.

6.2.2.2. Klangfarbenbeschreibung „hohl, gedeckt – offen, hell“

Die Dominanz von geradzahligen oder ungeradzahligen Teiltönen ist nach Helmholtz entscheidend dafür, ob ein Klang als offen und hell oder als hohl und gedeckt empfunden wird. Zur Untersuchung der Fahrzeugklänge bezüglich dieser Klangfarben wird eine Verhältnisbildung zwischen geradzahligen und ungeradzahligen Motorhauptordnungen durchgeführt. Eine diesbezügliche Einteilung der Motorordnungen für 2-, 3- und 4-Zylindermotoren erfolgt in Tabelle 6-9.

Tabelle 6-9: Geradzahlige und ungerzahlige Motorordnungen

2 Zylinder	geradzahlige MO	2, 4, 6, 8, 10 ,12
	ungeradzahlige MO	1, 3, 5, 7, 9, 11
3 Zylinder	geradzahlige MO	3, 6, 9, 12
	ungeradzahlige MO	1.5, 4.5, 7.5, 10.5
4 Zylinder	geradzahlige MO	4, 8, 12
	ungeradzahlige MO	2, 6, 10

Das Verhältnis der Einhüllenden-Amplituden von geradzahligen zu ungeradzahligen Teiltönen wird anhand von (Gl. 6.4) berechnet.

$$\frac{Geradzahlige\ MO}{Ungeradzahlige\ MO} \qquad \text{(Gl. 6.4)}$$

Eine Darstellung für die Fahrzeuge der Datenbasis erfolgt anhand der Boxplots in Abbildung 6-17.

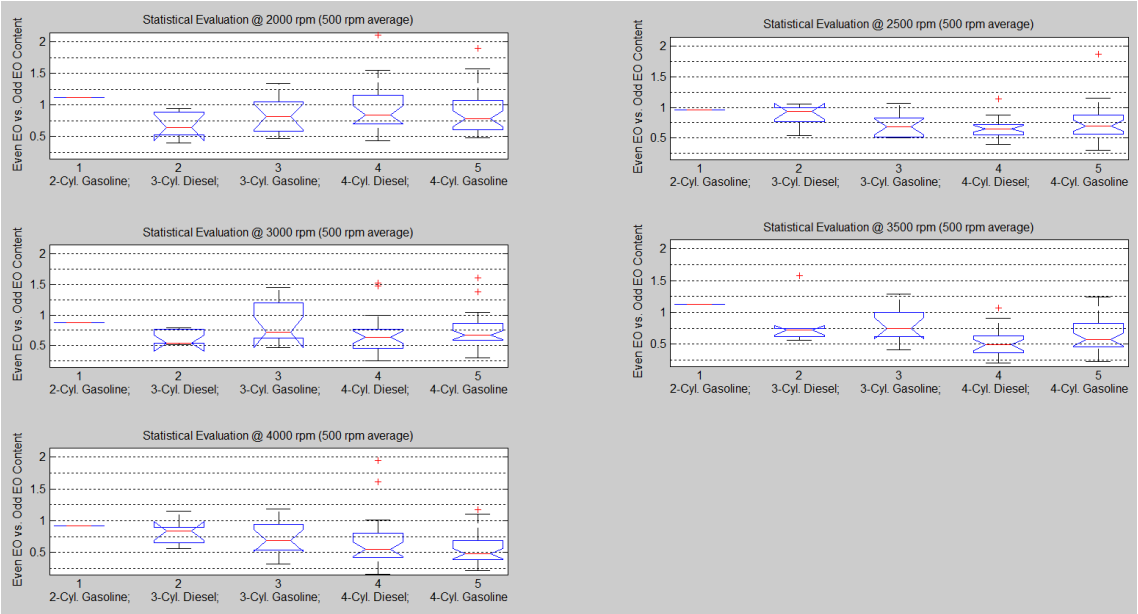


Abbildung 6-17: Geradzahlige zu ungeradzahligen Motorordnungen

Wird der gesamte Drehzahlbereich betrachtet, so zeigt sich, dass anhand der Verhältnisse zwischen geradzahligen und ungeradzahligen Teiltönen keine Charakterisierung des Klangs entsprechend der Zylinderzahlen möglich ist. Es kommt bei allen Drehzahlen zu deutlichen Überschneidungen der Konfidenzintervalle, sodass eine Unterscheidbarkeit der Gruppen ausgeschlossen werden kann. Die Lage der Daten lässt keine Gesetzmäßigkeiten erkennen, da auch die Reihungen der Gruppen über den betrachteten Drehzahlbereich unterschiedlich sind. Das heißt, dass eine Klangbeschreibung mit den Attributen „hohl“ bzw. „offen“ zu keiner Unterscheidbarkeit von 2-, 3- und 4-Zylinderfahrzeugen führt.

6.2.2.3. Klangfarbenbeschreibung „hart, scharf, rau – weich“

Als letztes Gegensatzpaar von Klangfarben nach Helmholtz werden die Motorenklänge anhand der Beschreibungen mit hart bzw. weich analysiert. Gemäß der Definition sind bei einem weichen Klang nur wenige tiefe Teiltöne ausgeprägt, in diesem Zusammenhang werden die ersten drei Motorhauptordnungen herangezogen. Beim harten Klang wird besonderes Augenmerk auf die erste Hauptordnung bzw. Hauptordnungen ab der sechsten gelegt. Die hier als weich bzw. hart bezeichneten Motorordnungen für verschiedene Zylinderzahlen sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst. Um auch beim 4-Zylindermotor Teiltöne oberhalb des sechsten Teiltones verwenden zu können, wird für diese Untersuchungen der betrachtete Bereich des Ordnungsspektrums bis zur 14. Motorordnung erweitert.

Tabelle 6-10: Weiche und harte Motorordnungen

2 Zylinder	weiche MO	1, 2, 3
	harte MO	1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
3 Zylinder	weiche MO	1.5, 3, 4.5
	harte MO	1.5, 10.5, 12, 13.5
4 Zylinder	weiche MO	2, 4, 6
	harte MO	2, 14

Die Boxplots in Abbildung 6-18 zeigen die Datenlagen der Gruppen bei Verhältnisbildung der Amplituden der Einhüllenden von weichen zu harten Motorordnungen entsprechend (Gl. 6.5) über die fünf Drehzahlstufen.

$$\frac{Weiche\ MO}{Harte\ MO} \qquad \text{(Gl. 6.5)}$$

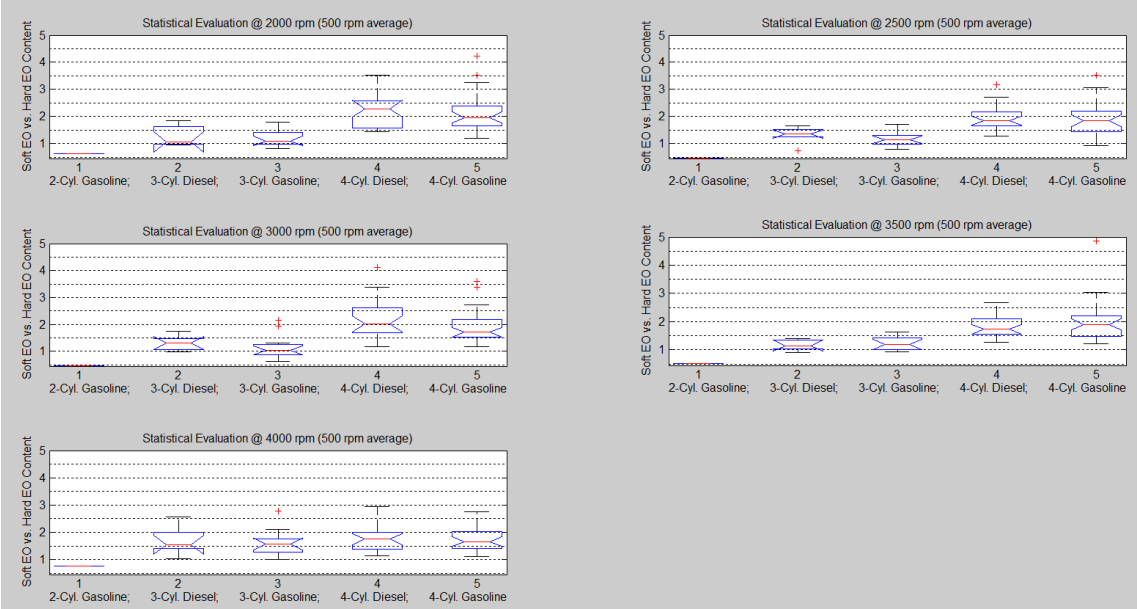


Abbildung 6-18: Weiche zu harten Motorordnungen

Werden die Drehzahlenstufen von 2000 bis 3500 rpm betrachtet, so zeigt sich eine deutliche Gruppierung der Fahrzeuge entsprechend deren Zylinderzahlen. Anhand der Lage der Konfidenzintervalle kann auf eine Unterscheidbarkeit von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen geschlossen werden, welche durch die Untersuchungen mittels ANOVA auch bestätigt werden.

Der Anteil von weichen zu harten Motorordnungen ist beim 2-Zylinderfahrzeug am kleinsten, danach folgen die 3-Zylinderfahrzeuge beider Brennverfahren. Die 4-Zylinderfahrzeuge haben demnach den weichsten Klang, was auch subjektiv gut nachvollziehbar ist. Im Allgemeinen kann auch von einer subjektiven Bevorzugung eines weicheren Klanges[164] ausgegangen

[164] Vgl. Martner, et al. 2000., S. 682

werden. Somit würden auch die in Abschnitt 2.3.4 präsentierten Theorien über höheres Unwohlsein bei niedrigeren Zylinderzahlen bestätigt werden.[165]

Bei der höchsten Drehzahlstufe sind die Unterschiede zwischen den Gruppen nicht mehr so klar ausgeprägt. Es ergeben sich wesentlich größere Streuungen der Daten aller Gruppen, sodass die Konfidenzintervalle stark überlappen und eine Unterscheidbarkeit anhand der gewählten Bewertungsmethode nicht mehr gegeben ist. Als Begründung dafür ist der bei hohen Drehzahlen größer werdende Einfluss von Resonanzen anzuführen. Dadurch kommt es zu kurzzeitigen Anhebungen von Motorordnungen, welche ansonsten wenig Einfluss haben. Dies ist auch im Ordnungsspektrum in Abbildung 6-10 erkennbar. Somit werden die Verhältnisse der Teiltonamplituden stark beeinflusst und demzufolge auch die Anteile von weichen und harten Motorordnungen verändert.

Werden die Ordnungsspektren analog zu den bisherigen Auswertungen nur bis zur 12. MO analysiert, so wird für die harten Motorordnungen des 4-Zylindermotors nur noch die Zündordnung verwendet. Auf Grund des sehr niedrigen Energiegehalts der Ordnungen oberhalb der 12. MO ergeben sich dadurch aber nur sehr kleine Änderung der Datenlage und die statistische Unterscheidbarkeit der 3- und 4-Zylindergruppen bleibt nach wie vor aufrecht.

6.2.3. Schlussfolgerung

Eine eindeutige Charakterisierung der Klangfarben von Fahrzeuginnengeräuschen bei unterschiedlicher Zylinderzahl anhand der Helmholtz-Definitionen ist in der Praxis schwierig. Dies liegt vorrangig daran, dass die Ordnungsspektren der Fahrzeuggeräusche nur selten ausschließlich stark ausgeprägte Hauptordnungen aufweisen. Besonders im mittleren und höheren Drehzahlbereich wird der Einfluss nicht harmonischer Motorordnungen größer, was auch schon in Abschnitt 6.1.4.1 gezeigt wurde. Das heißt, dass bedingt durch das dichte Ordnungsmuster der Klangcharakter noch geräuschhafter wird und nur mehr wenig harmonische Zusammenhänge und Zuordnungen zu den genannten Klangfarben festgestellt werden können. Dies gilt für Fahrzeuge aller untersuchten Gruppen in ähnlicher Weise. Es ergeben sich zwar Unterschiede in der Geräuschqualität, doch sind diese nur bedingt durch Klangfarbenbeschreibungen erklärbar.

Durch die Verwendung des Klangfarbenpaares „weich - hart“ ist im unteren bis mittleren Drehzahlbereich eine Unterscheidung der Gruppen gemäß deren Zylinderzahlen möglich. Dabei wird auch keine Trennung nach Brennverfahren durchgeführt, sodass die Unterschiede ausschließlich auf die Zylinderzahlen zurückgeführt werden können und eine mit der Zylinderzahl steigende Weichheit des Klangs anhand der Ordnungsanalysen attestiert werden kann. Eine Bewertung der Motorordnungen entsprechend der Attribute „voll - leer“ lässt lediglich im hohen Drehzahlbereich auf deutlich ausgeprägte Unterschiede zwischen den Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl schließen. Durch die Kombination dieser beiden

[165] Vgl. Mauch, et al. 2011, S. 536.

Bewertungsformen ist somit bei entsprechender drehzahlabhängiger Gewichtung eine Unterscheidung von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen im gesamten Drehzahlbereich möglich.

Eine Klangfarbenbeschreibung mit „hohl - gedeckt“ anhand der geradzahligen und ungeradzahligen Teiltöne führt zu keinen erkennbaren Unterschieden zwischen den Gruppen und ist somit für die Beschreibung typischer Klangcharakteristika praktisch nicht einsetzbar.

6.2.4. Kritische Betrachtung

Bei der Klangfarbenanalyse anhand der Helmholtz-Definitionen werden lediglich die ganzzahligen Vielfachen der Zündordnung – das heißt, der Grundton und die weiteren Teiltöne – berücksichtigt. Im Spektrum eines Motorklangs liegen aber auch hohe Energieanteile zwischen den Hauptordnungen vor, welche in diesem Zusammenhang nicht betrachtet werden.

Da aber die höchsten Energieanteile in den Hauptordnungen stecken (vgl. z.B. die Campbell-Diagramme in Abschnitt 6.1.2), kann anhand der Klangfarbenbeschreibung eine Art von Grundcharakterisierung des Klangs und in weiterer Folge auch eine Unterscheidung von Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahl vorgenommen werden. Wie die Ergebnisse in Abschnitt 6.2.2 zeigen, ist dazu eine Beschreibung mit den Attributen „weich – hart“ am besten geeignet. Durch die stark von der Drehzahl und von anderen Faktoren wie Resonanzen im Fahrzeugübertragungsverhalten oder Moden im Innenraum abhängigen Verhältnisse zwischen den Motorordnungen ist die Zuordnung einer bestimmten Klangfarbe über den gesamten Drehzahlbereich allerdings nicht immer möglich.

Anhand der vorliegenden Untersuchungen wird gezeigt, dass ein Potential zur Beschreibung von Fahrzeugklängen unterschiedlicher Zylinderzahl mittels bestimmter Klangfarben vorhanden ist. In weiterer Folge könnten diese Erkenntnisse auch zur Klanggestaltung und Verbesserung des Klangs von Motoren kleiner Zylinderzahlen eingesetzt werden. Vor der Umsetzung der ermittelten Ergebnisse in Form eines Parameters ist eine Untersuchung der Korrelation mit subjektiven Bewertungen sinnvoll. Dazu ist die Durchführung von psychoakustischen Versuchsreihen mit Geräuschaufnahmen der Datenbasis notwendig.

