

Klangcharakteristiken zur Binnendifferenzierung verschiedener Fahrzeugklassen

Toningenieur-Projekt

Lina Alexandra Reitz

Betreuung: Dr. Alois Sontacchi

Graz, 5. Juni 2018



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Die Entwicklung von Elektromotoren in der Automobilbranche, welche kaum einen eigenen charakteristischen Klang besitzen, schreitet stet voran. Diese benötigen für die Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien sowie für das individuelle unmittelbare Monitoring eine akustische Repräsentation. Ein möglicher Ausgangspunkt für diese akustische Repräsentation stellt die eingehende Untersuchung und damit verbundene Klangbeschreibung von bestehenden Verbrennungsmotoren dar. Die Beschreibung der Klangcharakteristiken von Fahrzeuginnen- und -außengeräuschen werden im Rahmen dieser Arbeit behandelt. In der gängigen Motorakustik wird für die Klangcharakterisierung nur eine begrenzte Auswahl von Beschreibungsgrößen wie die Lautheit verwendet. Diese sind für die gesamtheitliche akustische Wahrnehmung unzureichend, daher werden die nachfolgenden Größen auf ihre differenzierten Beschreibungsmöglichkeiten hier untersucht. So sollen Aspekte wie die wahrgenommene Tonhöhe, die Ausprägung von Akkordstrukturen sowie Formanten behandelt werden.

Abstract

The development of the electric car that does not have its own characteristic sound is advancing continuously. In order to meet the legal guidelines and to enable the individual immediate monitoring, an acoustical representation for these cars has to be found. A possible starting point for that acoustical representation is the detailed examination and therewith description of the sound of existing combustion engines. The characteristics of timbre of interior and exterior vehicle sounds will be investigated in the course of this work. Established motor acoustics uses a quite limited set of descriptive quantities such as loudness. For assessing the holistic acoustic perception this is not sufficient, therefore the following quantities will be examined in their ability to sophisticatedly describe the timbre. Aspects such as pitch salience, the occurrence of chord structure, as well as formants will be reviewed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Datensätze	4
1.1.1	Strukturierung der Daten	5
2	Analyse der Daten	6
2.1	Formantstruktur	6
2.1.1	Berechnung der Formanten	6
2.1.2	Ergebnisse der Formantberechnung	16
2.2	Tonhöhe	30
2.2.1	Berechnung der virtuellen Tonhöhe	30
2.2.2	Ergebnisse der Berechnung der virtuellen Tonhöhe	35
2.3	Harmonische Strukturen	44
2.3.1	Berechnung der harmonischen Struktur	44
2.3.2	Ergebnisse der Harmoniebestimmung	46
3	Diskussion der Ergebnisse	56
A	Mittlere kumulierte Energieverläufe	58
B	Nomenklatur	64
B.1	Lateinische Zeichen	64
B.2	Griechische Zeichen	65
B.3	Abkürzungen	65
	Literatur	66

1 Einleitung

Ein charakteristischer Klang ist essentiell für die Wahrnehmung eines Autos. Einerseits zur Ortung im Straßenverkehr für Passanten, andererseits auch als Basis für die Unterscheidbarkeit unterschiedlicher Marken und Produkte. Diese Art der Charakterisierung fällt bei Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb weg. Da das fehlende Geräusch insbesondere für sehbehinderte Menschen ein Sicherheitsrisiko darstellt, gibt es mittlerweile gesetzliche Vorschriften, dem elektrischen Fahrzeug mittels Sound Design seinen eigenen charakteristischen Klang als akustisches Warnsystem zu verleihen. Bis zum 1. Juli 2019 muss in neuen Typen ein System in Elektro- und Hybridfahrzeugen verbaut werden, das „ein Dauerschallzeichen [erzeugt], das Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer [...] warnt“ [1]. Laut der EU-Verordnung Nr. 540/2014 muss das Schallzeichen „mit dem Geräusch eines mit Verbrennungsmotor ausgestatteten Fahrzeugs der gleichen Klasse vergleichbar sein“. Der Klang der Verbrennungsmotoren - oder zumindest gewisse Klangfarbenelemente - sollen daher als Inspiration für die Gestaltung des Elektromotoren-Sounds dienen.

Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten für die Beschreibung der Klangfarbe des Motorengeräusches von Verbrennungsmotoren zu finden. Dabei werden verschiedene Beschreibungsparemeter untersucht. Dafür wird ein umfangreicher Datensatz untersucht, der Daten von diversen Personenkraftwagen unterschiedlicher Typen und Fabrikate enthält. Durch dieses breite Spektrum ist es gewährleistet, dass fundierte Aussagen über die vorhandenen Klangcharakteristiken getroffen werden können.

1.1 Datensätze

Die verwendeten Daten wurden von der AVL List GmbH gemessen und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Der bereit gestellte Datensatz enthält Audiodaten zu 496 Personenkraftwagen (PKWs) unterschiedlicher Motorisierungen und Fabrikate. Es wurden die verschiedenen Fahrzeuge während unterschiedlicher Belastungszustände vermessen. Die Variation der Belastung reichte von Schubetrieb bis Vollast. Des Weiteren wurden die Messungen sowohl in der zweiten als auch in der dritten Gangstufe durchgeführt. Eine genauere Erläuterung zum Inhalt des Datensatzes ist in Unterunterabschnitt 1.1.1 zu finden.

Die Daten stehen einerseits in Form von Audio-Aufnahmen zur Verfügung. Die Aufnahmen liegen als Stereo-Signal vor, für die Analyse wird der linke Kanal gewählt, da dieser der Position des Fahrerohrs näher ist. Die Abtastrate der Aufnahmen liegt bei 48 kHz. Für die weitere Verarbeitung werden die Daten allerdings zehnfach unterabgetastet, also mit einer Abtastrate von $f_s = 4800$ Hz, um die Dateigröße zu vermindern. Da keine relevanten Daten im Frequenzbereich oberhalb von 2400 Hz vorhanden sind, ist dies nach vorheriger Tiefpass-Filterung zulässig. Es reduziert sich so die zu verar-

beitende Datenmenge erheblich und eine schnellere Analyse wird ermöglicht. Des Weiteren wurden die Daten in Form von Ordnungsanalysen für jedes Fahrzeug bereit gestellt. Die Ordnungsanalyse zeigt - vergleichbar mit einem Spektrogramm - die Amplitude verschiedener Frequenzanteile in Abhängigkeit von der Drehzahl. Die Frequenzen werden dabei auf die Drehzahl des Motors normiert. Jedes ganzzahlige Vielfache der Motordrehzahl entspricht einer Ordnung.

1.1.1 Strukturierung der Daten

Die Audiodaten werden nach Anzahl der Zylinder des Fahrzeugs (2 bis 12 Zylinder) und der Treibstoffart (Benzin oder Diesel) kategorisiert. Die Strukturierung ist in Tabelle 1 ersichtlich. Insgesamt werden 496 Datensätze untersucht.

Innerhalb dieser Gruppen wird nach eingelegtem Gang (zweiter oder dritter Gang) und nach Lastzuständen unterschieden. Diese Lastzustände werden in drei Bereiche eingeteilt:

- Schubbetrieb / Rekuperation
- Teillast: 0,05g, 0,10g und 0,20g
- Vollast: 0,40g / Vollast

Für diese Gruppen werden nun die verschiedenen Untersuchungen zur Beschreibung der Klangfarbe durchgeführt.

Zylinderanzahl	Datensätze Diesel	Datensätze Benzin
2	-	4
3	19	67
4	110	86
6	41	87
8	-	70
10	-	6
12	-	6
Gesamtanzahl	170	326

Tabelle 1 – Strukturierung der Daten

2 Analyse der Daten

2.1 Formantstruktur

Formanten als Merkmal der Klangfarbe. Die Formanten geben Aufschluss darüber, bei welchen Frequenzen im Fahrzeug Resonanzen auftreten. Dabei sollten die untersuchten Resonanzen nicht vom Fahrzeugchassis abhängig sein. Im Spektrogramm treten diese als ein Drehzahl unabhängiges starkes Frequenzband auf. Besonders stark sind sie zu sehen, wenn sie von einer starken Motorordnung durchlaufen und somit angeregt werden. Von Interesse ist nun, ob sich die verschiedenen Fahrzeuge in verschiedenen Betriebszuständen in der Lage ihrer Formanten merklich voneinander unterscheiden bzw. ob für bestimmte Motorentypen bestimmte Formanten vorherrschend anzutreffen sind. Können solche Unterschiede festgestellt werden, würde es so ermöglicht, über die Formanten die Unterschiede in der Klangfarbe genauer zu beschreiben und die einzelnen Fahrzeugklassen genauer zu charakterisieren.

2.1.1 Berechnung der Formanten

Zur Berechnung der Formanten werden zwei verschiedene Methoden genutzt. Einerseits werden die Formanten über das Cepstrum bestimmt, und andererseits mittels Linear Predictive Coding (LPC). Die beiden Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

Formantbestimmung mittels Cepstrum. Im cepstralen Bereich ist es möglich, jene Frequenzkomponenten zu identifizieren, die sich nur langsam ändern. Im Quelle-Filter-Modell entspricht dies dem Filter.

Die Vorgehensweise bei der Analyse wird im folgenden Flussdiagramm dargestellt und ist an [3] angelehnt. Die einzelnen Elemente des Diagramms werden im Anschluss daran im Detail erläutert. Die Abbildungen basieren auf den Daten eines beispielhaft ausgewählten Fahrzeugs. Es handelt sich dabei um ein Vierzylinder-Dieselfahrzeug, das unter Vollast im 3. Gang betrieben wird.