6.3. Darstellung von Amplitudenverhältnissen

Neben den gezeigten Methoden zur Analyse von Einhüllenden-Amplituden der Motorordnungen anhand von harmonischen Zusammenhängen und Klangfarben gibt es noch andere Möglichkeiten, um Amplitudenverhältnisse im Ordnungsspektrum darzustellen und die Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen zu unterscheiden. Diese basieren ebenfalls auf der Betrachtung der Einhüllenden der Motorordnungen.

6.3.1. Tristimulus

Der Tristimulus ist eine Beschreibungsgröße für die Verhältnisse der Amplituden im Spektrum eines Signal und wurde als ein Gegenstück zur Farbbeschreibung (RGB) entwickelt.[166] Dabei wird die Amplitude des Grundtons, der ersten drei Harmonischen und der höheren Harmonischen jeweils ins Verhältnis zur Summe der Amplituden aller betrachteter Teiltöne gesetzt. Die Summe der drei Tristimuli ergibt immer 1. Daher müssen nur jeweils zwei Teile berechnet werden, da sich der dritte als Differenz auf 1 ergibt.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchung werden die drei Komponenten (Tristimuli) im Wesentlichen dazu verwendet, um die Ausprägung von tiefen, mittleren und hohen Motorordnungen darzustellen. Dabei werden unabhängig von Fahrzeuggruppe und Zylinderzahl alle ganzzahligen Vielfachen der 1. Ordnung (bis zur 12. MO) betrachtet. Die Berechnung der Tristimuli durch Verhältnisbildung der Einhüllenden-Amplituden zeigt Tabelle 6-11.

Tabelle 6-11: Tristimulus Berechnung

Tristimulus 1	$\frac{MO_1}{\sum_{k=1}^{12} MO_k}$	(Gl. 6.6)
Tristimulus 2	$\frac{\sum_{n=2}^{4} MO_n}{\sum_{k=1}^{12} MO_k}$	(Gl. 6.7)
Tristimulus 3	$\frac{\sum_{n=5}^{12} MO_n}{\sum_{k=1}^{12} MO_k}$	(Gl. 6.8)

Die Darstellung der drei ermittelten Komponenten für alle Fahrzeuge der Datenbasis erfolgt mit dreidimensionalen Scatterplots, wobei jedem Tristimulus eine Achse des Koordinatensystems zugewiesen wird. Abbildung 6-19 stellt die Ergebnisse für die Drehzahlstufe bei 3000 rpm in der 3D-Ansicht dar. Die Kombination aus Zahl und Buchstabe in der Legende indiziert die Zylinderzahl und das Brennverfahren. Da die Ergebnisse über den gesamten Drehzahlbereich sehr ähnlich sind und somit die gleichen Aussagen gelten, wird auf die Darstellung bei anderen Drehzahlen verzichtet.

[166] Vgl. Ciglar. 2009, S. 36.

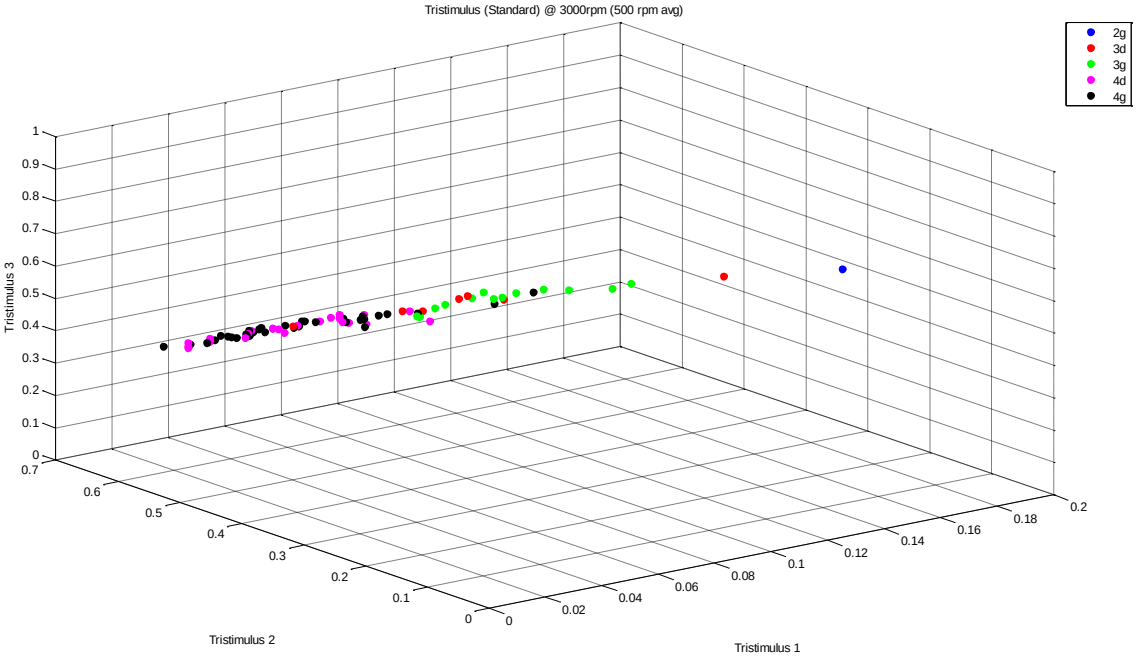


Abbildung 6-19: Tristimulus @ 3000 rpm

In der Abbildung ist eine Gruppierung der Datenpunkte gemäß der Zylinderzahlen erkennbar. Die 4-Zylinderfahrzeuge bilden eine Punktewolke in der linken Hälfte, die 3-Zylinderfahrzeuge in der Mitte und das 2-Zylinderfahrzeug befindet sich ganz rechts. Durch die Verwendung von 2D-Ansichten kann ein besserer Überblick über die Anteile der drei Komponenten gewonnen werden. Dazu dienen Abbildung 6-20, Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22.

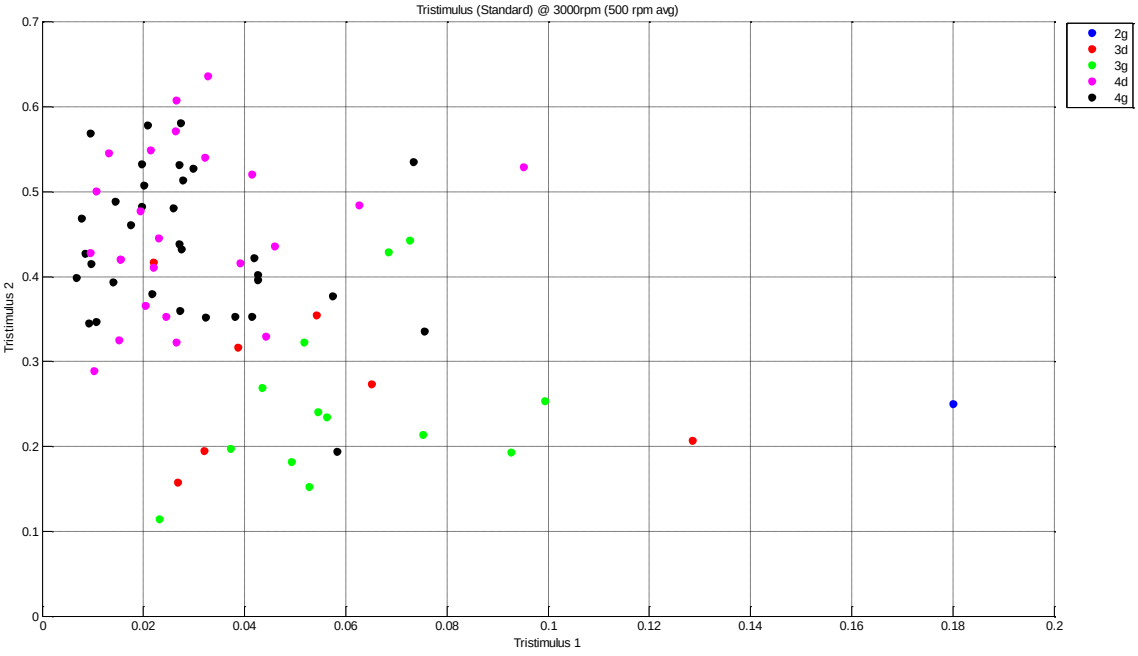


Abbildung 6-20: Tristimuli 1 & 2 @ 3000 rpm

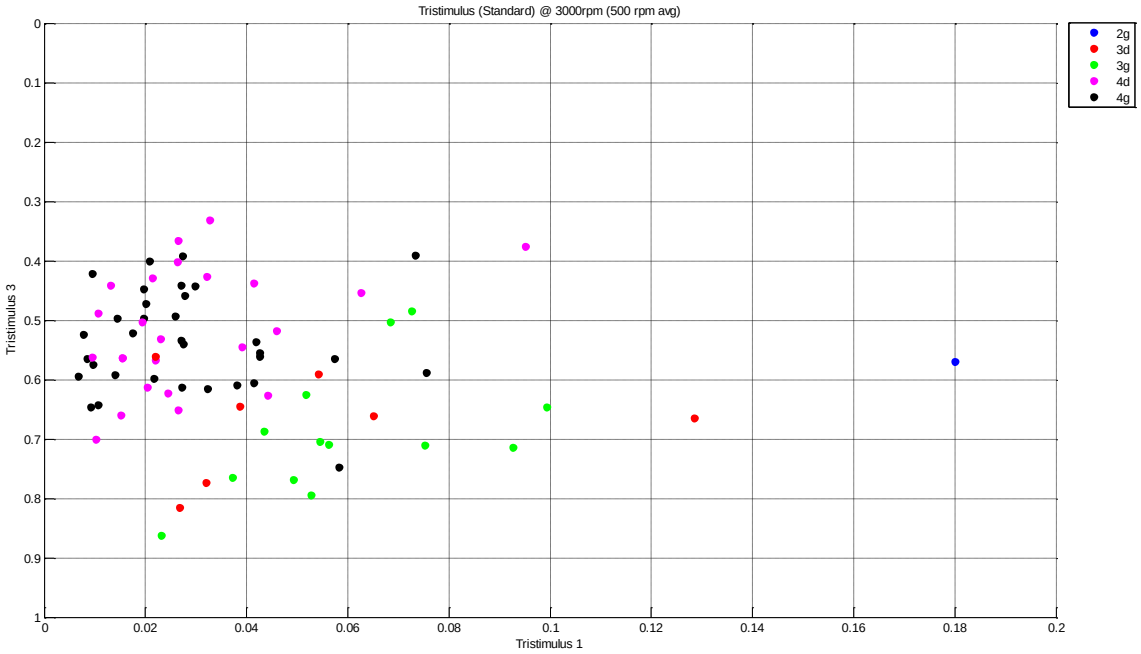


Abbildung 6-21: Tristimuli 1 & 3 @ 3000 rpm

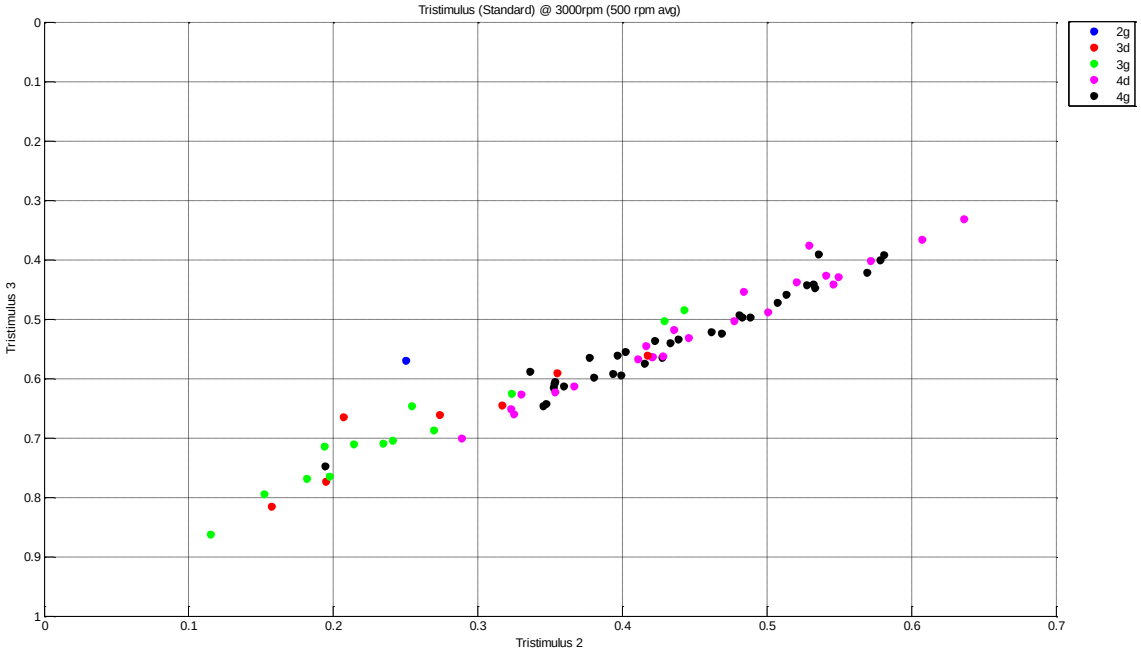


Abbildung 6-22: Tristimuli 2 & 3 @ 3000 rpm

Aus den obigen drei Abbildungen können einige Erkenntnisse für die drei Komponenten zusammengefasst werden. Tristimulus 1 ergibt mit Abstand den größten Wert für das 2-Zylinderfahrzeug, während die 4-Zylinderfahrzeuge überwiegend niedrige Werte annehmen. Die 3-Zylinderfahrzeuge liegen dazwischen und es liegen einige Überschneidungen mit den 4-Zylinderfahrzeugen vor. Auf Grund der Definition des Tristimulus ordnen sich alle Fahrzeuge in einer Ebene an (Abbildung 6-22), wobei die 3-Zylindergruppen für Tristimulus 2 niedrigere und für Tristimulus 3 allgemein höhere Werte annehmen als die 4-Zylindergruppen. In Summe scheint die Unterscheidung der Gruppen nach ihrer Zylinderzahl mittels der Tristimulusdarstellung also möglich.

Wird die Ebene, auf der sich die Fahrzeuge anordnen, aus der entsprechenden Perspektive betrachtet, so ergibt sich eine Aufreihung auf einer Linie, wie dies in Abbildung 6-23 dargestellt ist.