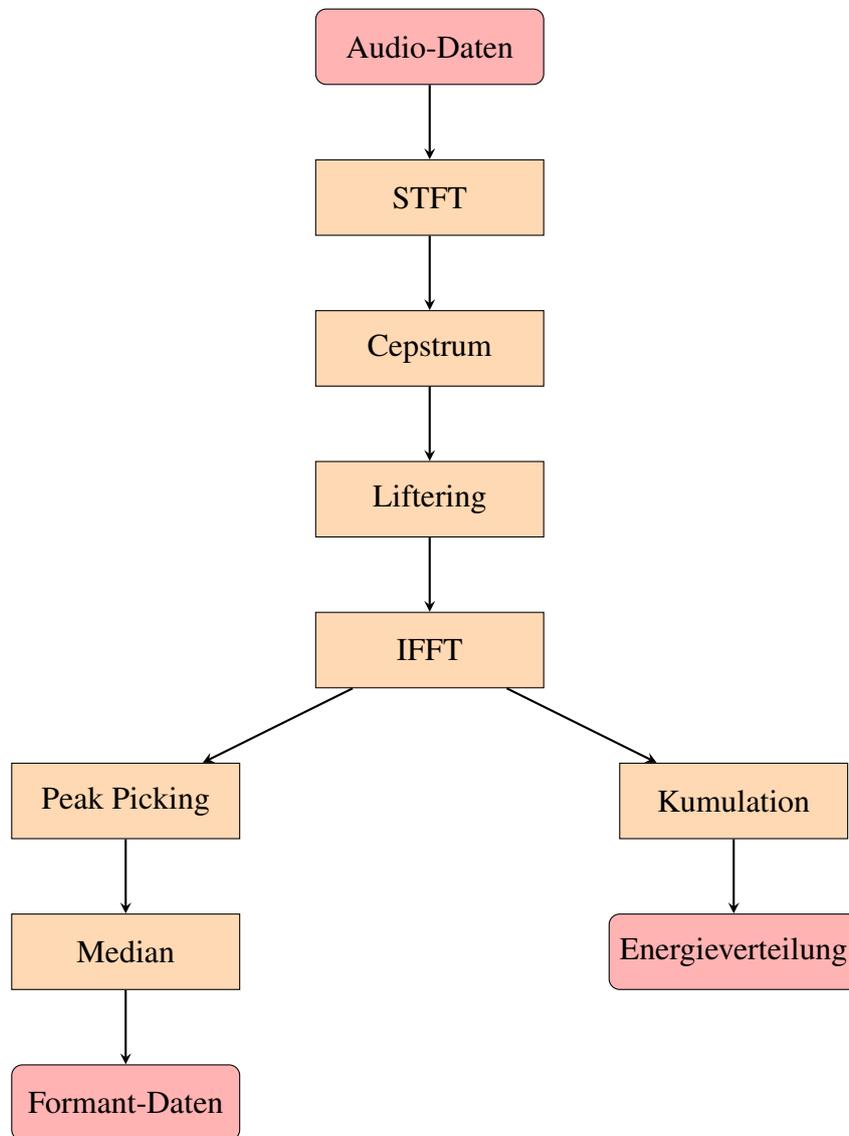


Abbildung 1 – Flussdiagramm zur Extraktion der Formanten mittels Cepstrum

Spektrogramm - STFT. Die Audio-Daten mit der Abtastrate $f_s @ 4,8 \text{ kHz}$ werden im ersten Schritt einer Kurzzeitfourieranalyse unterzogen. Dazu wird das Signal in M Blöcke mit 2048 Samples (ca. 0,427 s Länge) aufgeteilt, die sich jeweils zur Hälfte (Hop Size $H_s = 1048$) überlappen. Nach der Fensterung mit einem Hann-Fenster $w(n)$ mit der Länge von 2048 Samples, wird auf die Daten eine 2048-Punkte-FFT angewendet. Die Daten liegen nicht mit gleichen Aufnahmepegeln vor, daher werden diese zur besseren Vergleichbarkeit auf einen einheitlichen Pegel von 90 dB_A normiert. Dies hat keinen Einfluss auf Lage und Ausprägung der Formanten und ist somit zulässig.

$$X(k, m) = \sum_{n=1}^N x(n + m \cdot H_s) \cdot w(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad \begin{array}{l} N = 2048 \\ m \in [0, M] \\ n \in [1, N] \\ k \in [0, N - 1] \end{array} \quad (1)$$

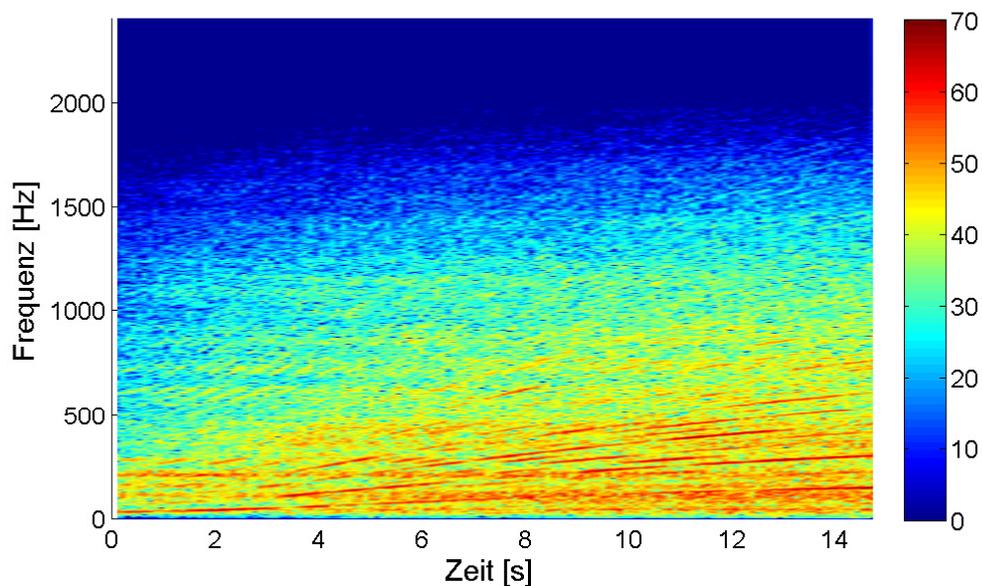


Abbildung 2 – Beispiel eines Spektrogramms

Cepstrum. Aus den einzelnen Kurzzeitfourierspektren $X(k, m)$ wird nun jeweils das Cepstrum $c(n, m)$ berechnet.

$$c(n, m) = \sum_{k=1}^N \log |X(k, m)| e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (2)$$

Liftering. Im cepstralen Bereich wird nun ein Lifter $l(n)$ auf die Daten angewendet, um die Formanten zu extrahieren. Der Lifter hat die Form eines Rechtecks und schneidet aus dem Cepstrum die unteren 15 Quefrenzpunkte heraus (Abbildung 3). Transformiert man dieses geliftete Cepstrum wieder in den spektralen Bereich, erhält man ein geglättetes Spektrum (Abbildung 4), das prominente Frequenzkomponenten hervorhebt und weniger Feinstruktur zeigt. So erhält man nach der Rücktransformation eine Beschreibung des Übertragungsverhaltens des mechanischen Systems, das die Formanten hervorbringt. Für die verschiedenen Motorentypen und Belastungszustände ergeben sich unterschiedliche mechanische Systeme, welche sich in Lage und Ausprägung ihrer Formanten unterscheiden können.

Durch den gewählten Lifter wird die Bandbreite der Formanten auf $b = 234,6$ Hz eingestellt.

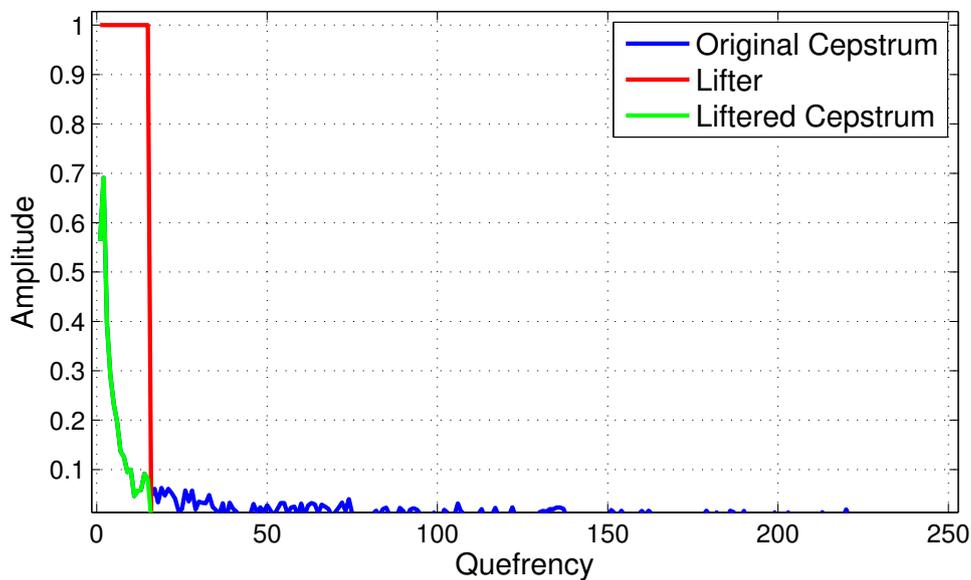


Abbildung 3 – Liftering des Cepstrums

Rücktransformation Das geliftete Cepstrum wird nun wieder in den Frequenzbereich rücktransformiert, um das geglättete Spektrum $X(k, m)_{\text{geglättet}}$ zu erhalten.

$$X(k, m)_{\text{geglättet}} = \sum_{n=1}^N c(n, m) \cdot l(n) e^{-j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (3)$$

Die rücktransformierten Daten werden auf zwei Arten weiter verarbeitet. Zunächst wird die Methode erläutert, in der der zeitliche Verlauf der ersten fünf Formanten be-

stimmt wird.

Peak Picking. Aus dem geglätteten Spektrum werden nun die Maxima als Kandidaten für die Formanten ermittelt. Es werden hier die ersten fünf Formanten eruiert. Da diese Berechnung für jeden Abschnitt des Signals durchgeführt wird, ergibt sich ein zeitlicher Verlauf der Formanten.

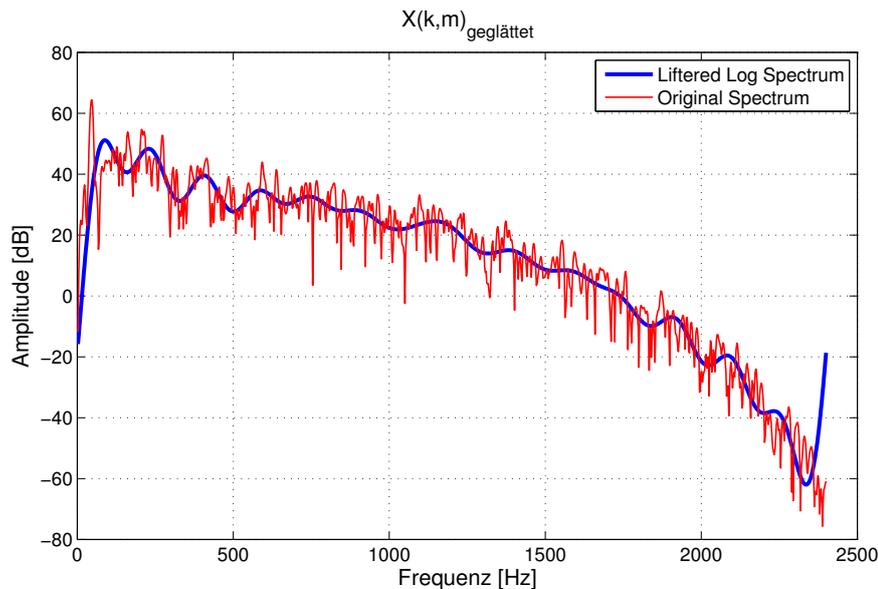


Abbildung 4 – Geglättetes Spektrum nach Liftering

Median. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Formanten, so fällt auf, dass manchmal einer der Formanten nicht richtig detektiert wird. Dort tritt dann ein Sprung im Formant-Verlauf auf. Um den wahrscheinlichsten Wert für die Lage des Formanten zu erhalten, wird der Median des Verlaufs der einzelnen Formanten berechnet und als Ergebnis ausgegeben (Abbildung 5).

Alternativ zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Formanten wird - basierend auf dem geglätteten Spektrum - die Energieverteilung des Spektrums betrachtet.

Kumulation. Aus den gelifterten Spektren der Signalblöcke wird das zeitliche Mittel berechnet. Dadurch erhält man ein gemitteltetes Spektrum (Abbildung 6), das Auskunft über die gesamte Energieverteilung im Signal und somit über dominante Frequenzkomponenten gibt.