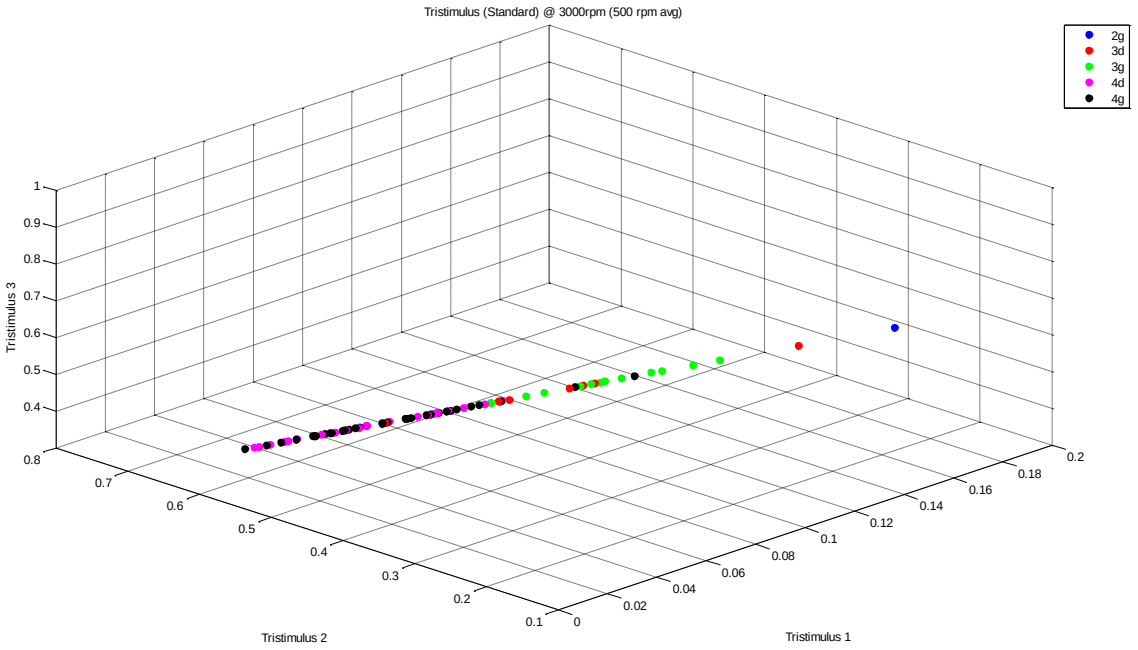


Abbildung 6-23: Tristimulus - Linienanordnung

Die Gruppierung der Fahrzeuge entsprechend deren Zylinderzahlen ist in der Abbildung deutlich erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass zur Beschreibung des Datenraums nicht alle drei Dimensionen notwendig sind. Um dies zu untersuchen, wird die PCA auf die Daten angewandt. Die Kovarianzmatrix in Tabelle 6-12 zeigt die sehr hohe lineare Abhängigkeit von 97,5 % zwischen Tristimulus 2 und 3.

Tabelle 6-12: Tristimulus Kovarianzmatrix @ 3000 rpm

1,0000	-0,3747	0,1604
-0,3747	1,0000	-0,9752
0,1604	-0,9752	1,0000

Die Beladung der drei Hauptkomponenten zeigt die Koeffizientenmatrix in Tabelle 6-13.

Tabelle 6-13: Tristimulus Koeffizientenmatrix @ 3000 rpm

-0,0465	0,8152	0,5774
0,7292	0,3673	0,5774
-0,6827	-0,4479	0,5774

Da die Summe der drei Tristimuli immer 1 ergibt, ist die Beschreibung von 100 % der Varianz bereits mit zwei transformierten Komponenten möglich, eine Komponente beschreibt bereits 96,4 % der Varianz.

Wird mittels LDA die Klassifizierungsqualität des Tristimulus untersucht, so zeigt sich, dass die höchste Anzahl richtiger Zuordnungen durch die Linearkombination von Tristimulus 1 und 2 möglich ist. Es kommt zu einer richtigen Zuordnung von 93,5 % der Fahrzeuge mit 3- und 4-Zylindermotoren. Eine Auflistung richtiger und falscher Zuordnungen bei einer Drehzahl von 3000 rpm zeigt Tabelle 6-14.

Tabelle 6-14: Tristimulus Klassifizierung im Detail @ 3000 rpm

	Richtig		Falsch	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
3-Zylinder Diesel	5	72,43 %	2	28,57 %
3-Zylinder Otto	13	100 %	0	0 %
4-Zylinder Diesel	23	95,83 %	1	4,17 %
4-Zylinder Otto	31	93,94 %	2	6,06 %
Gesamt	72	93,51 %	5	6,49 %

Das 2-Zylinderfahrzeug wird in diese Betrachtungen nicht miteinbezogen, da, wie schon erwähnt, keine Verallgemeinerung der Aussagen für eine ganze Gruppe anhand eines einzelnen Beispiels getroffen werden soll. Insgesamt werden anhand des Tristimulus zwei 3-Zylinderfahrzeuge den 4-Zylinderfahrzeugen zugeordnet, drei 4-Zylinderfahrzeuge werden den 3-Zylinderfahrzeugen zugeordnet. Die Anzahl richtiger Zuordnungen von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen anhand der Linearkombination von Tristimulus 1 und 2 fasst Tabelle 6-15 an den fünf betrachteten Drehzahlstufen zusammen. Ein Anstieg der Klassifizierungsrate mit steigender Drehzahl ist erkennbar.

Tabelle 6-15: Tristimulus Klassifizierung

	Richtig		Falsch	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
2000 rpm	71	92,21 %	9	7,79 %
2500 rpm	72	93,51 %	5	6,49 %
3000 rpm	72	93,51 %	5	6,49 %
3500 rpm	75	97,40 %	1	2,60 %
4000 rpm	77	100 %	0	0 %

Eine Begründung für die Anordnung der Gruppen anhand der Tristimuli kann durch die charakteristischen Ordnungsmuster entsprechend deren Zylinderzahlen gefunden werden. Tristimulus 1 bewertet die 1. Ordnung, welche der Zündordnung von 2-Zylindermotoren entspricht und so den hohen Wert des entsprechenden Fahrzeugs auf dieser Komponente

erklärt. Tristimulus 2 zeigt die höchsten Werte für 4-Zylindermotoren, da deren 1. und 2. Hauptordnung (2. und 4. MO) bewertet werden. Die Zündordnung von 3-Zylindermotoren liegt bei der 1,5. Motorordnung und somit genau zwischen den Tristimuli. Tristimulus 2 trifft aber die 3. Motorordnung, welche die 2. Hauptordnung beim 3-Zylindermotor darstellt.

Diese Art der Darstellung gibt einen Überblick über die Stärke von Motorordnungen für die Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahlen, jedoch stimmen die betrachteten Motorordnungen nur für 2-Zylinderfahrzeuge mit den Hauptordnungszahlen vollständig überein. Während bei 4-Zylinderfahrzeugen alle Hauptordnungen berücksichtigt werden, da diese jeweils auf ganzen Ordnungszahlen liegen, gibt es beim 3-Zylindermotor dazwischenliegende Ordnungen (alle ungeradzahligen Vielfachen der Zündordnung), die somit nicht betrachtet werden.

6.3.2. Hauptordnungs – Tristimulus

Analog zum Tristimulus im letzten Abschnitt ist die Verwendung anderer Motorordnungen zur Bildung der drei Komponenten denkbar. Um einen besseren Bezug zum für die jeweilige Zylinderzahl charakteristischen Ordnungsmuster herzustellen, werden für die Berechnung des Hauptordnungs–Tristimulus ganzzahlige Vielfache der Zündordnung verwendet und ins Verhältnis zur Summe der Amplituden der Einhüllenden aller ganz- und halbzahligen Ordnungen bis zur 12. MO gesetzt.

Bei Verwendung des Hauptordnung-Tristimulus zur Bewertung eines Fahrzeuggeräusches muss die Zylinderanzahl des untersuchten Fahrzeugs bekannt sein. Ist dies nicht der Fall, so kann anhand der aus dem Spektrum extrahierten Motorordnungen eine Bestimmung der Zylinderzahl erfolgen. Dazu werden die Einhüllenden-Amplituden aller ganz- und halbzahligen Motorordnungen über den gesamten Drehzahlbereich integriert. Die Zündordnung erreicht dabei üblicherweise den höchsten Wert und dient so zur Identifikation der Zylinderzahl. Sie entspricht bei 2 Zylindern der 1. MO, bei 3 Zylindern der 1,5. MO und bei 4 Zylindern der 2. MO. Bei Anwendung dieser Methode auf die Datenbasis ergibt sich für alle Fahrzeuge die richtige Zylinderzahl, sodass von einer hohen Zuverlässigkeit ausgegangen werden kann. Beispielhaft zeigen die beiden Balkendiagramme in Abbildung 6-24 die über den Drehzahlbereich integrierten Einhüllenden-Amplituden für zwei beliebige Fahrzeuge der Datenbasis, links mit 3-Zylindermotor und rechts mit 4-Zylindermotor.

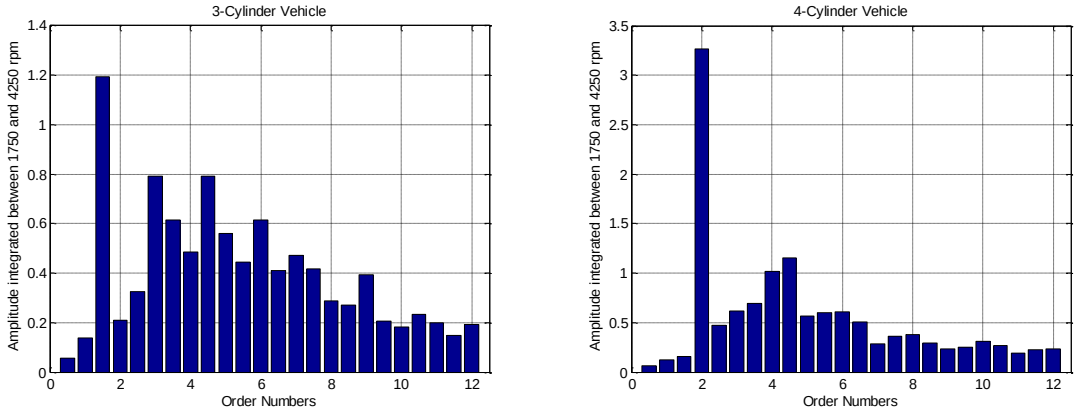


Abbildung 6-24: Ermittlung der Zündordnung aus dem Ordnungsspektrum

In beiden Diagrammen ist die Identifizierung der Zylinderzahl durch die stark ausgeprägte 1. Hauptordnung (Zündordnung) möglich.

In Tabelle 6-16 sind die Berechnungsvorschriften für die Hauptordnungs–Tristimuli dargestellt.

Tabelle 6-16: Hauptordnungs-Tristimulus Berechnung

Hauptordnungs-Tristimulus 1	$\frac{HO_1}{MO_{ges.}}$	(Gl. 6.9)
Hauptordnungs-Tristimulus 2	$\frac{\sum_{n=2}^{4} HO_n}{MO_{ges.}}$	(Gl. 6.10)
Hauptordnungs-Tristimulus 3	$\frac{\sum_{n>4} HO_n}{MO_{ges.}}$	(Gl. 6.11)
	Mit $MO_{ges.} = \sum_{k=0.5}^{12} MO_k$	(Gl. 6.12)

Die Ergebnisse sind über den gesamten Drehzahlbereich sehr ähnlich, weshalb nur die Datenlagen bei 3000 rpm grafisch dargestellt werden. Abbildung 6-25 zeigt in einem Scatterplot die Anordnung der Fahrzeuge der Datenbasis durch die Hauptordnungs-Tristimuli, welche den drei Achsen des Koordinatensystems entsprechen.

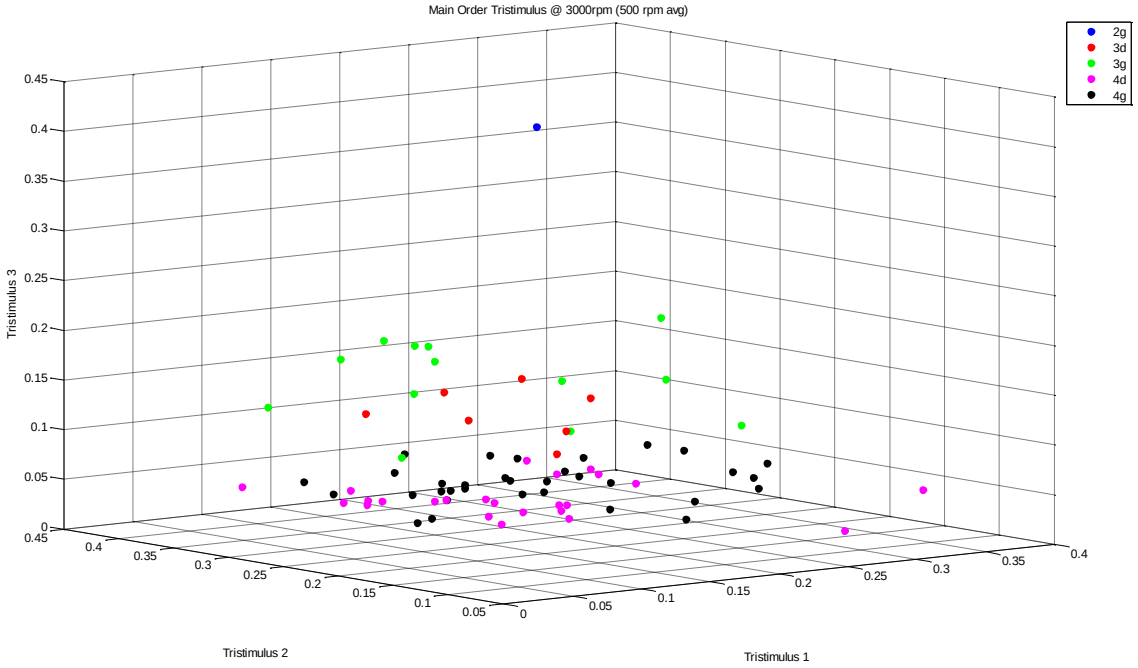


Abbildung 6-25: Hauptordnungs–Tristimulus @ 3000 rpm

Zwar ist die Gruppierung der Fahrzeuge in Punktwolken entsprechend deren Zylinderzahlen in der Abbildung bereits erkennbar, zur Analyse der Anteile der drei Komponenten werden jedoch 2D-Plots verwendet, welche in Abbildung 6-26, Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28 dargestellt sind.