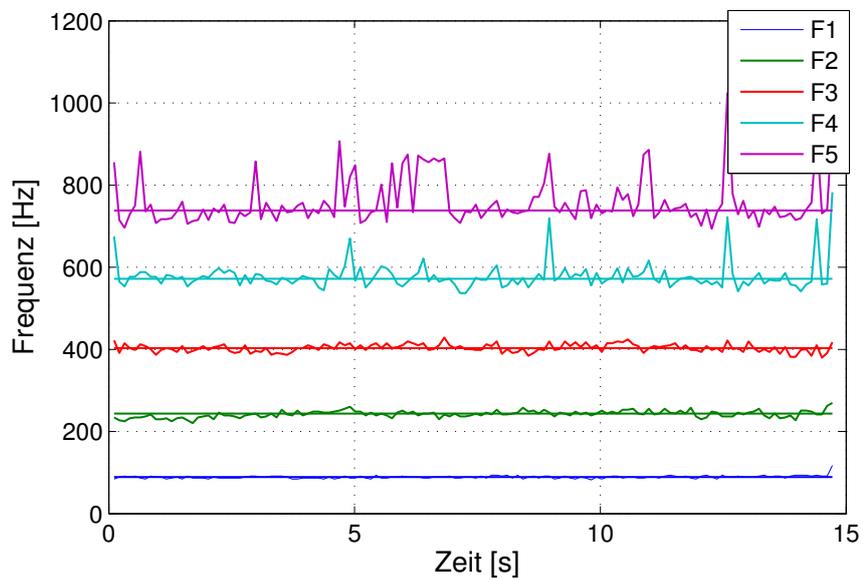


Abbildung 5 – Beispiel für detektierte Formanten bei einem Vierzylinder-Dieselfahrzeug bei Vollast im 3. Gang

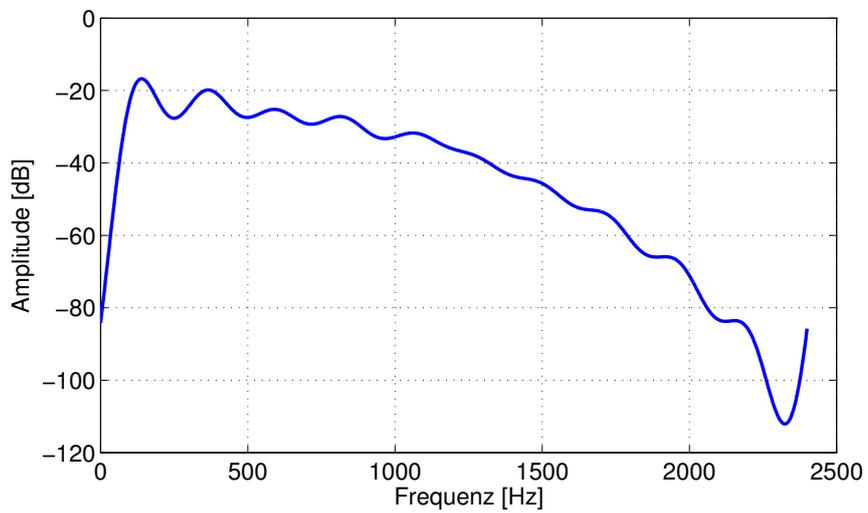


Abbildung 6 – Gemitteltetes Spektrum

Formantbestimmung mittels Linear Predictive Coding. Die hier vorgestellte Methode zur Formantbestimmung wird in [2] beschrieben.

Die lineare Prädiktion schätzt die Koeffizienten eines Filters ab, der die spektrale Einhüllende des Signal beschreibt. Von der Lage der Polstellen dieses Filters lässt sich auf die Formantfrequenzen schließen.

Im Gegensatz zur Cepstrum-Methode, die über den Lifter $l(n)$ eine fixe Bandbreite für die Formanten einstellt, ist die Bandbreite hier variabel innerhalb eines festgelegten Bereiches. Eine genauere Erläuterung dazu ist im folgenden Abschnitt zu finden.

Das folgende Flussdiagramm gibt Auskunft über die Schritte, die zur Formantbestimmung mittels LPC notwendig sind.

Die Abbildungen basieren auf den Daten jenes Fahrzeugs, das auch für die Darstellung der Ergebnisse der Formantbestimmung mittels Cepstrum ausgewählt wurde.

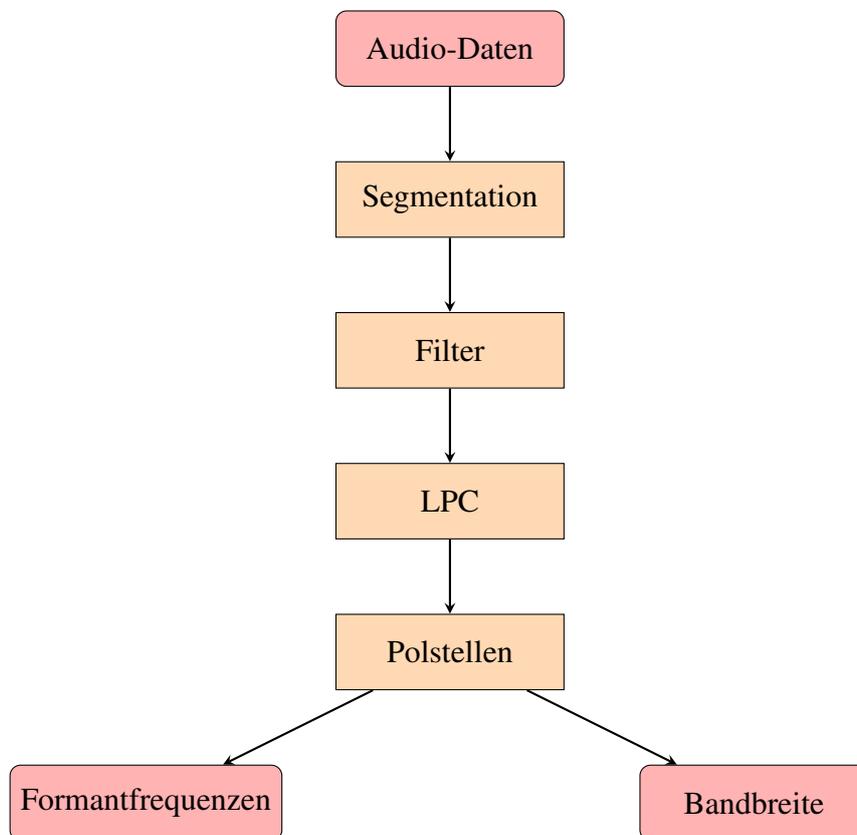


Abbildung 7 – Flussdiagramm zur Extraktion der Formanten mittels LPC

Segmentation. Die Audiodaten werden in Blöcke à 2048 Samples ($\hat{=}0,427$ s) mit 1024 Samples Overlap segmentiert. Die einzelnen Blöcke werden mit einem Hann-Fenster multipliziert und anschließend weiter verarbeitet.

Filter. Die Daten werden mit einem Pre-emphasis-Filter belegt. Dabei handelt es sich um einen Hochpass-Allpol-Filter, der Frequenzgang dieses Filters ist in Abbildung 8 dargestellt.

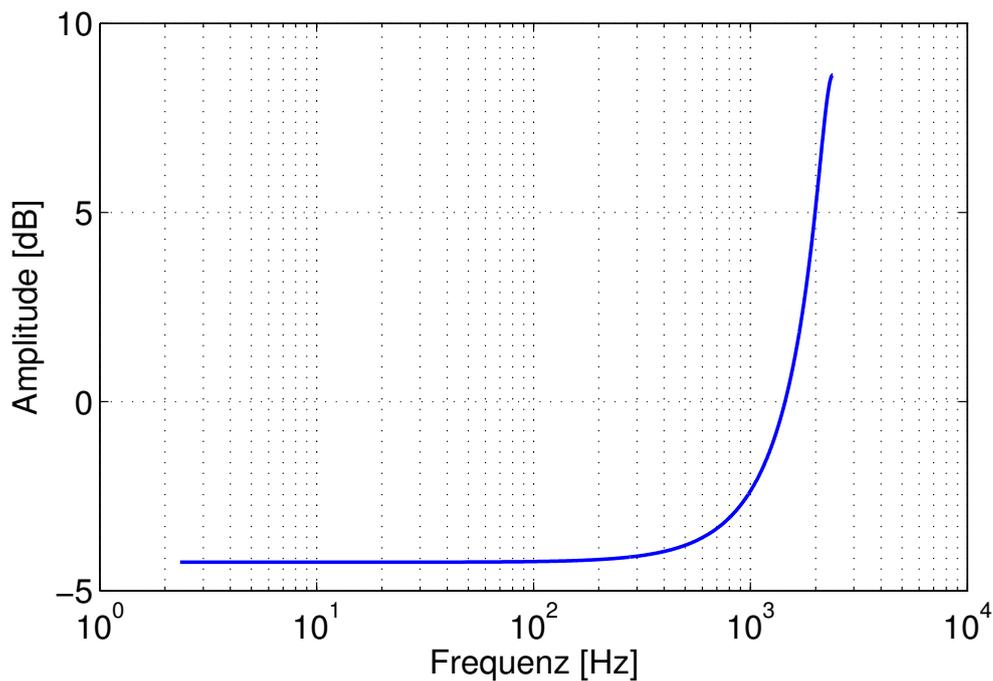


Abbildung 8 – Frequenzgang des Pre-Emphasis-Filters

LPC. Nun wird die lineare Prädiktion durchgeführt, die die LPC-Koeffizienten ausgibt, die den prädizierten Filter beschreiben.

Die Modellordnung wird hierbei auf $N_p = 32$ gesetzt.

Polstellen. Zu dem Polynom, das durch die LPC-Koeffizienten beschrieben wird, werden die Nullstellen bestimmt, also die Polstellen des Filters. Da die Koeffizienten reell sind, ergeben sich komplex-konjugierte Paare von Polstellen. Es werden nun jeweils die Polstellen mit positivem Imaginärteil p_i für die weiteren Berechnungen herausgenommen.

Zu diesen Polstellen wird das Argument ϕ_i berechnet (Gleichung 4), aus dem im Anschluss die Winkelgeschwindigkeit in Hz bestimmt wird (Gleichung 5).

$$\phi_i = \arctan \left(\frac{\text{Im}(p_i)}{\text{Re}(p_i)} \right) \quad (4)$$

$$f_i = \phi_i \frac{f_s}{2\pi} \quad (5)$$

Die Bandbreite der Resonanzen b_i ergibt sich ebenfalls aus der Lage der Polstellen (Gleichung 6).

$$b_i = -\frac{1}{2} \frac{f_s}{2\pi} \log |p_i| \quad (6)$$

Aus den so gewonnenen Formanten werden die ersten fünf ausgewählt, die den Anforderungen $f_i > f_{min} = 25$ und $b_i < b_{max} = 300$ entsprechen und als Ergebnis ausgegeben. Dieses Verfahren wird auf jeden Signalblock angewendet, wodurch sich ein zeitlicher Verlauf der Formanten ergibt. Dieser ist in Abbildung 9 dargestellt. Die farbigen Bänder geben Auskunft über die Frequenzlage und Bandbreite der Formanten. Auch wird der aus den detektierten Formantfrequenzen berechnete Median für die ersten fünf Formanten dargestellt.

Die Berechnung des Medians führt nicht in allen Fällen zu einem sinnvollen Ergebnis. In einigen Fällen ist bei der Detektion der Formanten eine deutliche Abhängigkeit von der Drehzahl zu erkennen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 10 zu sehen, bei dem Fahrzeug handelt es sich um ein Vierzylinder-Dieselfahrzeug bei 0.20g Belastung im 2. Gang. Daher ist die Aussagekraft des Medians in Zweifel zu ziehen. Auch erfüllen die detektierten Frequenzkomponenten nicht durchgehend dem Anspruch, dass sie drehzahlunabhängig sind. Daher sind diese Komponenten nicht als Formanten einzuordnen.

Durch Variation der Parameter für Minimalfrequenz f_{min} und Maximalbandbreite b_{max} wurde überprüft, ob die Drehzahlabhängigkeit minimiert werden kann, dies gelang aber nicht. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden daher aus der Auswertung im folgenden Abschnitt herausgenommen.