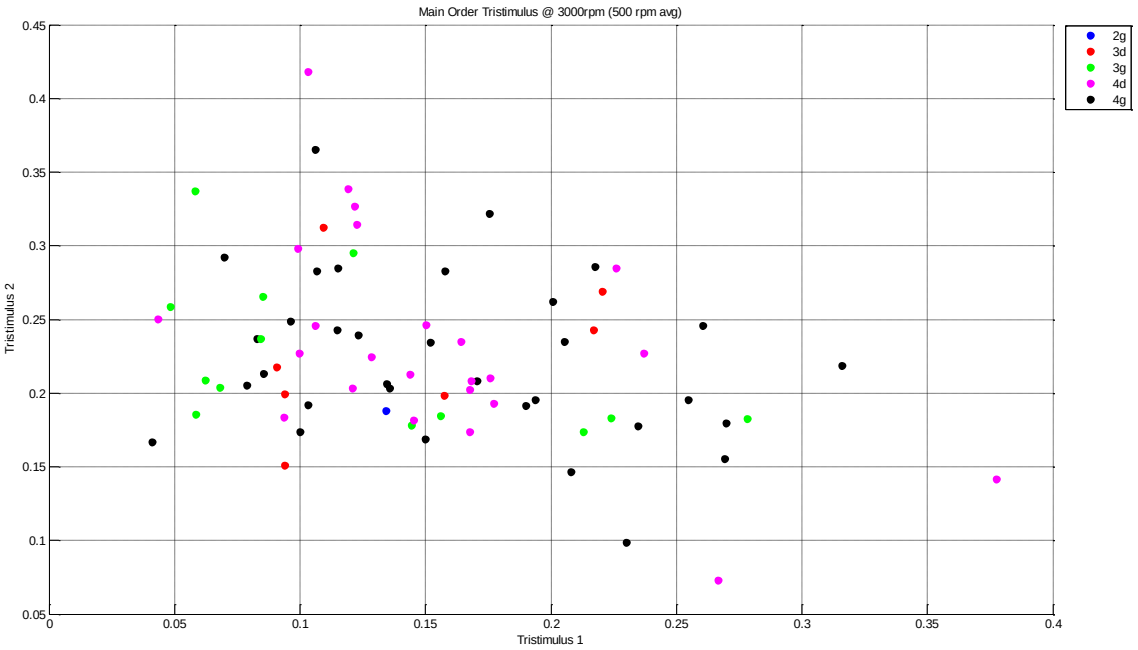


Abbildung 6-26: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 @ 3000 rpm

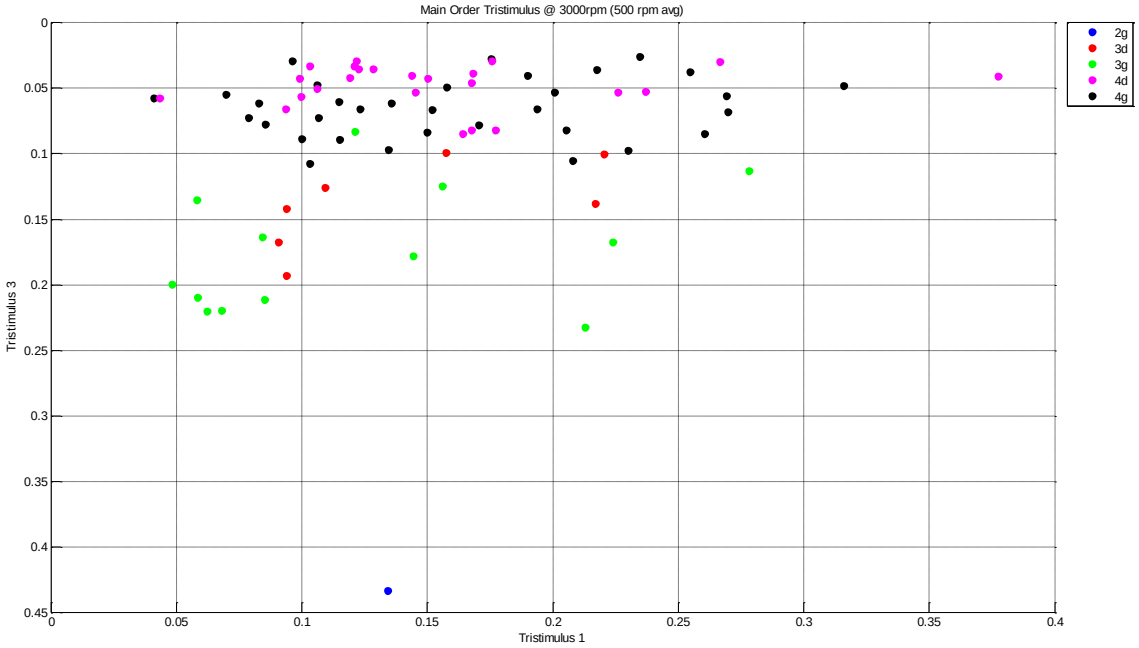


Abbildung 6-27: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 3 @ 3000 rpm

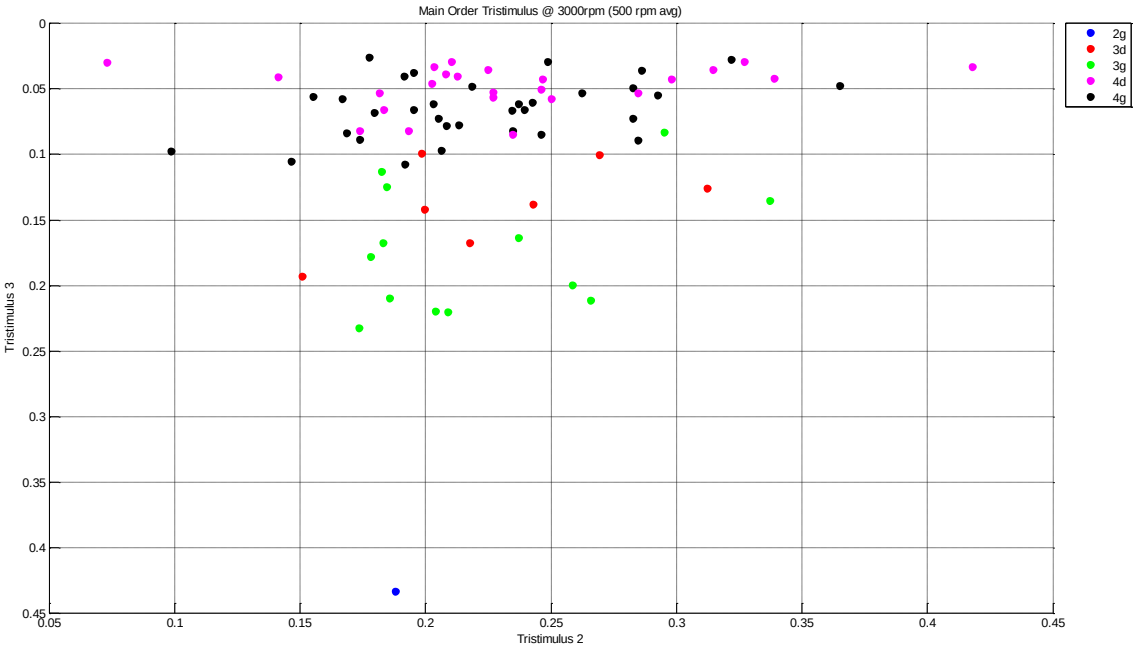


Abbildung 6-28: Hauptordnungs-Tristimuli 2 & 3 @ 3000 rpm

Anhand der Komponenten 1 und 2 entstehen keine Gruppierungen entsprechend der Zylinderzahlen. Das bedeutet, dass es im Mittel keinen erkennbaren Unterschied der Amplituden der 1. Hauptordnung bzw. der Hauptordnungen 2 bis 4 im Verhältnis zur Summe aller Einhüllenden-Amplituden zwischen den Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen gibt. Wird jedoch die 3. Komponente betrachtet (Abbildung 6-28), so ergeben sich deutliche Gruppierungen. Das 2-Zylinderfahrzeug reißt weit aus und auch die Punktwolken für 3- und 4-Zylinderfahrzeuge zeigen fast keine Überschneidungen. Diese Erkenntnisse gelten für alle betrachteten Drehzahlen in ähnlichem Maße. Das heißt, dass eine Unterscheidbarkeit der Gruppen mittels des Hauptordnungs–Tristimulus 3, der das Verhältnis der Einhüllenden-

Amplituden höherer Teiltöne (ab dem 5. Teilton) gegenüber der Summe der Einhüllenden-Amplituden aller Teiltöne repräsentiert, möglich ist. Die Auflistung der richtigen und falschen Zuordnungen von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen anhand von Hauptordnungs-Tristimulus 3 zeigt Tabelle 6-17 für die fünf betrachteten Drehzahlstufen.

Tabelle 6-17: Hauptordnungs-Tristimulus Klassifizierung

	Richtig		Falsch	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
2000 rpm	75	97,40 %	2	2,60 %
2500 rpm	75	97,40 %	2	2,60 %
3000 rpm	74	96,11 %	3	3,89 %
3500 rpm	76	98,70 %	1	1,30 %
4000 rpm	73	94,81 %	4	5,19 %

Eine physikalische Begründung dieser Ergebnisse ergibt sich durch die unterschiedlichen Ordnungsabstände bei verschiedenen Zylinderzahlen. Für alle Fahrzeug wird derselbe Bereich des Ordnungsspektrums (bis zur 12. MO) betrachtet, da darüber (wie schon in Abschnitt 6.1.4.1 gezeigt wurde) nur mehr sehr wenig Energie in den deterministischen Komponenten des Spektrums liegt. Das heißt jedoch, dass für den Hauptordnungs-Tristimulus 3 mit steigender Zylinderzahl weniger Motorordnungen berücksichtigt werden. Somit ist diese Darstellungsweise quasi ein Indikator für die Anzahl von Motorhauptordnungen in einem bestimmten Frequenzbereich und repräsentiert in weiterer Folge auch den Abstand zwischen den Motorhauptordnungen. Dies sind wichtige charakteristische Merkmale der Motoren entsprechend deren Zylinderzahlen, was schon in Abschnitt 2.3.3 gezeigt wurde.

6.3.3. Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2

Zusätzlich zur obigen Variante des Hauptordnungs-Tristimulus ist auch eine weitere Variante denkbar. Dabei werden die Tristimuli nicht auf die Summe der Amplituden-Einhüllenden aller Motorordnungen bezogen, sondern auf die Summe der Amplituden-Einhüllenden der Motorhauptordnungen. Es werden somit nur ganzzahlige Vielfache der Zündordnung bis zur 12. MO betrachtet, welche analog zu den Klangfarbenuntersuchungen (siehe Abschnitt 6.2) wiederum als Teiltöne interpretiert werden können. Die Vorschriften zur Berechnung der Hauptordnungs-Tristimuli für Variante 2 sind in Tabelle 6-18 zusammengefasst. Wie beim Standard-Tristimulus müssen auch hier nur zwei Komponenten berechnet werden, da sich die dritte aus der Differenz zu 1 ergibt.

Tabelle 6-18: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Berechnung

Hauptordnungs-Tristimulus 1 V2	$\frac{HO_1}{HO_{ges.}}$	(Gl. 6.13)
Hauptordnungs-Tristimulus 2 V2	$\frac{\sum_{n=2}^{4} HO_n}{HO_{ges.}}$	(Gl. 6.14)
Hauptordnungs-Tristimulus 3 V2	$\frac{\sum_{n>4} HO_n}{HO_{ges.}}$	(Gl. 6.15)
	Mit $HO_{ges.} = \sum_k HO_k$	(Gl. 6.16)

Mit steigender Drehzahl ist eine verstärkte Gruppierung der Fahrzeuge entsprechend deren Zylinderzahlen erkennbar. Dies wird anhand der nachstehenden Scatterplots für die Drehzahlstufen von 2000 (Abbildung 6-29), 3000 (Abbildung 6-30) und 4000 rpm (Abbildung 6-31) gezeigt. Für die Darstellungen werden jeweils die Tristimuli 1 und 2 verwendet, da sich aus der dritten Komponente entsprechend der Berechnungsvorschrift keine neue Information ergibt.

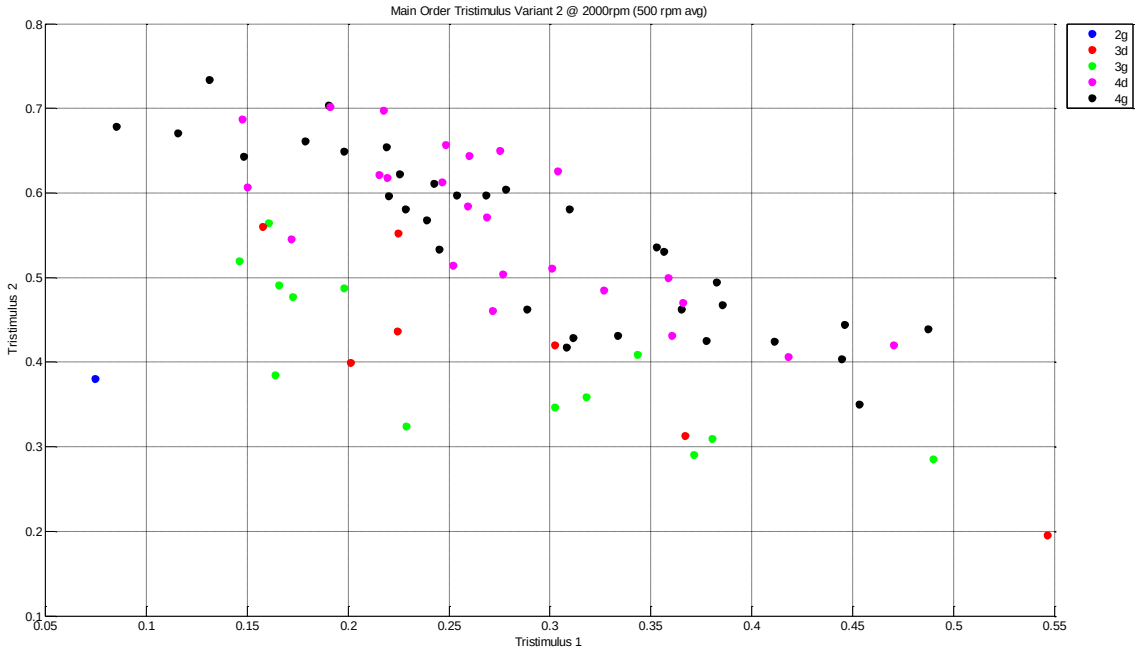


Abbildung 6-29: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 2000 rpm

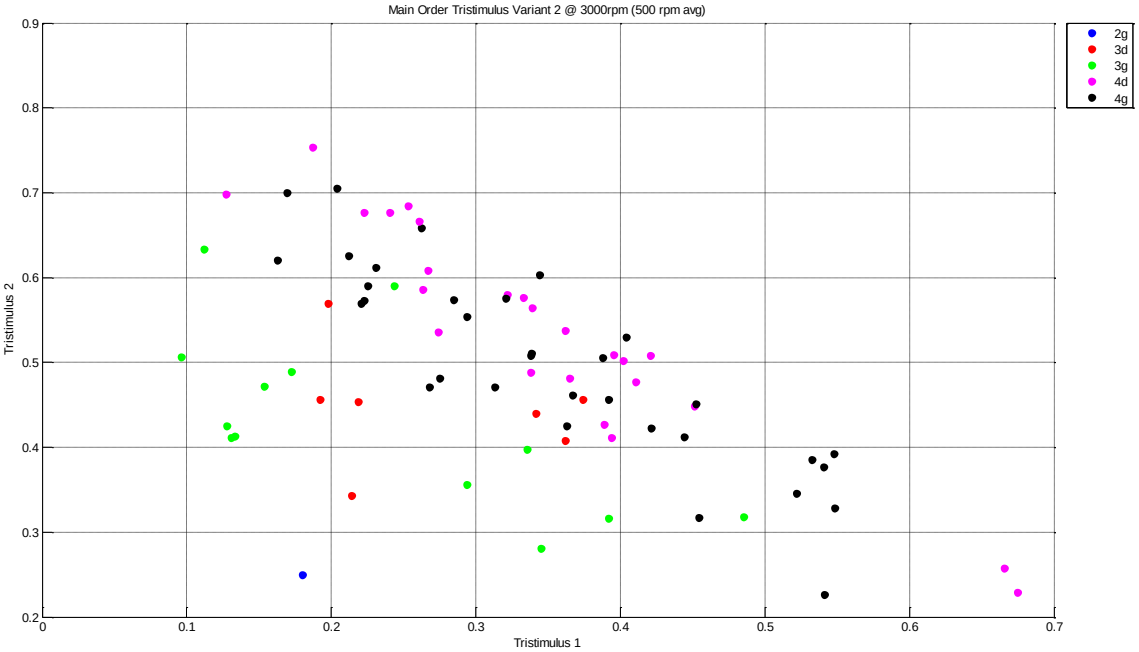


Abbildung 6-30: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 3000 rpm

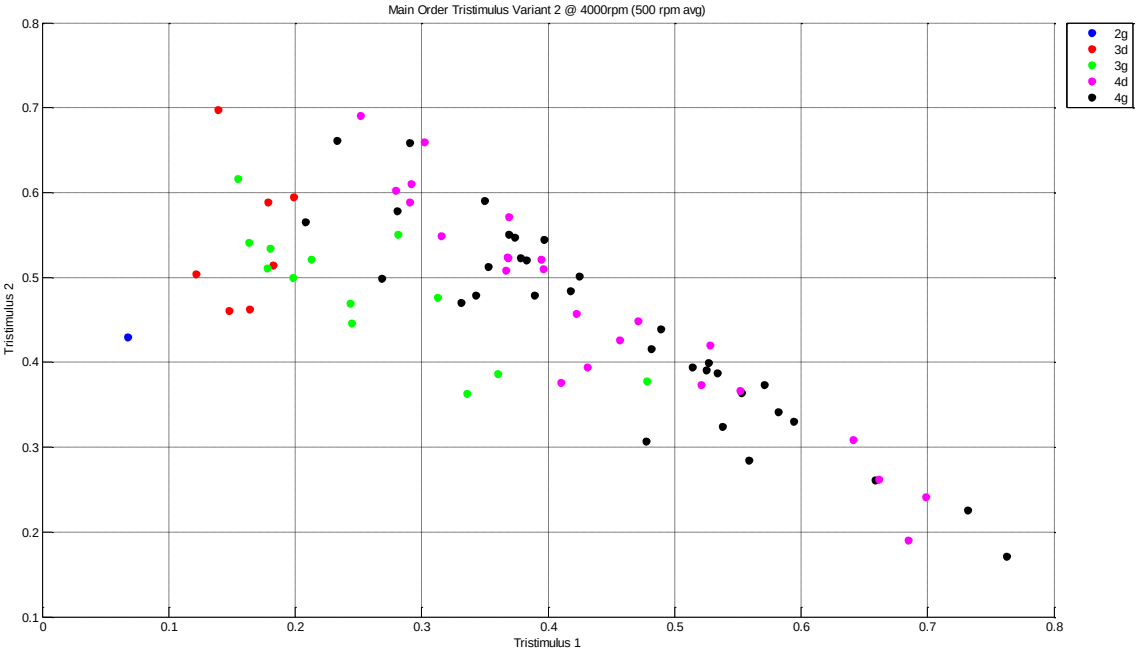


Abbildung 6-31: Hauptordnungs-Tristimuli 1 & 2 Variante 2 @ 4000 rpm

Anhand der drei Abbildungen ist erkennbar, dass die Überlappungsbereiche der Fahrzeuge entsprechend deren Zylinderzahlen mit steigender Drehzahl kleiner werden. Das heißt, dass die Varianz innerhalb der Gruppen im Verhältnis zur Gesamtvarianz abnimmt. Analog zu den Untersuchungen beim Tristimulus in Abschnitt 6.3.1 wird auch hier eine Untersuchung der Klassifizierungsqualität mittels LDA durchgeführt. Dazu werden alle 3- und 4-Zylinderfahrzeuge der Datenbasis betrachtet. Exemplarisch wird die Anzahl richtiger und falscher Zuordnungen für die Auswertung bei 4000 rpm in Tabelle 6-19 dargestellt. Die Ergebnisse werden durch die Linearkombination der Tristimuli 1 und 2 erreicht.

Tabelle 6-19: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Klassifizierung im Detail @ 4000 rpm

	Richtig		Falsch	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
3-Zylinder Diesel	7	100 %	0	0 %
3-Zylinder Otto	12	92,31 %	1	7,69 %
4-Zylinder Diesel	24	100 %	0	0 %
4-Zylinder Otto	31	93,94 %	2	6,06 %
Gesamt	74	96,11 %	3	3,89 %

Bei 4000 rpm können somit 96,11 % der Fahrzeuge mit 3- und 4-Zylindermotoren richtig zugeordnet werden. Für die anderen Drehzahlstufen erfolgt keine genaue Aufschlüsselung der Zuordnungen der einzelnen Gruppen. Stattdessen werden in Tabelle 6-20 die Anzahlen richtiger und falscher Zuordnungen anhand der Zylinderzahlen dargestellt.

Tabelle 6-20: Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 Klassifizierung

	Richtig		Falsch	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
2000 rpm	70	90,91 %	7	9,09 %
2500 rpm	72	93,51 %	5	6,49 %
3000 rpm	71	92,21 %	6	7,79 %
3500 rpm	74	96,11 %	3	3,89 %
4000 rpm	74	96,11 %	3	3,89 %

Die Ergebnisse der Klassifizierung zeigen, dass die Anzahl richtiger Zuordnungen der 3- und 4-Zylinderfahrzeuge prinzipiell mit steigender Drehzahl zunimmt.

Zusammenfassend wird die Unterscheidbarkeit der Gruppen von Fahrzeuge mit 3- und 4-Zylindermotoren beider Brennverfahren durch die Kombination der Hauptordnungs-Tristimuli 1 und 2 (Variante 2) durch die hohen Klassifizierungsraten bestätigt. Das heißt, dass sich aus der Analyse der Amplituden-Einhüllenden der 1. bzw. der 2. bis 4. Motorhauptordnung im Verhältnis zur Summe der Amplituden-Einhüllenden aller Motorhauptordnungen deutliche Unterschiede für die unterschiedlichen Zylinderzahlen ergeben. Detaillierte Untersuchungen der Fahrzeugreihungen innerhalb der Gruppen bzw. eine physikalische Interpretation der Ergebnisse sind bisher nicht erfolgt. Jedoch kann anhand der Ergebnisse eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung der Innengeräusche bei unterschiedlichen Zylinderzahlen gezeigt werden.

6.3.4. Zusammenfassung und kritische Betrachtung

Die Darstellung der Verhältnisse zwischen den Einhüllenden-Amplituden von Motorordnungen durch verschiedene Tristimulus–Varianten bietet eine weitere Möglichkeit, Fahrzeuge unterschiedlicher Zylinderzahlen zu unterscheiden. Jedoch ist die richtige Interpretation der Ergebnisse wichtig, um deren praktische Bedeutung verstehen zu können. Beispielsweise werden beim Standard–Tristimulus nicht alle Motorhauptordnungen des 3-Zylindermotors berücksichtigt, da diese auch bei nicht ganzzahligen Ordnungen liegen. Wird allerdings das Spektrum eines unbekannten Fahrzeugs mit ebenfalls unbekannter Zylinderzahl mittels dieser Methode bewertet, so kann anhand der obigen Ergebnisse eine Zuordnung zu den Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl (mit einer bestimmten Irrtumswahrscheinlichkeit) erfolgen.

Bei der Verwendung des Hauptordnungs-Tristimulus wird eine bekannte Zylinderzahl vorausgesetzt, um die entsprechenden Hauptordnungen für die Berechnung der drei Komponenten bestimmten zu können. Auch anhand dieser Methode können einige Erkenntnisse zusammengefasst werden. Anhand der Verhältnisse der 1. bzw. 2. bis 4. Motorhauptordnung zur Summe aller Motorordnungen kann kein Differenzierungsmerkmal zwischen den Gruppen festgemacht werden. Wird jedoch für alle Fahrzeuge der gleiche Ordnungs- und Frequenzbereich analysiert, so entstehen durch Tristimulus 3 Gruppierungen entsprechend der Zylinderzahlen. Zusammenfassend bedeutet das, dass mit dieser Methode prinzipiell eine Repräsentation der Unterschiede der Anzahl und des Abstands der Hauptordnungen in Abhängigkeit von der Zylinderzahl möglich ist.

Interessant ist aber auch eine Betrachtung der Reihung von Fahrzeugen innerhalb der Gruppen gleicher Zylinderzahl anhand des Hauptordnungs-Tristimulus. In diesem Zusammenhang wird ein Beispiel aus der Gruppe der 3-Zylinder-Ottomotoren (3g) näher betrachtet, das für Tristimulus 3 den mit Abstand niedrigsten Wert der Gruppe annimmt und damit im Bereich der 4-Zylinderfahrzeuge liegt. Beim Blick in die Datenbasis kann dieses Fahrzeug als jenes identifiziert werden, welches als akustisch bestes 3-Zylinderfahrzeug am Markt gilt.[167] Somit kann seine Lage im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen der Gruppe und auch im Vergleich zu den Fahrzeugen mit 4-Zylindermotoren gut nachvollzogen werden. Diese Ergebnisse deuten somit auf das Potential des Hauptordnungs-Tristimulus zur Klangqualitätsbeschreibung hin.

Werden die Motorhauptordnungen entsprechend der Hauptordnungs-Tristimulus Variante 2 ins Verhältnis zur Summe aller Motorhauptordnungen gesetzt, so wird anhand der Kombination von der Tristimuli 1 und 2 eine hohe Anzahl richtiger Zuordnungen für 3- und 4-Zylinderfahrzeuge erreicht. Die Qualität der Klassifizierung nimmt mit steigender Drehzahl zu. Basierend auf den ermittelten Ergebnissen werden weitere Untersuchungen bezüglich der Reihung der einzelnen Fahrzeuge und der physikalischen Bedeutung folgen, welche im Rahmen dieser Masterarbeit nicht mehr durchgeführt werden konnten.

[167] Vgl. Schürmann und Philipp. 2013, S. 217.

6.3.5. Deterministische und stochastische Komponenten

Ein weiterer Aspekt, welcher anhand der Amplitudenverhältnisse der Motorordnungen betrachtet wird, ist die Verhältnisbildung von den Motorhauptordnungen – also den deterministischen Komponenten – zum Hintergrundgeräusch, das die stochastischen Komponenten darstellt. Hierzu werden die ganz- und halbzahligen Motorordnungen von der 0,5. bis zu 12. Ordnung aus dem Spektrum extrahiert und entsprechend der Zylinderzahl die Einhüllenden-Amplituden der Hauptordnungen summiert und ins Verhältnis zu den Einhüllenden-Amplituden der Nebenordnungen gesetzt. Die Auswertungen dieser Verhältnisse erfolgen wieder an den fünf gemittelten Drehzahlstufen. Anhand von Scatterplots werden deterministischer Anteil (Abszisse) und stochastischer Anteil (Ordinate) für alle Fahrzeuge der Datenbank gegenübergestellt, um eine eventuelle Gruppierung nach Zylinderzahlen erkennen zu können. Diese Scatterplots werden für Drehzahlen von 2000, 3000, 4000 rpm in Abbildung 6-32, Abbildung 6-33 und Abbildung 6-34 dargestellt.