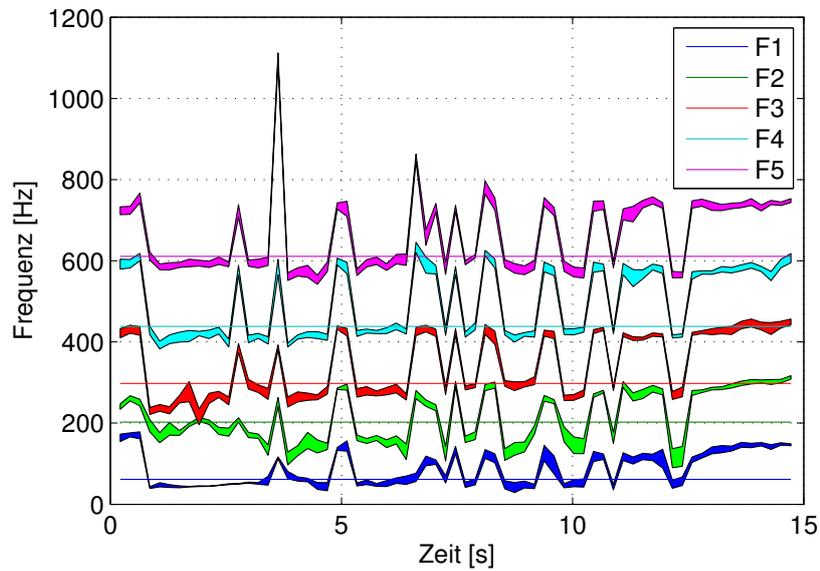


Abbildung 9 – Beispiel für detektierte Formanten bei einem Vierzylinder-Dieselfahrzeug bei Vollast im 3. Gang

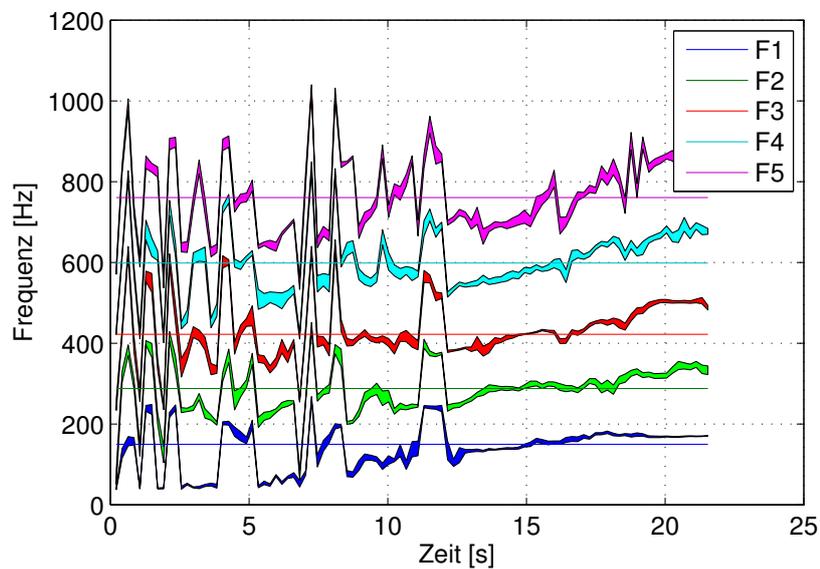


Abbildung 10 – Beispiel für detektierte Formanten mit deutlicher Drehzahlabhängigkeit bei einem Vierzylinder-Dieselfahrzeug bei einer Last von 0,2g im 2. Gang

2.1.2 Ergebnisse der Formantberechnung

Um die Ergebnisse der Formantbestimmung bewerten zu können, muss eine geeignete Darstellungsform gefunden werden, um die verschiedenen Fahrzeugtypen miteinander vergleichen zu können.

Der erste Ansatz ist, die jeweiligen Formantdatensätze für jede Fahrzeugklasse zusammenzufassen und in Form von Streu-Ellipsen darzustellen. Dabei werden die gemittelten Formantfrequenzen für zwei Formanten F_i und F_j des Datensatzes zusammen mit den jeweiligen Streuwerten dargestellt, wodurch die Ellipse aufgespannt wird. Auf diese Weise kann die Lage der Formanten auf einer Formantkarte dargestellt werden, so wie es bei Vokalformanten üblich ist. Bei Vokalformanten werden für die Formantkarte die ersten beiden Formanten F_1 (Ordinate) und F_2 (Abszisse) in Form von Ellipsen dargestellt. Die Position dieser beiden ersten Formanten bestimmt, welcher Vokal zu hören ist [4].

In Abbildung 11 ist die Lage einiger der im Deutschen vorkommenden Vokale dargestellt. Die abgebildeten Vokale sind [o:] (Bohne), [ɔ] (Tonne), [u:] (Rune) und [ʊ] (Hunne). Für die weiteren Vokale liegen die ersten beiden Formanten in einem höheren Frequenzbereich.

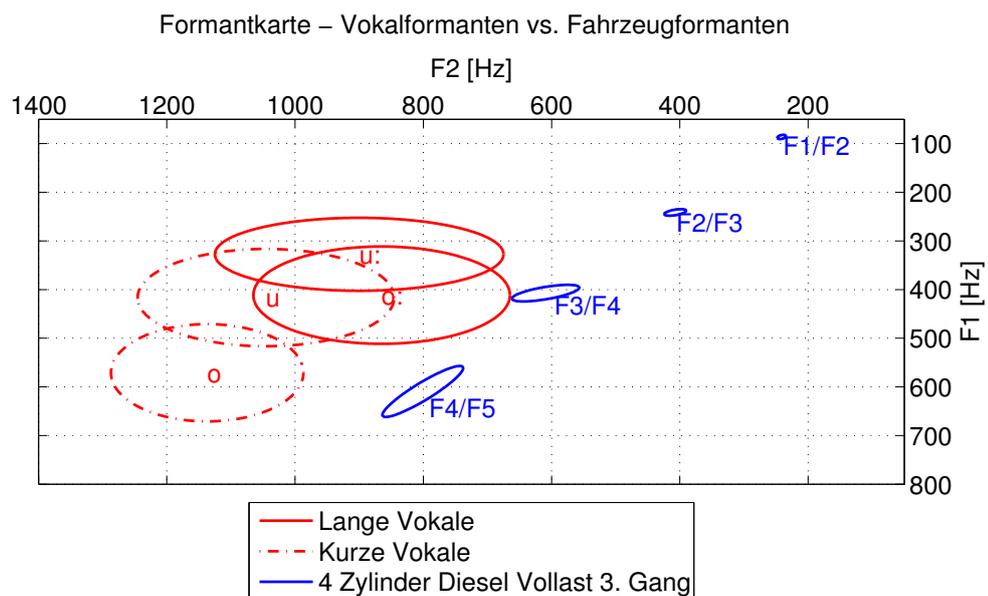


Abbildung 11 – Formantkarte deutscher Vokale [4] und Fahrzeugformanten (F_i/F_j) für 4 Zylinder Diesel Fahrzeuge unter Vollast im 3. Gang

Gegenüberstellend werden auch vier Ellipsen eingezeichnet, die die Lage der Formanten im Fahrzeug darstellt. Die Daten von zwei nebeneinander liegenden Formanten (berechnet über den Median des Zeitverlaufs des gelifteten Spektrums) werden hier für eine beispielhaft ausgewählte Fahrzeuggruppe zu Datensätzen zusammengefasst und in Form von Ellipsen dargestellt. Für die Darstellung werden die Daten von Vierzylinder-Fahrzeugen mit Dieselmotor im dritten Gang unter Vollast ausgewählt, der Datensatz besteht aus 16 Fahrzeugen.

Es ist klar zu sehen, dass F1 und F2 bei Fahrzeugen deutlich niedriger liegen als für die Vokalformanten. Da das mechanische Systems des Motors völlig andere Abmessungen als der menschliche Sprechapparat hat, ist dies durchaus zu erwarten. Daher ist der Klang der Motoren klangfarblich kaum mit der des menschlichen Stimmapparates vergleichbar.

Die Darstellung als Ellipse wurde für sämtliche Fahrzeuggruppen durchgeführt, doch erwies sich diese Darstellungsform als unzureichend, um Unterschiede zwischen den Fahrzeugklassen beschreiben zu können. So war es schwierig, eindeutige Muster zu erkennen. Des Weiteren enthält die Ellipsen-Darstellung keine Information über den Energieinhalt der jeweiligen Formanten.

Frequenzlage Für eine genauere Analyse werden die zuvor ermittelten Formantfrequenzen für alle Motorentypen und Belastungszustände in Form von Boxplots dargestellt (Abbildung 12). Dabei entspricht eine Box den Datenpunkten für alle Fahrzeuge, die einem bestimmten Motorentyp zugeordnet und unter einer bestimmten Last betrieben werden. Dies wird zunächst für die über den Median des Zeitverlaufs des gelifteten Spektrums ermittelten Formanten durchgeführt. Der Einfachheit halber wird diese Methode im Folgenden als „Cepstrum-Methode“ bezeichnet.

Für die ersten drei Formanten ist die Frequenzlage für alle Motorentypen und Belastungszustände bei grober Betrachtung sehr ähnlich. Für F4 und F5 ergeben sich deutlich größere Streubänder. Dies liegt in der Berechnung der Formantfrequenz über den Median begründet. Im höheren Frequenzbereich herrscht eine größere Fluktuation in den Formantfrequenzen, weswegen der Median nur bedingt aussagekräftig ist.

Die Darstellung in Form der Boxplots dient als grobe Übersicht, die Ergebnisse werden im Folgenden im Detail betrachtet und statistisch ausgewertet. Dabei ist anzumerken, dass die Größe der Stichproben mitunter stark variiert. Eine Auflistung der Stichprobengröße ist in Tabelle 2 zu finden. Hier sind die Lastzustände 0,05g, 0,1g und 0,2g zusammengefasst zur Gruppe „2. Gang - Teillast“, 0,4g und Vollast (2. Gang) bilden die Gruppe „2. Gang - Vollast“.

Bei den Benzinfahrzeugen mit zwei, zehn und zwölf Zylindern sind die Stichproben sehr klein (1, 2 bzw. 3 Fahrzeuge), weshalb die Ergebnisse nur bedingt repräsentativ sind.

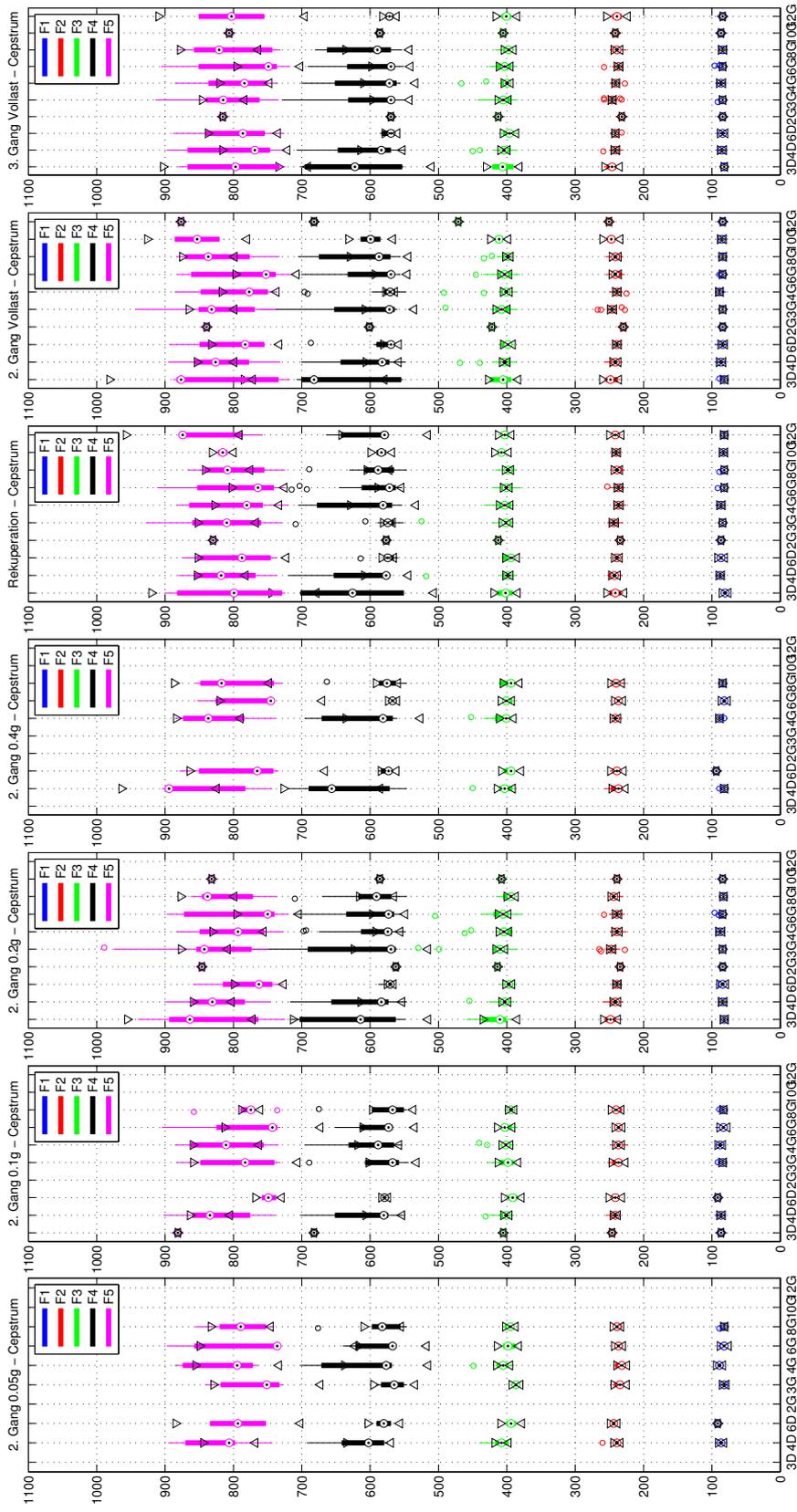


Abbildung 12 – Frequenzlage der ersten fünf Formanten – bestimmt mittels Cepstrum-Methode

Zur Bewertung inwiefern sich die Formantfrequenzen für die 57 verschiedenen Gruppen¹ voneinander unterscheiden, wird für jeden der Formanten eine ANOVA durchgeführt. So kann bewertet werden, ob die gefundenen Unterschiede signifikant sind. Solche signifikanten Unterschiede sind nur für die ersten beiden Formanten festzustellen. Alle Tendenzen, die bei den übrigen Formanten auftreten sind nicht statistisch relevant.

F1:

- Die Mediane liegen zwischen 80,9 Hz und 93,8 Hz.
- Die Gruppe der Sechszylinder-Dieselfahrzeuge bei 0,4g im 2. Gang unterscheidet sich am stärksten von den übrigen Gruppen. Die Formantfrequenz dieser Gruppe liegt signifikant höher als in 16 der anderen Gruppen.
- Die Benzinfahrzeuge mit sechs und acht Zylindern weisen bei Rekuperation eine niedrigere Frequenz auf als drei beziehungsweise 4 der anderen Gruppen.
- Tendenziell zu erkennen, aber nicht statistisch signifikant ist, dass die Frequenz für Vierzylinder-Benzinmotoren eher oberhalb liegt, und dass bei Benzinfahrzeugen die Frequenzen im Median bei geringerer Belastung tiefer liegen.

F2:

- Die Mediane liegen zwischen 229,7 Hz und 250,8 Hz.
- Aus der Berechnung der ANOVA ergibt sich ein p-Wert von $p = 0,0013$, wodurch die Nullhypothese, dass sich die Formantfrequenzen aller Gruppen signifikant unterscheiden abgewiesen werden muss. Beim paarweisen Vergleich der Gruppen ergibt sich allerdings kein signifikanter Unterschied zwischen einzelnen Gruppen-Paaren.
- Ohne Anspruch auf Signifikanz lassen sich jedoch Tendenzen erkennen:
 - Die Frequenzen steigen tendenziell mit höherer Belastung.
 - Die Frequenzen der Dieselfahrzeuge liegen etwas höher.
 - Bei den Benzinfahrzeugen ist eine leichte Abhängigkeit der Frequenz von der Zylinderanzahl zu sehen. Bei größerer Zylinderanzahl werden die Frequenzen höher.

F3:

- Die Mediane liegen zwischen 386,7 Hz und 471,1 Hz.
- Zwischen den Gruppen bestehen keine signifikanten Unterschiede, allerdings sinken bei den Dieselfahrzeugen sinken die Frequenzen mit steigender Zylinderanzahl tendenziell.

1. Die Anzahl der Gruppen ergibt sich aus der Kombination von Treibstoffart, Zylinderanzahlen und Lastzuständen, wobei nicht zu jedem Motor Messungen bei allen Lastzuständen zur Verfügung stehen.

F4:

- Die Mediane liegen zwischen 562,5 Hz und 682,0 Hz.
- Wie auch bei F3 gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fahrzeuggruppen, jedoch sinken bei den Dieselfahrzeugen die Frequenzen mit steigender Zylinderanzahl, wobei die Fahrzeuggruppe mit drei Zylindern insgesamt eine hohe Lage im Vergleich zu sämtlichen anderen Fahrzeuggruppen einnimmt.

F5:

- Die Mediane liegen zwischen 735,9 Hz und 894,1 Hz.
- Zwischen den Fahrzeuggruppen bestehen keine signifikanten Unterschiede. Es lassen sich aber die folgenden Tendenzen erkennen:
 - Das zuvor beobachtete Zylinderanzahl-abhängige Verhalten ist bei F5 nur mehr bei Teillast und Vollast im 2. Gang zu sehen, nicht aber bei Rekuperation und Vollast im 3. Gang.
 - Die Frequenzen der Sechszylinder-Benzinfahrzeuge liegen tiefer als die der anderen Fahrzeuge

Alternativ zu den über den Median des Zeitverlaufs bestimmten Formantfrequenzen, enthält auch die kumulierte Energieverteilung Information zu Lage und Ausprägung wichtiger Frequenzkomponenten. Diese Berechnungsmethode wird im Folgenden kurz als „Kumulation“ betitelt.

Für die Analyse werden die Lage und Höhe der ersten fünf Maxima der kumulierten Daten ausgewertet.

Zunächst wird die Frequenzlage der Maxima betrachtet (Abbildung 13). Dabei fällt auf, dass diese Frequenzen nicht mit den Formantfrequenzen aus der Untersuchung über die Cepstrum-Methode übereinstimmen, sie liegen hier höher. Nur bei F3 und F4 ergeben sich Überschneidungen mit den Formantfrequenzbereichen von F4 und F5 der Cepstrum-Methode. Auch sind die Streubänder insgesamt breiter, einzelne Ausreißer treten bis knapp 2200 Hz auf. Zur besseren Lesbarkeit ist der dargestellte Frequenzbereich allerdings auf 1600 Hz beschränkt. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail analysiert. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Gruppen marginal.

Die Anwendung der ANOVA auf die Daten für jeden der Formanten ergibt wie auch zuvor nur für F1 und F2 signifikante Unterschiede.

F1:

- Die Mediane liegen zwischen 126,6 Hz und 145,3 Hz.
- Die Gruppen der Vierzylinder-Benzinfahrzeuge und der Sechszylinder-Dieselfahrzeuge, die jeweils mit 0,4g im 2. Gang belastet werden liegen signifikant höher

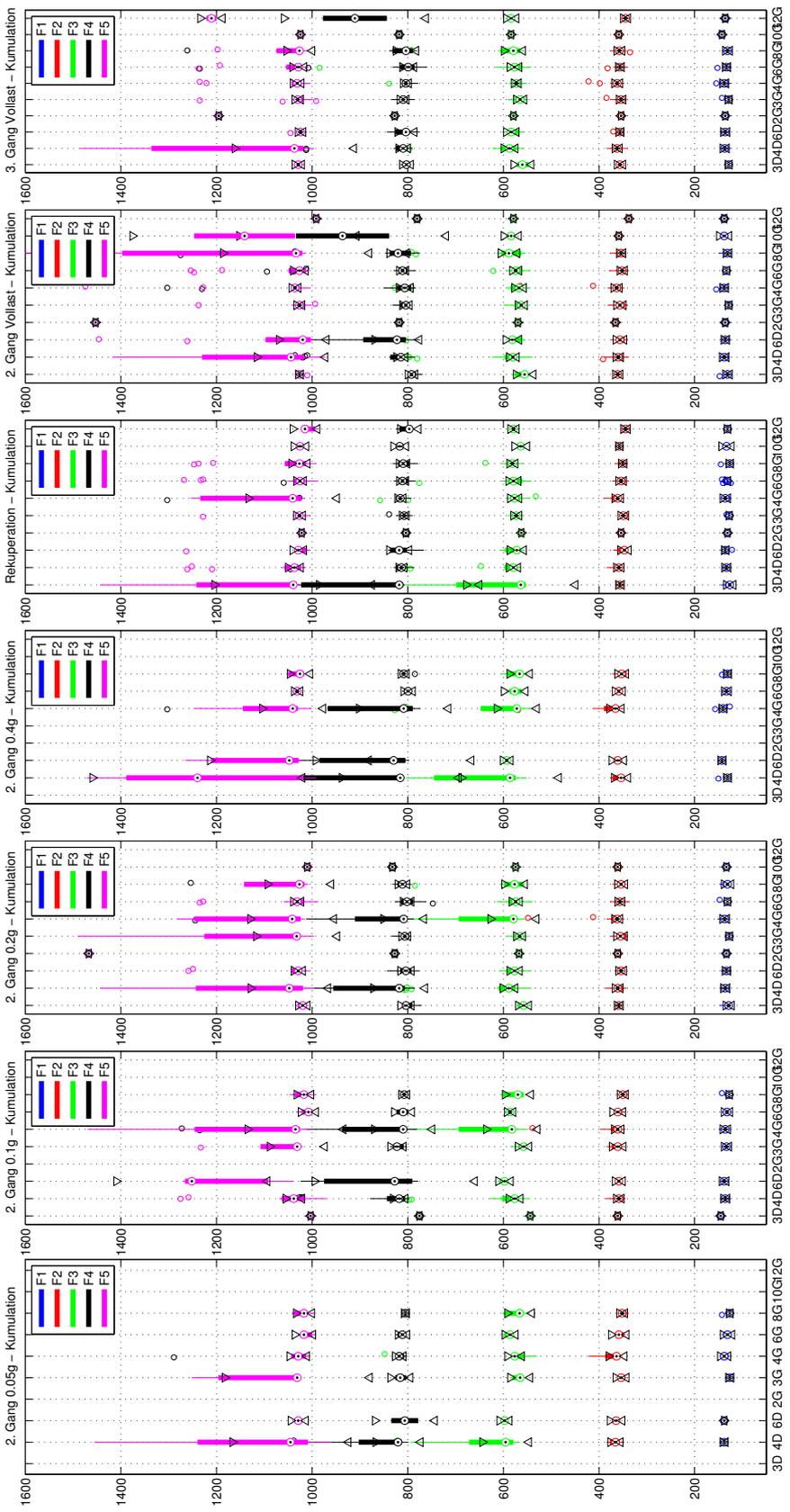


Abbildung 13 – Frequenzlage der ersten fünf Formanten - bestimmt mittels kumulierten Spektren

als sechs beziehungsweise drei der anderen Gruppen. Die erhöhte Lage der Formantfrequenzen für die Sechszylinder-Dieselfahrzeuge ist auch bei der Cepstrum-Methode zu beobachten.

- Die Formantfrequenzen der Gruppe der Dreizylinder-Benzinfahrzeuge bei Schubetrieb liegen hingegen signifikant tiefer als drei der anderen Fahrzeuggruppen.

F2:

- Die Mediane liegen zwischen 337,5 Hz und 365,6 Hz.
- Ähnlich wie bei F1 liegt die Gruppe der Vierzylinder-Benzinfahrzeuge bei 0,4g Belastung im 2. Gang höher als sieben der anderen Gruppen.
- Tendenziell lässt sich ohne Anspruch auf Signifikanz erkennen, dass die Frequenzen des Zwölfzylinder-Benzinfahrzeuge vergleichsweise tief liegen, wohingegen die der Vierzylinder-Benziner eher hoch liegen.