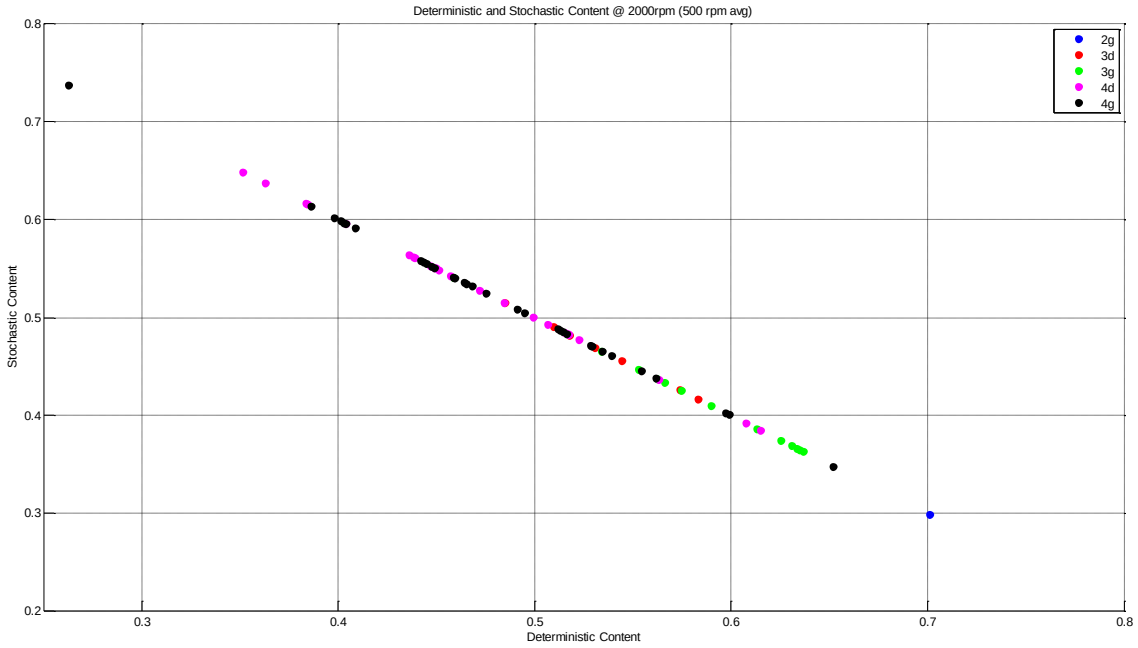


Abbildung 6-32: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 2000 rpm

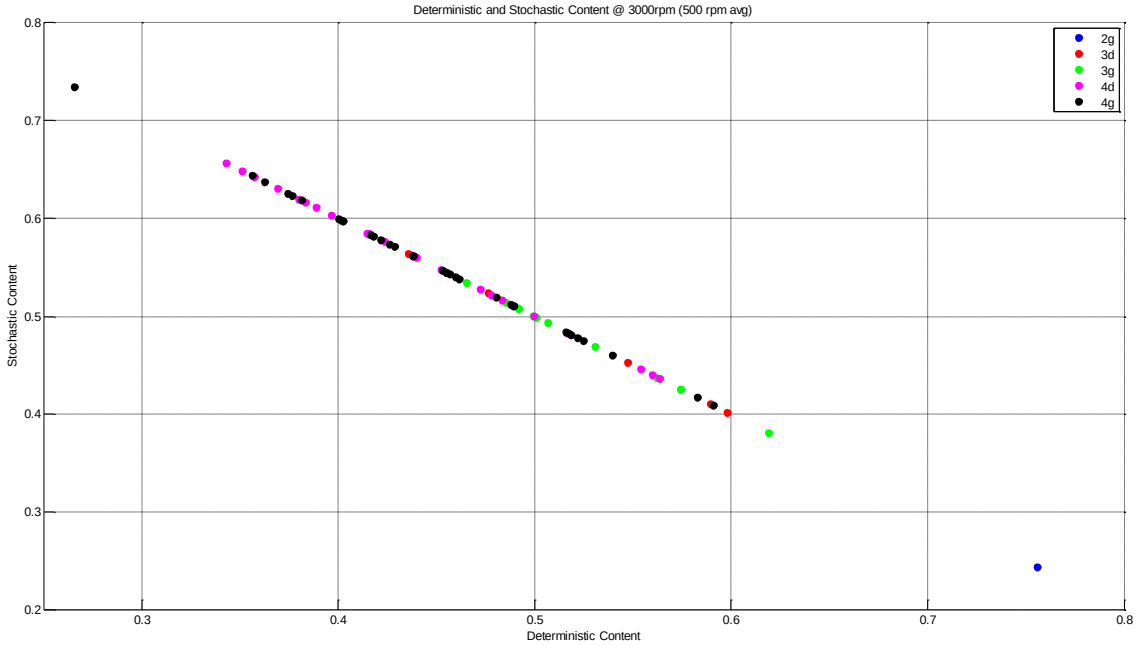


Abbildung 6-33: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 3000 rpm

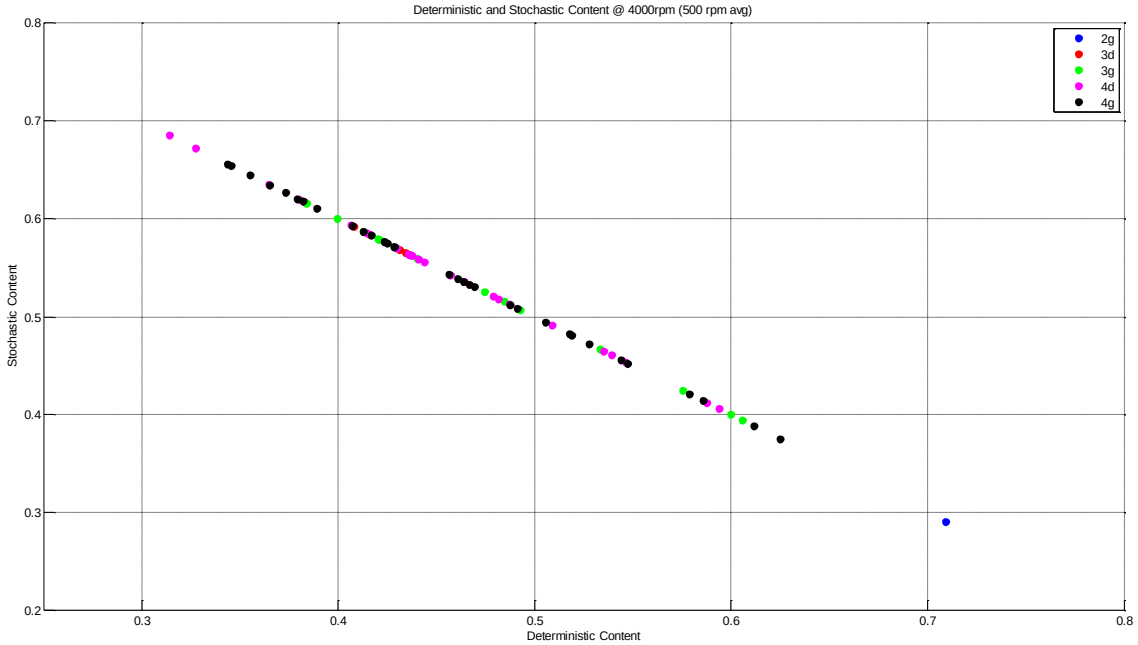


Abbildung 6-34: Deterministischer und stochastischer Anteil @ 4000 rpm

Für alle drei Drehzahlen zeigt das 2-Zylinderfahrzeug den mit Abstand höchsten deterministischen Anteil. Die 3-Zylinderfahrzeuge gruppieren sich bei niedrigeren Drehzahlen unterhalb der 4-Zylinderfahrzeuge, diese Tendenz nimmt mit steigender Drehzahl allerdings ab, sodass es zu größeren Überschneidungen der Bereiche von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen kommt. Die Möglichkeit zur Unterscheidung der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl anhand dieser Methode kann mittels der Boxplots in Abbildung 6-35 abgeschätzt werden. Dabei wird anhand der Einhüllenden-Amplituden für alle Fahrzeuge das Verhältnis der deterministischen zu den stochastischen Komponenten gemäß (Gl. 6.17) dargestellt.

$$\frac{Det.\ Anteil}{Stoch.\ Anteil} = \frac{Motorhauptordnungen}{Motornebenordnungen} \qquad \text{(Gl. 6.17)}$$

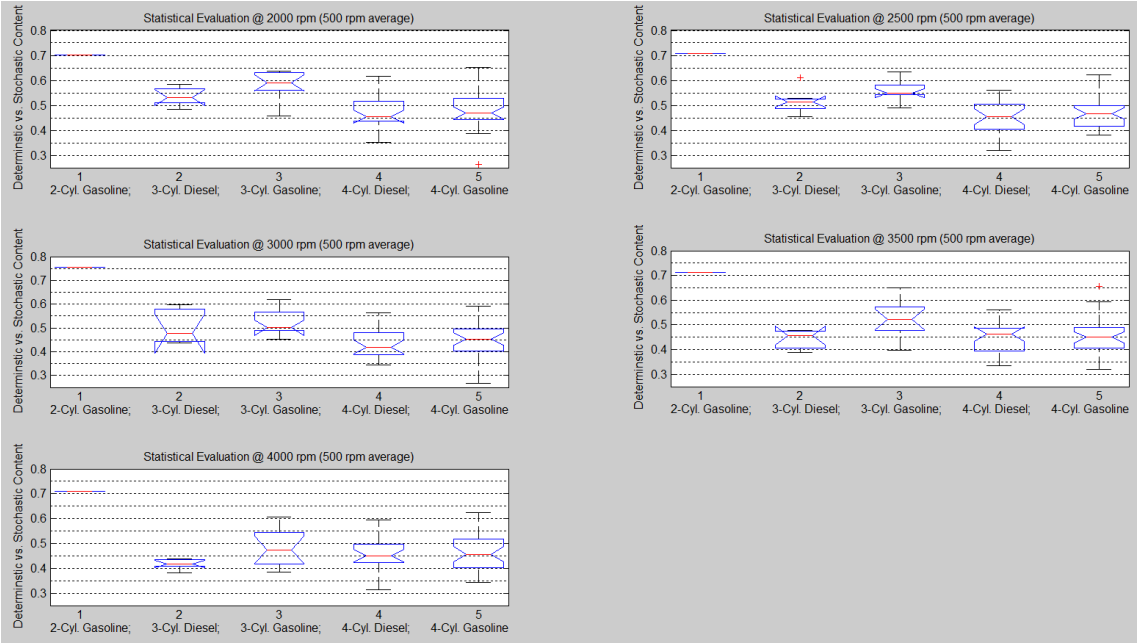


Abbildung 6-35: Boxplots deterministischer vs. stochastischer Anteil

Die Untersuchung der Gruppenunterscheidbarkeit wird mittels ANOVA (2 % Irrtumswahrscheinlichkeit) überprüft. Die Unterscheidbarkeit des 2-Zylinderfahrzeuges von allen anderen ist über den gesamten Drehzahlbereich gegeben. Eine Unterscheidbarkeit der 3-Zylindergruppen von den 4-Zylindergruppen ist für beide Brennverfahren bei 2000 und 2500 rpm gegeben. Bei 3000 und 3500 rpm ist nur noch die Unterscheidung von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen mit Ottomotoren möglich. Bei 4000 rpm ist keine Gruppenunterscheidbarkeit mehr gegeben. Zusammengefasst bedeutet das, dass das Verhältnis von deterministischen zu stochastischen Komponenten bei 3-Zylinderfahrzeugen im höheren Drehzahlbereich abnimmt, während es bei 4-Zylinderfahrzeugen (und beim untersuchten 2-Zylinderfahrzeug) relativ konstant bleibt. Auffällig ist außerdem, dass bei den 3-Zylinderfahrzeugen jene mit Ottomotoren einen wesentlich höheren deterministischen Anteil aufweisen als die dieselbetriebenen, ein ähnlicher Trend aber bei 4-Zylinderfahrzeugen nicht erkennbar ist.

6.4. Untersuchung stochastischer Anteile

Die gezeigten Methoden zur Klangfarbenbeschreibung bzw. der Hauptordnungs-Tristimulus basieren auf der Untersuchung der Motorhauptordnungen, also der deterministischen Anteile des Fahrzeuggeräusches. Es wird gezeigt, dass eine Unterscheidbarkeit der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl anhand dieser Komponenten möglich ist. Ebenso ist durch die Verhältnisbildung von deterministischen zu stochastischen Anteilen in einigen Drehzahlbereichen eine Unterscheidung der Gruppen möglich. Eine explizite Untersuchung der

stochastischen Anteile – also dem Hintergrundgeräusch – erfolgt bei all diesen Methoden allerdings nicht.

In diesem Zusammenhang bleibt die Frage offen, ob anhand der stochastischen Anteile der Fahrzeuggeräusche auch eine Charakterisierung für verschiedene Zylinderzahlen möglich ist - das heißt, ob auch ohne Vorliegen von Drehzahl- und Tonhöheneindruck und harmonischer Verhältnisse eine Unterscheidbarkeit anhand der Zylinderzahl gegeben ist.

6.5. Neue Rauigkeit

Da der Begriff der Rauigkeit in der Fahrzeugakustik in Verbindung mit dem Klangcharakter von Motoren mit kleinen Zylinderzahlen häufig genannt wird, wäre die Entwicklung eines dementsprechenden Bewertungsparameters in Zukunft durchaus sinnvoll. Zwar gibt es bereits verschiedenste Indizes zur objektiven Bewertung von Motorrauigkeit, jedoch ermöglicht keiner davon eine Charakterisierung und Unterscheidung der Motoren unterschiedlicher Zylinderzahl. Die folgenden Abschnitte gehen daher kurz auf die Nachteile der verfügbaren Parameter bezüglich dieser Problemstellung ein und geben eine Idee, was bei Entwicklung eines neuen Parameters berücksichtigt werden sollte.

6.5.1. Nachteile der vorhandenen Rauigkeitsparameter

Die vorhandenen Funktionen zur Ermittlung von Motorrauigkeit beruhen auf bewährten Algorithmen und liefern verlässliche Ergebnisse. Die Rauigkeitsalgorithmen ermitteln eine bestimmte Form von Rauigkeit, welche in einem Geräusch mehr oder weniger stark ausgeprägt sein kann.

Jedoch ergeben sich bei subjektiver Bewertung der Fahrzeuggeräusche von Motoren mit unterschiedlichen Zylinderzahlen nicht nur quantitative Unterschiede der Rauigkeit – in Form von mehr oder weniger rau – sondern darüber hinaus auch qualitative Unterschiede. Das heißt, dass unterschiedliche Formen von Rauigkeit beschrieben werden können. Da die vorhandenen Größen zur Rauigkeitsbewertungen nicht auf die nähere Beschreibung einer Rauigkeit eingehen, ist auch die Unterscheidung und Charakterisierung von 2-, 3- und 4-Zylindermotoren mittels dieser Parameter nicht zufriedenstellend möglich.

6.5.2. Idee

Um die subjektiv festgestellten Rauigkeitsunterschiede zwischen den Motoren verschiedener Zylinderzahlen in objektiver Weise darstellen zu können, müssten die unterschiedlich beschriebenen Rauigkeiten mit einem neuen Parameter erfasst werden.

Dieser müsste die Verbindung zwischen den Aussagen zum Rauigkeitsempfinden mit Analysen der entsprechenden Geräusche herstellen und auf eine hohe Korrelation hinsichtlich der subjektiven Bewertung optimiert werden. Eine derartige Parameterentwicklung ist verständlicherweise sehr aufwendig und wird in diesem Zusammenhang deshalb auch nur als

Idee angeführt. Es ist zu vermuten, dass ein entsprechender Parameter die häufig von erfahrenen FahrzeugakusterInnen getätigten Aussagen bezüglich der Rauigkeitsunterschiede bei Motoren kleiner Zylinderzahlen bestätigt.

7. Zusammenfassung, Resümee und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden die Geräuschqualitäten von Motoren kleiner Zylinderzahlen – mit 2, 3 und 4 Zylindern – mit verschiedenen Methoden untersucht. Dies waren einerseits Untersuchungen anhand der von AVL VOICE berechneten akustischen und psychoakustischen Parameter. Dazu wurden für alle Parameter statistische Auswertungen durchgeführt und die Unterscheidbarkeit der Fahrzeuggruppen untersucht. Es stellte sich heraus, dass einige der verfügbaren VOICE-Parameter die Unterscheidung bestimmter Gruppen über den gesamten betrachteten Drehzahlbereich ermöglichen, jedoch mit keinem Parameter die Unterscheidung aller untersuchten Gruppen möglich ist. Die besten Ergebnisse anhand eines einzelnen Parameters sind für den Extended Articulation Index zu erwarten, der eine gute Unterscheidbarkeit von 3- und 4-Zylinderfahrzeugen gleicher Brennverfahren ermöglicht. Um allerdings eine bessere Unterscheidbarkeit der Gruppen zu erreichen, wurden drei der VOICE-Parameter - Lautheit nach ISO 532B, Extended Articulation Index und Low Frequency Content - zu einem neuen Parameter kombiniert. Für die drei Grundgrößen wurden Gewichtungsfaktoren ermittelt, um die Unterscheidbarkeit der Gruppen zu optimieren.

Eine getrennte Betrachtung der Fahrzeuge in zwei Clustern entsprechend der beiden Brennverfahren ist allerdings sinnvoll, da die Geräuschqualität von Fahrzeugen mit Dieselmotoren im Allgemeinen niedriger ist als bei jenen mit Ottomotoren.[168] Der entwickelte Parameter wird als Downsizing Comfort Index (DCI) bezeichnet und zur Bewertung des akustischen Komforts im Innenraum von Fahrzeugen mit 3- und 4-Zylindermotoren verwendet. Dieser kann somit mit einer einzigen Größe beschrieben werden und für ein bestimmtes Fahrzeug mit den Ergebnissen für die bestehende Datenbank verglichen werden. Zur genauen Analyse des Zustandekommens eines bestimmten Parameterwertes müssen die drei Grundgrößen betrachtet werden.