F3:

- Die Mediane liegen zwischen 543,8 Hz und 597,7 Hz - dies ist eine Überschneidung mit dem F4-Frequenzbereich der Cepstrum-Methode.
- Zwischen den Gruppen gibt es keine signifikanten Unterschiede, es ist jedoch eine Tendenz zu erkennen, dass die Frequenz mit der Zylinderanzahl steigt, der Verlauf des Trend verflacht aber.

F4:

- Die Mediane liegen zwischen 775,8 Hz und 936,3 Hz - dies ist eine Überschneidung mit dem F5-Frequenzbereich der Cepstrum-Methode.
- Es bestehen keine signifikanten Unterschiede, jedoch lässt sich bei Vierzylinder-Dieselfahrzeugen eine umgekehrte Proportionalität zwischen Last und Frequenz erahnen.

F5:

- Die Mediane liegen zwischen 991,4 Hz und 1467,2 Hz.
- Die Gruppen unterscheiden sich nicht signifikant.
- Es ist anzumerken, dass es einige sehr hoch liegende Ausreißer gibt - in diesen Fällen scheinen die Maxima im Energieverlauf zu flach, um noch als Maximum erkannt zu werden - daher wurden sie nicht detektiert. Ein Beispiel für solch einen abgeflachten Verlauf ist in Abbildung 14 zu sehen. Der rot markierte Teil der Kurve ist ein Maximum, welches so stark abgeflacht ist, dass es kein lokales Maximum mehr ist.

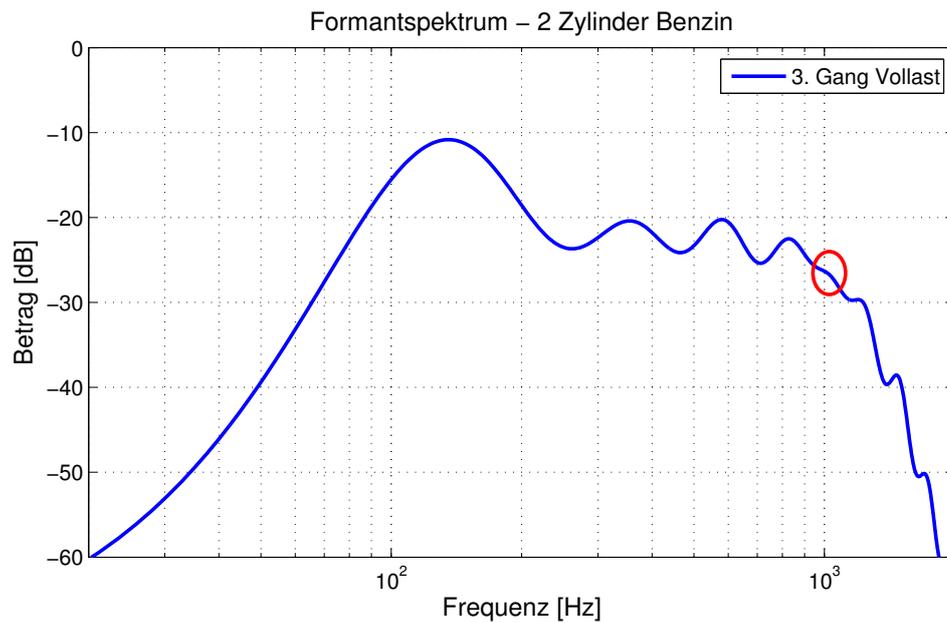


Abbildung 14 – Formantspektrum für ein Zweizylinder-Benzinfahrzeug mit abgeflachtem fünftem Maximum (rot markiert)

Formantspektren In weiterer Folge wird die Ausprägung der Maxima im kumulierten Spektrum betrachtet.

Hierfür werden alle kumulierten Spektren, die einer Gruppe (= ein Motorentyp und ein Lastzustand) zugehörig sind, ein weiteres Mal gemittelt, um einen mittleren Energieverlauf zu erhalten, mit dem die verschiedenen Fahrzeugtypen und Lastzustände verglichen werden können. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 15 dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Fahrzeugtypen werden die Kurven so normiert, dass das der Pegel des ersten Maximums der Kurve für den Vollast-Zustand im dritten Gang 0 dB entspricht. Dieses Maximum ist für alle Fahrzeugtypen mit Ausnahme der Vierzylinder-Benzinfahrzeuge das am stärksten ausgeprägte.

Diese Darstellung zeigt kaum die Unterschiede in der Frequenzlage der Pegelmaxima auf, jedoch gibt sie Auskunft über die Unterschiede in der Ausprägung der Maxima. So lässt sich erkennen, dass der Energieverlauf bei stärkeren Belastungszuständen höher liegt, da das Motorengeräusch in diesen Fällen insgesamt einen höheren Schallpegel hat.

Das erste Maximum ist für jede der Kurven das am stärksten ausgeprägte. Die weiteren Maxima liegen auf einer grob parabelförmig abfallenden Kurve, wobei dies für die verschiedenen Lastzustände nicht gleichförmig geschieht. Im Falle der Rekuperation ist zu beobachten, dass die Höhe der Maxima stärker absinkt als bei den anderen

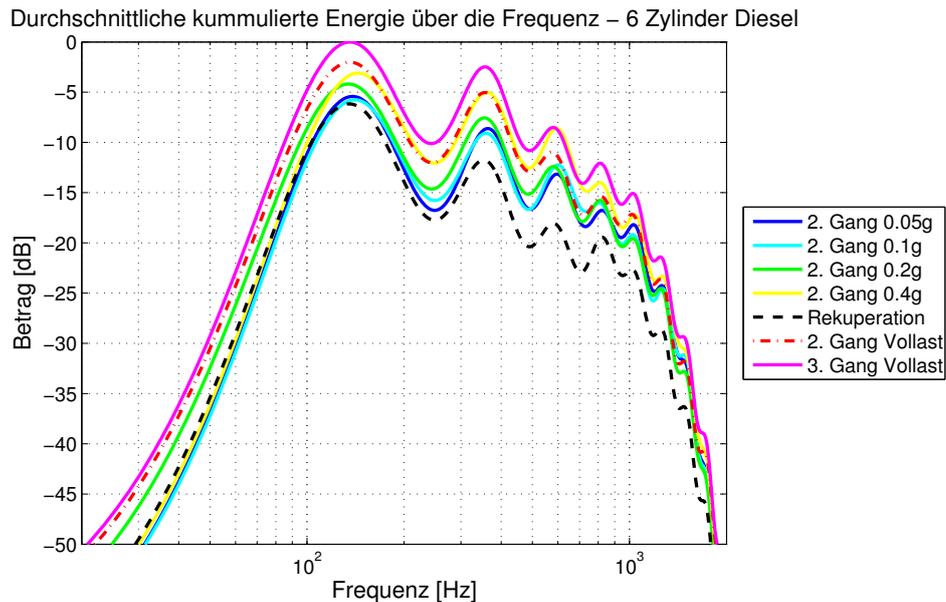


Abbildung 15 – Formantspektrum - 6 Zylinder Diesel für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

Lastzuständen.

Dieser qualitative Verlauf findet sich bei allen Fahrzeugtypen wieder. Die entsprechenden Abbildungen sind in Anhang A zu finden.

Interessante Details und Abweichungen vom soeben vorgestellten Schema werden im Folgenden erläutert.

Wie schon bei der Betrachtung der Formantfrequenzen gilt zu bedenken, dass für einige Motorentypen die untersuchten Stichproben sehr klein sind. Die getroffenen Aussagen sind daher für diese nicht repräsentativ.

- 3 Zylinder Diesel** Nicht nur bei Rekuperation, auch bei der Belastung von 0,1g tritt ein stärkerer Abfall der Pegelmaxima auf.
- 2 Zylinder Benzin** Das erste Maximum ist deutlicher ausgeprägt, dafür liegen die nächsten zwei Formanten beim nahezu gleichen Pegel.
- 3 Zylinder Benzin** Der stärkere Abfall des Pegelverlaufs ist eher bei den Belastungszuständen 0,05g und 0,1g als im Schubetrieb zu beobachten.
- 8 Zylinder Benzin** Es ist auffällig, dass bei allen Lastzuständen das dritte und vierte Maximum bei einem nahezu gleichen Pegel liegen, das dritte Maximum liegt tendenziell niedriger als bei den übrigen Fahrzeugen.
- 10 Zylinder Benzin** Der Verlauf der Spektren für die verschiedenen Lastzustände ist weniger gleichförmig als bei den zuvor untersuchten Motorentypen. Im

zweiten Gang unter Vollast hat das zweite Maximum einen höheren Pegel als das erste, erst danach folgt der typische Abfall. Bei 0,2g Belastung ist das vierte Maximum stärker ausgeprägt als das dritte. Im Falle der Rekuperation sind diesen beiden Maxima auf ähnlichem Level.

12 Zylinder Benzin Der Verlauf der Maxima ist für die verschiedenen Belastungszustände nicht gleichförmig. Während im Schubetrieb und unter Vollast im dritten Gang ein abfallender Verlauf zu sehen ist, liegen die ersten drei Maxima im zweiten Gang unter Vollast bei nahezu gleichem Pegel. Erst danach folgt der Abfall.

Um diese Beobachtungen zu quantifizieren werden die Differenzen zwischen den Pegeln benachbarter Maxima betrachtet. Durch die Differenzbildung werden die nicht völlig identischen Aufnahmepegel bei der Messung ausgeglichen.

Für die Berechnung der Differenzen werden nun nicht die gemittelten Formantspektren, sondern die Rohdaten herangezogen. Dies ermöglicht eine statistische Auswertung der Ergebnisse. Auf die Ergebnisse der Differenzberechnung wird eine ANOVA angewendet und anschließend ein paarweiser Vergleich durchgeführt, um signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen feststellen zu können.

Der Vergleich der Pegelunterschiede zwischen F1 und F2 für alle Fahrzeugtypen und Lastzustände ist in Abbildung 16 zu sehen.

Hierbei liegt der Median in 3 Fällen unterhalb von 0 dB (Dreizylinder-Diesel bei 0,1g, Zehn- und Zwölfzylinder-Benziner bei Vollast im 2. Gang), in allen anderen Fällen liegen die Mediane oberhalb von 0 dB. Im Allgemeinen liegt das zweite Maximum also tiefer als das erste.

Besonders groß ist die Pegeldifferenz im Falle der Rekuperation, bei Vollast im 2. Gang ist sie dagegen vergleichsweise gering. Zwischen diesen beiden Lastzuständen ergibt sich ein signifikanter Unterschied ($p = 3,6 \cdot 10^{-16}$). Illustriert wird dieser in Abbildung 17. Hier ist auch zu sehen, dass die Differenz für Zweizylinder-Benzinfahrzeuge sehr groß ist, aufgrund der geringen Stichprobe ist dieses Ergebnis allerdings nicht repräsentativ.

Während die Pegeldifferenz der ersten beiden Maxima bei dem Zweizylinder-Benzinfahrzeug groß ist, ist die Differenz zwischen zweitem und dritten Maximum auffallend gering. Dies trifft vor allem auf die Lastzustände 0,2g, zweiter Gang Vollast und dritter Gang Vollast zu (Abbildung 18). Der rote Kreis in der Abbildung hebt diese geringen Werte hervor. Durch die kleine Stichprobe kann allerdings keine Aussage getroffen werden, ob dieser Unterschied signifikant ist.

Bei der Betrachtung der Differenz zwischen dem dritten und vierten Pegelmaximum sowie dem vierten und fünften Pegelmaximum, sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Es ist lediglich zu sehen, dass der Median der Differenz zwischen drittem

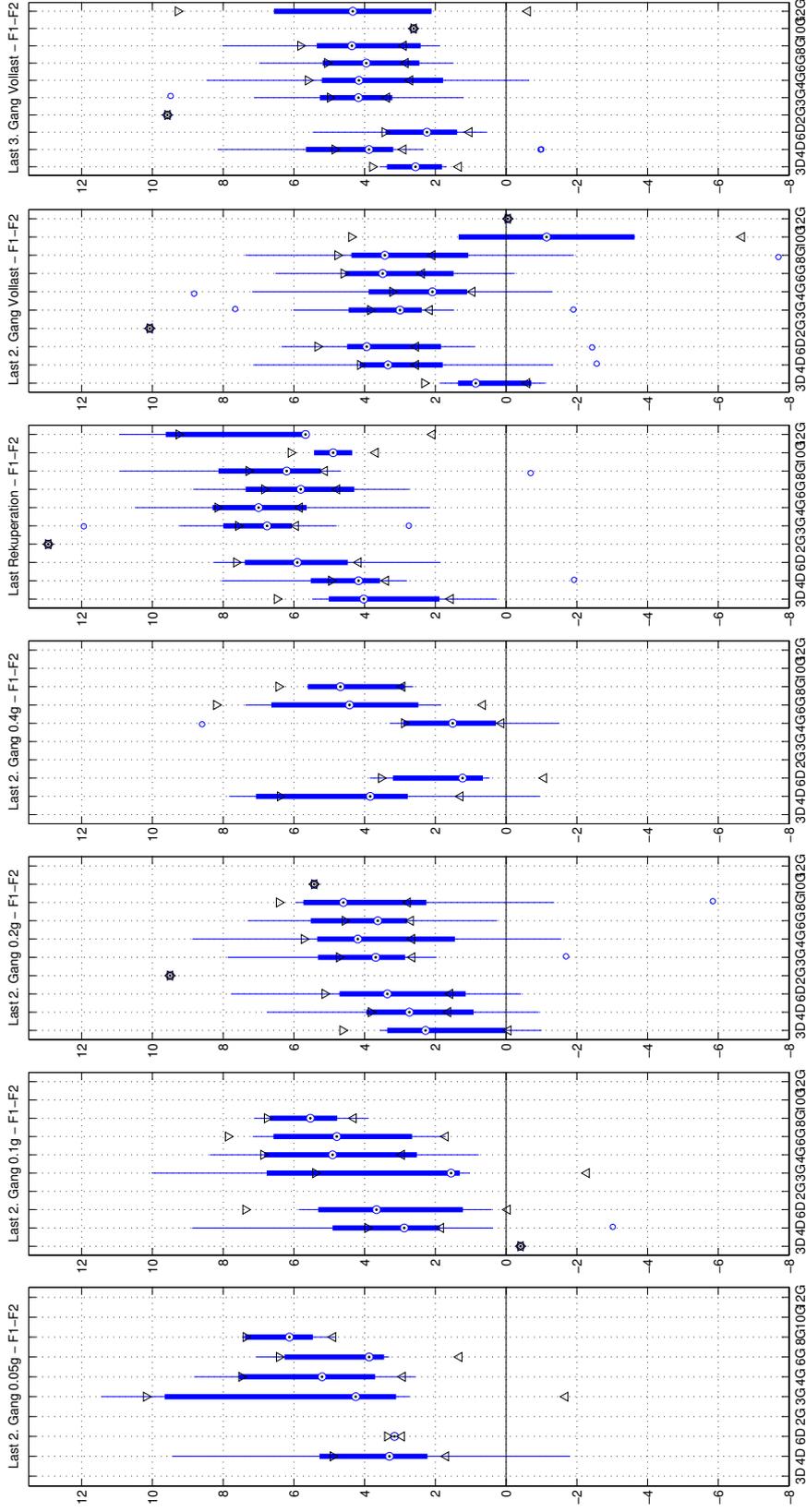


Abbildung 16 – Pegeldifferenz der ersten beiden Maxima für diverse Fahrzeuge aufgeteilt nach Lastzuständen

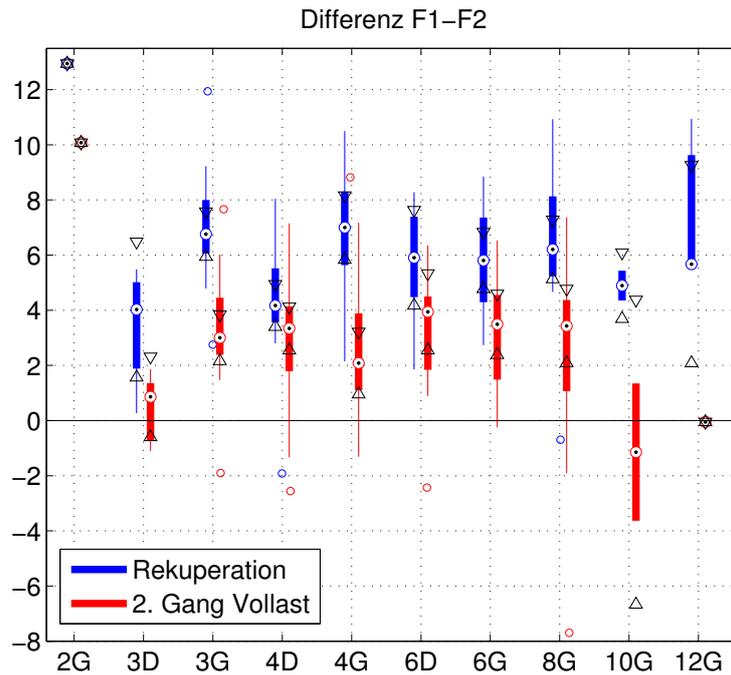


Abbildung 17 – Pegeldifferenz der ersten beiden Maxima für diverse Fahrzeuge bei Rekuperation und unter Vollast im 2. Gang

und viertem Maximum bei den Zehnzylinder-Benzinfahrzeugen unter einer Last von 0,2g unter 0 dB liegt.

Zusammenfassung Nach der Analyse der dominanten Frequenzanteile im Fahrzeuggeräusch über zwei Methoden ist festzustellen, dass sich die Formantfrequenzen der unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Belastungszustände nur für die ersten beiden Formanten unterscheiden. Je nach Berechnungsmethode ergeben sich verschiedene Ergebnisse. Die ersten fünf Maxima der kumulierten Spektren liegen höher und streuen breiter als die Formantfrequenzen, die in der Cepstrum-Methode ermittelt wurden. Im Allgemeinen liegen die Formantfrequenzen der Fahrzeuge deutlich niedriger als die Formantfrequenzen bei Sprache.

Bei Berechnung über die Cepstrum-Methode liegt der erste Formant für Sechszylinder-Dieselfahrzeuge bei 0,4g vergleichsweise hoch, für die Benzinfahrzeuge mit sechs und acht Zylindern bei Rekuperation liegt dieser Formant hingegen eher tief.

Die Kumulationsmethode weist ebenfalls eine Erhöhung des ersten Formanten für Sechs-

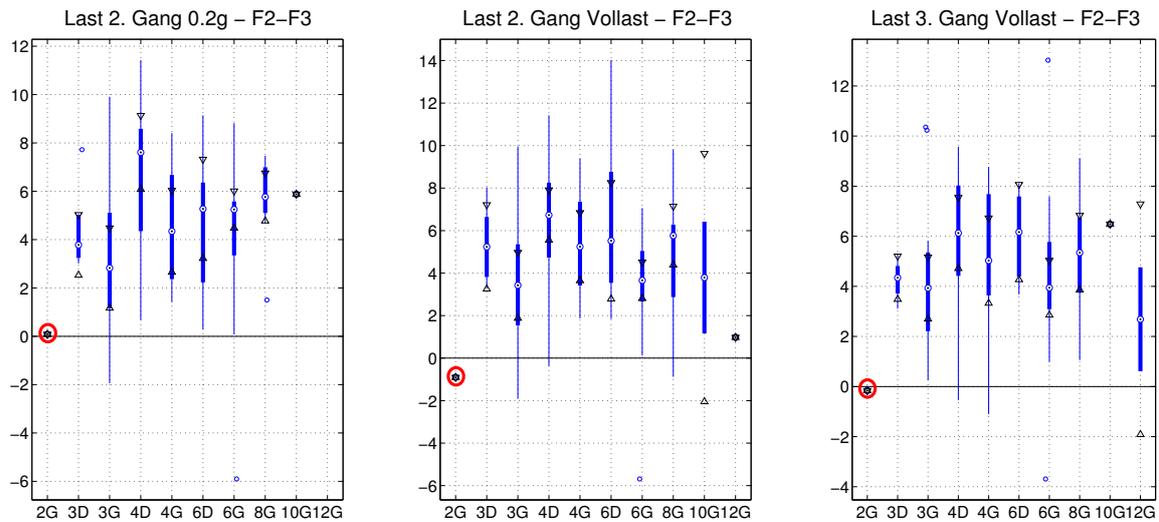


Abbildung 18 – Pegeldifferenz von zweitem und dritten Maximum für diverse Fahrzeuge bei 0,2g Belastung, Vollast in 2. und 3. Gang. Die Werte für das Zweizylinder-Benzinfahrzeug sind hervorgehoben (roter Kreis).

zylinder-Dieselfahrzeuge bei 0,4g Belastung. Eine solche Erhöhung ist allerdings noch stärker für Vierzylinder-Benzinfahrzeuge nicht nur beim ersten, sondern auch für den zweiten Formanten zu erkennen.

Die Analyse der Pegel der Maxima im kumulierten Spektrum führt zu weiteren Ergebnissen.

Ein höherer Belastungszustand geht mit mehr Energie im Spektrum und damit auch höheren Maxima im kumulierten Energieverlauf einher.

Die Maxima beschreiben grob einen parabelförmigen Verlauf, der je nach Belastungszustand unterschiedlich stark abfällt. Bei Rekuperation bzw. geringer Last ist der Abfall stärker ausgeprägt.

Dies bestätigt sich auch bei der detaillierten Analyse der Differenz zwischen den ersten beiden Maxima.

Dabei ist zu sehen, dass üblicherweise ein Maximum geringer ausgeprägt ist, als das vorangegangene, nur in einigen Ausnahmefällen wird dieses Schema durchbrochen.

Eine auffallend große Differenz zwischen erstem und zweitem Pegelmaximum ist bei Fahrzeugen im Schubetrieb zu finden. Diese Differenz ist signifikant größer als die Differenz bei Fahrzeugen, die im zweiten Gang unter Vollast betrieben werden.