Zusätzlich zu den Untersuchungen der VOICE-Parameter und der beschriebenen Parameterentwicklung wurden die Fahrzeuggeräusche nach aus der Musikalischen Akustik bekannten Aspekten der Harmonielehre und Klangfarbenbeschreibungen bewertet. Dazu wurden die Amplituden der Einhüllenden von Motorordnungen analysiert und die Verbindungen zu konsonanten und dissonanten Intervallen und Klangfarbendefinitionen nach Helmholtz hergestellt. Für diese Methoden wurde die Zündfrequenz als Grundton aufgefasst und folgende Motorordnungen als höhere Teiltöne. Die Datenbasis wurde anhand der Ordnungsanalysen auf Gemeinsamkeiten und Charaktermerkmale der einzelnen Gruppen untersucht. Außerdem wurde die Ausprägung bestimmter Motorordnungen auch in Form von verschiedenen Varianten von Tristimuli ausgewertet und dargestellt. Zwar wurde anhand der genannten Methoden kein

[168] Vgl. Spessert. 1999, S. 508ff.

neuer Parameter definiert, jedoch stellen sie basierend auf den ermittelten Ergebnissen eine aussichtsreiche Alternative zur Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen mit den bisher gängigen Parametern dar. Die ersten Erkenntnisse lassen auf bestimmte Gemeinsamkeiten und Trends schließen. Speziell die Ergebnisse der Klangfarbenuntersuchungen mit dem Gegensatzpaar „voll - leer“ deuten auf deutlich ausgeprägte Unterschiede zwischen den Fahrzeugen unterschiedliche Zylinderzahl hin.

7.2. Umsetzung als Bewertungsparameter in AVL VOICE

Die Umsetzung des entwickelten Parameters in AVL VOICE ist ohne großen Aufwand möglich, da die zugrunde liegenden Größen ohnehin schon berechnet werden. Dazu werden die Grundgrößen entsprechend der ermittelten Faktoren gewichtet und summiert. Die bisher nur diskret an den fünf Drehzahlpunkten definierten Gewichtungsfaktoren werden über den gesamten betrachteten Drehzahlbereich von 1750 bis 4250 rpm interpoliert. Überlegungen sind dabei noch hinsichtlich der Ausweitung des Index auf andere Fahrzustände und einen größeren Drehzahlbereich anzustellen. Dazu werden nach Abschluss dieser Arbeit noch weitere Untersuchungen folgen, um die entsprechenden Wertebereiche des Index für die Erweiterungen zu ermitteln und interpretieren zu können. Eine Darstellung für stationäre Zustände wird weniger Aussagekraft haben, da das akustische Feedback des Motors dabei gering ist und die Unterschiede zwischen den Fahrzeugen somit wesentlich geringer ausfallen werden. Dies haben erste Untersuchungen auch schon gezeigt.

Auch haben erste Untersuchungen gezeigt, dass vor allem im Bereich höherer Drehzahlen (also oberhalb von 4250 rpm) die Unterschiede zwischen den Gruppen tendenziell kleiner werden. Dies lässt sich in gewisser Weise jedoch durch eine im Allgemeinen schlechter bewertete Geräuschqualität (sichtbar z.B. auch bei Annoyance, Harshness Index) in diesen Bereichen nachvollziehen. Für eine Ausweitung in niedrigere Drehzahlbereiche bis hinunter zur Startdrehzahl werden ebenfalls noch genauere Analysen zu tätigen sein. Diese Themen werden jedoch nach Abschluss dieser Arbeit vor der endgültigen Implementierung des Index in AVL VOICE noch behandelt werden.

Eine Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse aus den vorgestellten Methoden zur Analyse von Motorordnungsspektren in Form von Bewertungsgrößen für Motorgeräusche ist als zukünftiges Thema interessant, da diese Aspekte bisher nur wenig betrachtet wurden.

7.3. Einsatz bei höheren Zylinderzahlen

Bis zum momentanen Zeitpunkt existieren verlässliche Auswertungen anhand des DCI nur für Fahrzeuge mit Motoren kleiner Zylinderzahl aus der verwendeten Datenbasis, da in der Problemstellung Downsizing eine wesentliche Rolle spielt und dieses Thema vor allem bei kleinen Fahrzeugen aktuell ist. Das heißt, dass für Fahrzeuge anderer Klassen und mit anderen

Motoren bisher keine Vergleichswerte vorhanden sind. Jedoch ist zu erwarten, dass in Zukunft auch vermehrt Downsizing für größere Fahrzeuge und größere Motoren betrieben werden wird. Das heißt, dass beispielsweise auch 6- oder 8-Zylindermotoren betroffen sein werden. Daneben ist auch bei größeren Motoren das temporäre Abschalten von Zylindern eine immer häufiger eingesetzte Technologie.

Somit ist eine Ausdehnung der Auswertungen auf andere Fahrzeugklassen und größere Motoren zukünftig sinnvoll und angestrebt. Dabei sollen die Grundstrukturen und die Zusammensetzung des entwickelten Index nicht verändert werden, aber anhand der erweiterten Auswertungen können neue Erkenntnisse für eine größere Datenbasis gewonnen werden.

7.4. Resümee

Die untersuchte Datenbasis stellt eine repräsentative Zusammenstellung von am europäischen Markt verfügbaren diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeugen mit 3 und 4 Zylindern dar. Auf Grund des gewählten Hubraumlimits sind die Fahrzeuge bezüglich deren Größe und Klasse und den akustischen Voraussetzungen vergleichbar und somit als Datenbasis für die Auswertungen gut geeignet.

Die Untersuchung der bestehenden VOICE-Parameter lässt einige Bewertungsgrößen erkennen, welche das Potential zur Unterscheidung bestimmter Fahrzeuggruppen in bestimmten Drehzahlbereichen zeigen. Durch die Kombination von Grundparametern ist eine verbesserte Unterscheidbarkeit der Gruppen von Fahrzeugen unterschiedlicher Zylinderzahlen gegeben, jedoch ist eine vollkommene Trennung der Gruppen nicht möglich. Eine statistisch optimierte Kombination von Parametern in Verbindung mit der Verwendung von statistisch optimierten Gewichtungsfaktoren kann die Unterscheidbarkeit der Gruppen erhöhen, jedoch ist die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse schwierig und das Herstellen von Verbindungen zur physikalischen Bedeutung nicht mehr möglich.

Anhand des entwickelten Parameters ist unter den gewählten Voraussetzungen zwar eine Unterscheidung der Gruppen mit gleichem Brennverfahren möglich, jedoch ergeben sich deutliche Überschneidungen der Wertebereiche von Diesel- und Ottomotoren, was anhand der subjektiv generell schlechter bewerteten Geräuschqualität von Dieselmotoren begründet werden kann. Zusammenfassend ist mittels der gewählten Parameterkombination keine generelle Trennung aller Fahrzeuge anhand der Zylinderzahlen möglich. Darauf lag in diesem Zusammenhang aber nicht das Hauptaugenmerk. Zwar sollte im Mittel eine Unterscheidbarkeit der Gruppen möglich sein, was mit dem gewählten Parameterset erfüllt wird, prinzipiell stand aber die Qualitätsbewertung im Vordergrund. Die Lage der Fahrzeuge der Datenbasis zueinander und die Überlagerung der Gruppen unterschiedlicher Zylinderzahl können auch subjektiv gut nachvollzogen werden. Anhand der Vergleiche konkreter Fahrzeugbeispiele konnte die Funktionalität des entwickelten Parameters und dessen praktische Einsetzbarkeit

gezeigt werden. Die Kombination der gewählten Parameter ist aus physikalischer Sicht nachvollziehbar, was im praktischen Einsatz von hoher Relevanz ist.

Die Betrachtungsweisen, die auf den aus der Musikalischen Akustik bekannten Theorien beruhen, stellen spannende Ansätze dar, welche in dieser Form bisher in der Literatur nur wenig Erwähnung finden. Das Potential einiger der untersuchten Methoden für eine Anwendung in der Fahrzeugakustik zur Klangcharakterisierung von Fahrzeugen kleiner Zylinderzahlen konnte gezeigt werden. Dabei wird auch eine Unterscheidbarkeit von Gruppen anhand der Zylinderzahlen ohne Berücksichtigung des Brennverfahrens möglich. Die ermittelten Ergebnisse konnten in ersten informellen Hörversuchen auch subjektiv nachvollzogen werden.

Einen weiteren interessanten Aspekt stellt in diesem Zusammenhang die Untersuchung der Korrelation der verschiedenen Bewertungsmethoden dar, um auch eventuell existierende Verbindungen zwischen den verschiedenen Ansätzen identifizieren und analysieren zu können, welche zu einer Kombination der Erkenntnisse als Grundlage einer Parameterentwicklung führen könnten.

Abschließend sei noch angemerkt, dass neben den präsentierten Methoden der Einsatz anderer Verfahren zur Behandlung der Themenstellung dieser Masterarbeit denkbar ist. Jedoch wurde entsprechend dem Titel die Thematik aus verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet und es konnten unterschiedliche Herangehensweisen zur Untersuchung der Klangcharakteristik von Fahrzeugen mit Motoren kleiner Zylinderzahlen gezeigt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können zum Teil direkt in Form eines neuen VOICE-Parameters umgesetzt werden oder dienen als Basis für die Umsetzung von neuen Bewertungsgrößen.

8. Literaturverzeichnis

ALT, N. und JOCHUM, S., 2003. Sound-Design unter den Aspekten der Harmonielehre der Musik. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift,* 64 (1), pp. 48-56.

AVL ACOUSTIC, 2010. *AVL SOURCE, Artificial Head Measurement Airborne Noise Recordings.*

AVL ACOUSTIC, 2008. *Tools and Products.*

BALAKRISHNAMA, S. und GANAPATHIRAJU, A., 1998. Linear discriminant analysis-a brief tutorial. *Institute for Signal and information Processing,* .

BASSHUYSEN, R.V., 2012. *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Mit mehr als 1300 Literaturstellen.* Wiesbaden: Vieweg & Teubner.

BIERMAYER, W., 2013. *AVL VOICE Appendix 1.* User Manual edn.

BORTZ, J. und SCHUSTER, C., 2010. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: mit 163 Tabellen.* Berlin [u.a.]: Springer.

BRAESS, H. und SEIFFERT, U., 2013. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* Springer Fachmedien Wiesbaden.

BRANDL, S., GRAF, B. und RUST, A., 2012. NVH challenges and solutions for vehicles with low CO2 emission. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,* 5 (3), pp. 1084-1090.

CIGLAR, M., 2009. The temporal character of timbre.

DIN, D., 2008. 45631/A1. *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum-Verfahren nach E.Zwicker-Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche,* .

EUROPÄISCHES PARLAMENT, 2007. *Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge.* Verordnung edn. o.O.: .

FASTL, H. und ZWICKER, E., 2007. *Psychoacoustics: facts and models.* Springer.

FELDBAUER, C. und HÖLDRICH, R., 2000. Realization of a Vold-Kalman Tracking Filter - A Least Squares Problem, *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects, DAFX* 2000, pp. 1-4.

FRANK, M., 2011. *Unterlagen zur LV Aufnahmeanalyse SS 2011.*

GRABER, G. und WESELAK, W., 2008. Technical report, Institut für Breitbandkommunikation, Technische Universität Graz.

GRAF, B., BRANDL, S., SONTACCHI, A. und GIRSTMAIR, J., 2013. Objektive Parameter zur Bewertung der Motorgeräuschqualität. MTZ-Motortechnische Zeitschrift, 74 (6), pp. 478-483.

GRAF, B., RESCH, M., BIERMAYER, W., MAUNZ, C. und STÜCKLSCHWAIGER, W., 2011. *CO2 Reduction and NVH Effects, Sound Engineering for Downsized Powertrain, AAC 2011.* Präsentation edn.

GRAF, B., RESCH, M., MAUNZ, C., DOLINAR, A. und BRANDL, S., 2011. Sound Engineering for Downsized Engines. *Presented at the JSAE Annual Congress on 05, 18, 2011,* .

HEAD ACOUSTICS GMBH, 1993. *Binaural Sound Measurement Manual. A New Start for Hearing-adapted Classification of Noise, Appendix A.*

HEMMECKE, J., 2012. Handbuch der Repertory Grid Technik.

HERLUFSEN, H., GADE, S., KONSTANTIN-HANSEN, H. und VOLD, H., 2000. Characteristics of the Vold-Kalman order tracking filter, *Acoustics, Speech, und Signal Processing, 2000. ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on* 2000, IEEE, pp. 3895-3898.

HÖLDRICH, R., 2008. *Musikalische Akustik 1+2, Skriptum zur Vorlesung - WS 2008/09.*

KELLER, D., 22.10.2012, 2012-last update, Interpretation von Konfidenzintervallen [Homepage of Keller,Daniela], [Online]. Available: http://www.statistik-und-beratung.de/2012/10/interpretation-von-konfidenzintervallen/ [19.02.2014, 2014].

KIEBUSCH, S., RICHTER, E. und WEILAND, J., 2005. Metriken: Definition und Validierung.

KOPP, JOHANNES und LOIS, D., Binäre logistische Regression.

LEE, S., 2008. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration. *Journal of Sound und Vibration,* 310 (1), pp. 149-168.

LEE, S. und LEE, H., 2009. Objective evaluation of interior noise booming in a passenger car based on sound metrics and artificial neural networks. *Applied Ergonomics,* 40 (5), pp. 860-869.

MARTNER, O., ZERBS, C., FEY, U., KRAGL, R. und MÜLLER, A., 2000. Neues psychoakustisches Modell zur objektiven Bestimmung der Rauigkeit bei Verbrennungsmotoren. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift,* 61 (10), pp. 678-685.

MAUCH, A., TOPHOVEN, J., TRZEBIATOWSKI, T. und RAATZ, T., 2011. Potenziale und Grenzen des Downsizings beim Dieselmotor. *Motortechnische Zeitschrift,* 72 (7/8).

MÜLLER, G., 2004. *Taschenbuch der technischen Akustik.* Berlin [u.a.]: Springer.

ÖSTERREICHISCHER ARBEITSRING FÜR LÄRMBEKÄMPFUNG, 1994. *Psychoakustik: gehörbezogene Lärmbewertung ; Tagungsband des internationalen Seminars ; im Kongreßzentrum Innsbruck-Igls, 12. - 15. März 1993.* Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie.

PISCHINGER, S., LANGE, B., HEUER, S. und HOPPERMANNS, J., 2006. Objektivierung subjektiver Geräuschbeurteilungen. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift,* 67 (11), pp. 896-904.

PISCHINGER, S., MIRLACH, R., HEUER, S. und SILIES, A., 2009. Akustik neuer ottomotorischer Brennverfahren. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift,* 70 (10), pp. 770-777.

RESCH, S. und MAST, P., 2006. Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und-komponenten.

SCHÜRMANN, G. und PHILIPP, U., 2013. NVH bei Downsizing-Motoren (Vorstudie), NVH-Verhalten künftiger Antriebskonzepte mit kleinen Verbrennungsmotoren (Körper- und Luftschallbereich), Abschlussbericht. *FVV Heft 1027 - 2013,* (1027), pp. 1-247.

SIEGEMUND, J., 2003. *Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis), Proseminar "Robuste Signalidentifikation" WS 2003/04.*

SOTTEK, R., 1993. *Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör.*

SPESSERT, B., 1999. Geräuschreduktion von Viertakt—Diesel-und Ottomotoren—Rückblick und Stand der Technik Teil 1. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift,* 60 (7-8), pp. 508-517.

TSCHÖKE, H. et al., 2003. *Motor- und Aggregate-Akustik.* Renningen: expert-Verl.

ZELLER, P., 2009. *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch; mit 43 Tabellen.* Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

ZIEGENRÜCKER, W., 1997. ABC Musik—Allgemeine Musiklehre .*Wiesbaden: Breitkopf & Härtel*.

9. Anhang

9.1. Fahrzeugliste

Tabelle 9-1 zeigt die Fahrzeuge, welche die Datenbasis für die in dieser Arbeit dokumentierten Untersuchungen darstellen.

Tabelle 9-1: Liste der untersuchten Fahrzeuge

2-zyl_gasoline_Fiat 500 0.9l TwinAir	4-zyl_diesel_Renault Megane 1.5 dCi
3-zyl_diesel_Hyundai i10 1.1 CRDi	4-zyl_diesel_Renault Scenic 1.5 dCi
3-zyl_diesel_Hyundai Matrix 1.5 CRDi	4-zyl_diesel_Toyota Auris 1.4 D-4D
3-zyl_diesel_Skoda Fabia 1.4 TDI	4-zyl_diesel_Toyota Yaris 1.4l D-4D
3-zyl_diesel_Skoda Fabia 1.4 TDI1	4-zyl_diesel_VW Polo V 1.6 TDI 75HP
3-zyl_diesel_Smart Fortwo 0.8l cdi	4-zyl_diesel_VW Polo V 1.6 TDI 90HP
3-zyl_diesel_VW Polo 1.4 TDI	4-zyl_gasoline_Alfa Romeo MiTo 1.4 16V
3-zyl_diesel_VW Polo IV 1.4 TDI	4-zyl_gasoline_Alfa Romeo MiTo 1.4 TB
3-zyl_gasoline_Chevrolet Matiz 0.8l SE	4-zyl_gasoline_Audi A3 1.6
3-zyl_gasoline_Citroen C1 1.0	4-zyl_gasoline_Audi A3 Sportback 1.4 TFSI COD
3-zyl_gasoline_Ford Focus	4-zyl_gasoline_Chevrolet Kalos 1.4 SX
3-zyl_gasoline_Nissan Pixo 1.0	4-zyl_gasoline_Citroen C3 1.4 SX
3-zyl_gasoline_Opel Corsa 1.0	4-zyl_gasoline_Fiat 500 1.4 16V
3-zyl_gasoline_Peugeot 107 1.0l	4-zyl_gasoline_Fiat Grande Punto 1.4
3-zyl_gasoline_Seat Ibiza 1.2	4-zyl_gasoline_Ford Fiesta 1.3
3-zyl_gasoline_Skoda Citigo 1.0 MPI GreenTec	4-zyl_gasoline_Ford Focus 1.6
3-zyl_gasoline_Skoda Fabia 1.2 HTTP	4-zyl_gasoline_Honda Jazz 1.2 i-Dsi
3-zyl_gasoline_Subaru Justy 1.0	4-zyl_gasoline_Honda Jazz 1.2l i-VTEC
3-zyl_gasoline_Suzuki Splash 1.0	4-zyl_gasoline_Hyundai Accent 1.3
3-zyl_gasoline_Toyota Yaris 1.0 VVT-i	4-zyl_gasoline_Hyundai Getz 1.3 GLS
3-zyl_gasoline_VW Polo 1.2l	4-zyl_gasoline_Kia Pro C'eed 1.4

4-zyl_diesel_Citroen C3 1.4 CRDi	4-zyl_gasoline_Mercedes A180
4-zyl_diesel_Citroen DS4 1.6 HDi	4-zyl_gasoline_Mercedes B180
4-zyl_diesel_Fiat Bravo 1.6 Multijet	4-zyl_gasoline_Mini Cooper 1.6
4-zyl_diesel_Fiat Grande Punto 1.3 JTD	4-zyl_gasoline_Mini One 1.6
4-zyl_diesel_Ford Fiesta 1.4 TDCi	4-zyl_gasoline_Opel Astra 1.4
4-zyl_diesel_Ford Focus 1.6l TDCi	4-zyl_gasoline_Opel Astra 1.6i
4-zyl_diesel_Hyundai Getz 1.5 CRDi	4-zyl_gasoline_Peugeot 308 HB 1.6l
4-zyl_diesel_Hyundai i30 1.6 CRDi old	4-zyl_gasoline_Renault Clio 1.2
4-zyl_diesel_Kia Rio 1.5 CRDi	4-zyl_gasoline_Skoda Fabia 1.4
4-zyl_diesel_Nissan Note 1.5 dCI	4-zyl_gasoline_Skoda Octavia 1.6 MPI
4-zyl_diesel_Nissan Qashqai 1.5 DCi	4-zyl_gasoline_Volvo C30 1.6
4-zyl_diesel_Opel Corsa 1.3 CDTi	4-zyl_gasoline_VW Bora 1.6 FSI
4-zyl_diesel_Peugeot 207 1.6 HDi	4-zyl_gasoline_VW Golf V 1.4 FSI
4-zyl_diesel_Peugeot 307 1.4 HDI XT	4-zyl_gasoline_VW Golf V 1.4 GT TSI
4-zyl_diesel_Peugeot 307 1.6 HDI	4-zyl_gasoline_VW Golf V 1.4 TSI
4-zyl_diesel_Peugeot 308 1.6 HDI	4-zyl_gasoline_VW Golf VI 1.4 TSI DSG
4-zyl_diesel_Peugeot 407 SW 1.6l HDI	4-zyl_gasoline_VW Golf VI 1.4 TSI
4-zyl_diesel_Renault Clio 1.5 dCi	4-zyl_gasoline_VW Golf VI 1.4

9.2. Liste der AVL VOICE-Parameter

Insgesamt werden von AVL VOICE 30 akustische und psychoakustische Parameter zur Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen berechnet. Diese sind jeweils mit Zeit- und Drehzahlbezug verfügbar und in Tabelle 9-2 aufgelistet. Anhand der Spaltennummern können die Parameterdaten aus den *.txt-Files auf der beiliegenden CD-ROM ausgelesen werden.

Tabelle 9-2: AVL VOICE-Parameter[169]

3	Linear SPL	13	Roughness (AVL)	23	Sportiness (Japan)
4	A-weighted SPL	14	Articulation Index	24	DOC Power
5	B-weighted SPL	15	Ext. Articulation Index	25	REO Power
6	C-weighted SPL	16	Low Frequency Content	26	Powerfulness
7	D-weighted SPL	17	Standard Deviation	27	Luxury
8	AD-weighted SPL	18	Impulsiveness (Kurtosis)	28	Evenness
9	Loudness ISO 532B	19	Annoyance (Europe)	29	unweighted Sharpness
10	Sharpness (Aures)	20	Engine Speed Change	30	Annoyance (Japan)
11	Sharpness (Zwicker)	21	DOC Sport	31	CKI
12	Tonality	22	Sportiness (Europe)	32	Harshness Index

9.3. Berechnungstabelle des Articulation Index

Tabelle 9-3 enthält die Werte zur Berechnung des Articulation Index (siehe Abschnitt 2.6.3.3).

Tabelle 9-3: Berechnungstabelle des Articulation Index[170]

Pegel [dB]	Frequenz [Hz]															
	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
75																
74					0.15	0.17	0.22									
73					0.30	0.35	0.43	0.24								
72				0.14	0.45	0.52	0.65	0.48								
71				0.28	0.60	0.70	0.87	0.72	0.28							
70			0.11	0.43	0.75	0.87	1.08	0.96	0.56							
69			0.22	0.57	0.90	1.05	1.30	1.20	0.85	0.38						
68		0.06	0.32	0.71	1.05	1.22	1.52	1.45	1.13	0.76						
67		0.13	0.43	0.85	1.20	1.40	1.74	1.69	1.41	1.15						
66		0.20	0.54	0.99	1.35	1.57	1.95	1.93	1.70	1.53	0.36					

[169] Vgl. Biermayer. 2013.
[170] Vgl. Head Acoustics GmbH. 1993, S. 19

65		0.27	0.65	1.14	1.50	1.75	2.17	2.17	1.98	1.92	0.73					
64		0.33	0.76	1.28	1.65	1.92	2.38	2.41	2.26	2.30	1.10	0.32				
63	0.03	0.40	0.86	1.42	1.80	2.10	2.60	2.65	2.54	2.68	1.46	0.63				
62	0.06	0.47	0.97	1.56	1.95	2.28	2.82	2.89	2.83	3.06	1.83	0.95	0.30			
61	0.10	0.53	1.08	1.70	2.10	2.45	3.04	3.13	3.11	3.45	2.20	1.27	0.60			
60	0.13	0.60	1.19	1.85	2.25	2.62	3.25	3.38	3.39	3.83	2.56	1.58	0.90			
59	0.17	0.67	1.30	1.99	2.40	2.80	3.47	3.62	3.68	4.22	2.93	1.90	1.20	0.24		
58	0.20	0.73	1.40	2.13	2.55	2.98	3.69	3.86	3.96	4.60	3.30	2.22	1.50	0.52		
57	0.23	0.80	1.51	2.27	2.70	3.15	3.90	4.10	4.24	4.97	3.66	2.54	1.80	0.77		
56	0.27	0.87	1.62	2.41	2.85	3.32	4.12	4.34	4.52	5.36	4.02	2.85	2.10	1.03		
55	0.30	0.93	1.73	2.55	3.00	3.50	4.34	4.58	4.81	5.75	4.39	3.17	2.40	1.29	0.21	
54	0.33	1.00	1.84	2.70	3.15	3.67	4.56	4.82	5.09	6.13	4.76	3.48	2.70	1.55	0.42	
53	0.37	1.07	1.94	2.84	3.30	3.85	4.77	5.06	5.37	6.51	5.12	3.80	3.00	1.80	0.62	
52	0.40	1.13	2.05	2.98	3.45	4.02	4.99	5.30	5.66	6.90	5.48	4.12	3.30	2.06	0.83	
51	0.43	1.20	2.16	3.12	3.60	4.20	5.21	5.54	5.94	7.28	5.85	4.44	3.60	2.32	1.04	
50	0.47	1.27	2.27	3.26	3.75	4.37	5.43	5.79	6.22	7.66	6.22	4.76	3.90	2.58	1.25	0.08
49	0.50	1.33	2.38	3.40	3.90	4.55	5.64	6.02	6.51	8.04	6.58	5.07	4.20	2.84	1.45	0.16
48	0.53	1.40	2.46	3.55	4.05	4.72	5.86	6.26	6.79	8.42	6.95	5.38	4.50	3.10	1.66	0.25
47	0.57	1.47	2.60	3.69	4.20	4.90	6.08	6.51	7.07	8.81	7.32	5.70	4.80	3.35	1.87	0.33
46	0.60	1.53	2.70	3.83	4.35	5.07	6.29	6.75	7.36	9.20	7.68	6.02	5.10	3.61	2.08	0.41
45	0.63	1.60	2.81	3.98	4.50	5.25	6.50	7.00	7.64	9.58	8.05	6.34	5.40	3.87	2.28	0.50
44	0.67	1.67	2.92	4.12				7.25	7.92	9.96	8.41	6.66	5.70	4.13	2.50	0.58
43	0.70	1.73	3.02	4.25					8.21	10.34	8.78	6.97	6.00	4.38	2.70	0.66
42	0.73	1.80	3.14						8.50	10.72	9.15	7.29	6.30	4.64	2.91	0.75
41	0.77	1.87	3.25							11.10	9.51	7.61	6.60	4.90	3.12	0.83
40	0.80	1.93								11.50	9.88	7.92	6.90	5.16	3.33	0.91
39	0.83	2.00									10.23	8.24	7.20	5.42	3.53	0.99
38	0.87										10.60	8.56	7.50	5.67	3.74	1.08
37	0.90										11.00	8.87	7.80	5.93	3.95	1.16
36	0.93											9.20	8.10	6.20	4.16	1.24
35	0.97											9.50	8.40	6.45	4.37	1.33
34	1.00												8.70	6.71	4.57	1.41
33													9.00	6.96	4.78	1.49
32														7.22	4.99	1.58

31														7.48	5.20	1.66
30														7.75	5.41	1.74
29															5.62	1.82
28															5.82	1.91
27															6.03	1.99
26															6.25	2.08
25																2.16
24																2.24
23																2.32
22																2.41
21																2.50
20																

9.4. Erklärung zur beiliegenden CD-ROM

Auf der beiliegenden CD-ROM befinden sich alle für die durchgeführten Untersuchungen relevanten Daten zu den Fahrzeugen der Datenbasis. In den *.txt-Files sind die Tabellen aller verfügbaren VOICE-Parameter mit Zeitbezug (1. Spalte) und Drehzahlbezug (2. Spalte) abgelegt. Die weiteren Spalten (3 bis 32) enthalten die Werte der Parameter entsprechend Tabelle 9-2.

Die *.wav-Dateien enthalten die Zweikanal-Kunstkopfaufnahmen aller Fahrzeuge für den Volllasthochlauf im 2. Gang. Der Drehzahlbezug kann über das LSB hergestellt werden. Bei jeder vollen Motorumdrehung erfolgt im LSB der Eintrag von zweimal „1“. Aus dem zeitlichen Abstand zwischen diesen Einträgen kann die Frequenz bzw. bei Multiplikation mit 60 die Drehzahl in Umdrehungen/Minute (rpm) abgeleitet werden.

In den *.m-Files sind die Implementierungen für die Auswertungen in MATLAB® verfügbar. Eine Erklärung der Handhabung ist anhand der ebenfalls enthaltenen Guide-Datei verfügbar.

Sämtliche Daten der Datenbasis sind Eigentum der Fachabteilung für Vehicle und Powertrain Acoustics der AVL List GmbH und dürfen somit nicht an Dritte weitergegeben werden.

9.5. Formblatt über die Einhaltung der Richtlinien für schriftliche Arbeiten an der Kunstuniversität Graz

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass mir der *Leitfaden für schriftliche Arbeiten an der KUG* bekannt ist und ich diese Richtlinien eingehalten habe.

Graz, den……...

……

Unterschrift der Verfasserin / des Verfassers

Leitfaden für schriftliche Arbeiten an der KUG (laut Beschluss des Senats vom 14. Oktober 2008)