Gruppe			Größe - Teilgruppe	Größe - Gesamt
Benzin	2 Zylinder	2. Gang - Teillast	1	1
Benzin	2 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	1	
Benzin	2 Zylinder	2. Gang - Vollast	1	
Benzin	2 Zylinder	3. Gang - Vollast	1	
Diesel	3 Zylinder	2. Gang - Teillast	6	5
Diesel	3 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	4	
Diesel	3 Zylinder	2. Gang - Vollast	5	
Diesel	3 Zylinder	3. Gang - Vollast	4	
Benzin	3 Zylinder	2. Gang - Teillast	22	16
Benzin	3 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	14	
Benzin	3 Zylinder	2. Gang - Vollast	15	
Benzin	3 Zylinder	3. Gang - Vollast	16	
Benzin	4 Zylinder	2. Gang - Teillast	35	16
Benzin	4 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	13	
Benzin	4 Zylinder	2. Gang - Vollast	24	
Benzin	4 Zylinder	3. Gang - Vollast	14	
Diesel	4 Zylinder	2. Gang - Teillast	49	22
Diesel	4 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	16	
Diesel	4 Zylinder	2. Gang - Vollast	29	
Diesel	4 Zylinder	3. Gang - Vollast	16	
Benzin	6 Zylinder	2. Gang - Teillast	28	22
Benzin	6 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	21	
Benzin	6 Zylinder	2. Gang - Vollast	22	
Benzin	6 Zylinder	3. Gang - Vollast	15	
Diesel	6 Zylinder	2. Gang - Teillast	15	10
Diesel	6 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	7	
Diesel	6 Zylinder	2. Gang - Vollast	12	
Diesel	6 Zylinder	3. Gang - Vollast	7	
Benzin	8 Zylinder	2. Gang - Teillast	21	18
Benzin	8 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	18	
Benzin	8 Zylinder	2. Gang - Vollast	21	
Benzin	8 Zylinder	3. Gang - Vollast	10	
Benzin	10 Zylinder	2. Gang - Teillast	1	2
Benzin	10 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	2	
Benzin	10 Zylinder	2. Gang - Vollast	2	
Benzin	10 Zylinder	3. Gang - Vollast	1	
Benzin	12 Zylinder	2. Gang - Teillast	0	3
Benzin	12 Zylinder	2. Gang - Rekuperation	3	
Benzin	12 Zylinder	2. Gang - Vollast	1	
Benzin	12 Zylinder	3. Gang - Vollast	2	

Tabelle 2 – Gruppengrößen der Teilgruppen (Anzahl der vorhandenen Datensätze pro Gruppe) und der Gesamtgruppen (Anzahl der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle in der Gruppe)

2.2 Tonhöhe

Die Berechnung der Tonhöhe orientiert sich an dem von Terhardt in [6] vorgestellten Algorithmus zur Extraktion der virtuellen Tonhöhe. Ziel hierbei ist es, nicht nur die im Signal erkennbare Periodizität und prominente Frequenzkomponenten zu betrachten, sondern eine auf diesen Frequenzkomponenten basierende Abschätzung für die tatsächlich wahrgenommene Tonhöhe unter Berücksichtigung psychoakustischer Phänomene zu erhalten.

2.2.1 Berechnung der virtuellen Tonhöhe

Pitch. Der Begriff Pitch beschreibt die wahrgenommene Tonhöhe. Um eine gute Abschätzung hierfür zu erhalten, ist eine Vielzahl von Schritten nötig, die im Flussdiagramm in Abbildung 19 dargestellt und anschließend erläutert werden.

Spektrogramm - STFT. Die Audio-Daten werden wie schon bei der Berechnung der Formanten als Spektrogramm dargestellt. Dazu wird das Signal in Blöcke mit 1024 Samples (ca. 0,218 s Länge) aufgeteilt, die sich jeweils zur Hälfte (Hop Size $H_s = 512$) überlappen. Nach der Fensterung mit einem Hann-Fenster mit der Länge von 1024 Samples, wird auf die Daten eine 2048-Punkte-FFT angewendet.

Die aus dieser Berechnung folgende Frequenzauflösung liegt bei $\Delta f = \frac{f_s}{N_{FFT}} = 2,3$ Hz. Insbesondere im tieffrequenten Bereich ist die Auflösung damit eher grob. Bei geringer Drehzahl liegt die Grundfrequenz bei ca. 15 Hz - bei der gewählten Frequenzauflösung sind nebeneinanderliegende Frequenzbins in diesem Bereich eine kleine Terz voneinander entfernt. Es muss daher beachtet werden, dass die Genauigkeit bei der Detektion bei niedriger Drehzahl nicht sehr hoch ist.

Die Daten liegen nicht mit gleichen Aufnahmepegeln vor, daher werden diese zur besseren Vergleichbarkeit blockweise mit einem A-bewerteten Filter beaufschlagt.

Prominente Maxima im Spektrum. Nun wird im Spektrum jedes Zeitabschnitts nach prominenten Maxima gesucht. Zunächst werden die lokalen Maxima detektiert. Der Terhardt-Algorithmus sieht hier nun vor, von den lokalen Maxima nur jene auszuwählen, die mindestens 7 dB höher sind als die benachbarten Frequenzbins. Dieser Grenzwert wurde über Hörversuche ermittelt. Bei der Anwendung auf die Motorengeräusche erwies sich dieses Kriterium allerdings als problematisch. Durch das Ausschließen aller schwächer ausgeprägten Maxima werden so viele potentielle Tonhöhenkandidaten ausgeschlossen, dass in weiterer Folge oft keine Tonhöhe mehr detektiert werden kann.

Dies liegt darin begründet, dass der Terhardt-Algorithmus auf die Tonhöhe in Musik

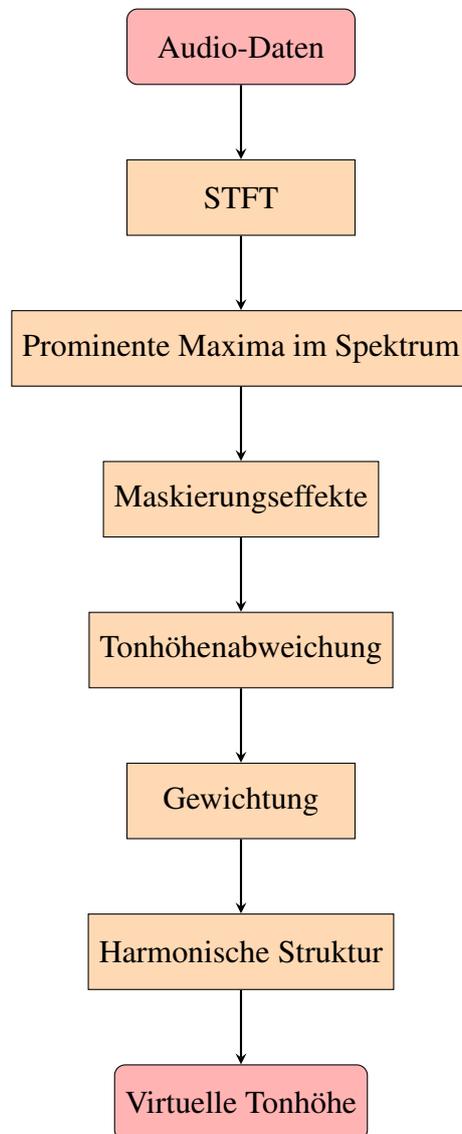


Abbildung 19 – Flussdiagramm zur Extraktion der virtuellen Tonhöhe

ausgelegt ist. Die Motorengeräusche liegen in einem niedrigeren Frequenzbereich und auch ist die Frequenzauflösung bei den vorliegenden Datenblöcken eine andere. Daher ist ein anderes Auswahlkriterium vonnöten.

Das nun gewählte Kriterium wählt jene N Maxima aus, deren Höhe mindestens 15 % des globalen Maximums des Datensatzes beträgt. Die Berechnung ist im folgenden Code-Ausschnitt zu sehen.

```

1 MPH = max(data)*0.15;           %Threshold for minimal peak height
2 [peaks,locsPROM]=findpeaks(data,'MinPeakHeight',MPH);
3                               %Detection of peaks above threshold

```

Da es den Rahmen dieser Arbeit überstiegen hätte, Hörversuche durchzuführen, um einen geeigneten Schwellwert durchzuführen, wurde sich darauf beschränkt, einige Varianten zu testen und mit dem subjektiven Höreindruck der Autorin zu vergleichen. Daher sind die Ergebnisse der Tonhöhenberechnung mit einem gewissen Grad an Vorsicht zu betrachten. Auch funktioniert die Tonhöhendetektion nicht einwandfrei, sie deckt sich nicht immer mit der subjektiven Wahrnehmung der Autorin. Tendenziell werden hier die tieferen Frequenzen zu stark gewichtet.

Maskierungseffekte. Die Berücksichtigung der Maskierungseffekte erfolgt in mehreren Schritten. Die Maskierung der μ -ten Frequenzkomponente wird mittels des Sound Pressure Level Excess LX (zu dt. Schalldruckpegel-Übermaß, kurz SPL Excess) bewertet.

Zur Berechnung dieses SPL Excess' werden einige weitere Maße benötigt:

— **Anregungspegel L_{Ex} (Excitation Level):**

Der Anregungspegel beschreibt, wie eine bestimmte Frequenzkomponente f_μ von den sie umgebenden Frequenzen f_ν angeregt wird, es gibt also das spektrale Maskierungsmuster wider. Dieses ist asymmetrisch um die anregende Frequenz verteilt. Diese Asymmetrie wird durch eine unterschiedliche untere ($27 \frac{\text{dB}}{\text{Bark}}$) und obere ($-24 \frac{\text{dB}}{\text{Bark}}$) Flankensteilheit s realisiert. Die Berechnung der Maskierung der μ -ten Frequenzkomponenten durch die ν -ten Frequenzkomponente nutzt den Pegel der anregenden Komponente L_ν sowie die Differenz der so genannten Tonheit z (critical-band rate) der beiden Komponenten.

$$z(f) = 13 \cdot \arctan\left(0,76 \cdot \frac{f}{\text{kHz}}\right) + 3,5 \arctan\left(\frac{f}{7,5 \text{ kHz}}\right) \text{ Bark} \quad (7)$$

$$s = 27 \frac{\text{dB}}{\text{Bark}} \quad \text{if } f_\mu \leq f_\nu \quad (8)$$

$$s = -24 - \frac{230 \text{ Hz}}{f_\nu} + 0,2 \cdot L_\nu \frac{\text{dB}}{\text{Bark}} \quad \text{if } f_\mu \geq f_\nu \quad (9)$$

$$L_{Ex,\nu}(f_\mu) = L_\nu - s \cdot (z_\nu - z_\mu) \text{ dB} \quad \mu, \nu \in [1, N] \quad (10)$$

— **Summenpegel** L_{sum} :

Diese Anregungspegel müssen nun noch aufaddiert werden. Bei dieser Summation wird der Pegel der angeregten Frequenzkomponente μ ausgelassen.

$$L_{sum}(f_\mu) = \sum_{\substack{\nu=1 \\ \nu \neq \mu}}^N 10^{\frac{L_{Ex,\nu}(f_\mu)}{20 \text{ dB}}} \text{ dB} \quad (11)$$

— **Hörschwelle** L_{Th} :

Die Hörschwelle beschreibt die Hörschwelle bei der angeregten Frequenz.

$$L_{Th}(f_\mu) = 3,64 \cdot \left(\frac{f_\mu}{\text{kHz}} \right)^{-0,8} - 6,5 \exp \left[-0,6 * \left(\frac{f_\mu}{\text{kHz}} - 3,3 \right)^2 \right] + 10^{-3} \cdot \left(\frac{f_\mu}{\text{kHz}} \right)^4 \text{ dB} \quad (12)$$

Nun kann das Ergebnis für den SPL Excess bestimmt werden.

$$LX_\mu = L_\mu - 10 \cdot \log_{10} \left[L_{sum}(f_\mu)^2 + 10^{\frac{L_{Th}(f_\mu)}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad (13)$$

Der SPL Excess wird nun für jedes der N prominenten Maxima pro Datenblock berechnet. Jene Komponenten, deren Anregungspegel über 0 dB liegt, werden für die weitere Berechnung der Tonhöhe genutzt, alle anderen Komponenten werden verworfen (siehe Gleichungen 18 und 19).

Tonhöhenabweichung. Treten akustische Ereignisse mit verschiedenen Frequenzen zeitgleich auf, geschieht es durch gewisse Mechanismen im Gehörssystem, dass nicht genau die gleichen Tonhöhen wahrgenommen werden, wie wenn die Frequenzen einzeln dargeboten würden. Diese Verschiebung der Tonhöhen ist auch lautstärkenabhängig. Dies fließt über Summen von Anregungspegeln in die Berechnung ein [5, S. 329ff].

Diese spektrale Tonhöhe H_μ wird für jede der zuvor identifizierten Frequenzkomponenten berechnet basierend auf den Tonhöhenverschiebungen ν_μ . Die spektrale Höhe wird in pitch units (pu) angegeben.

$$H_\mu = \frac{f_\mu}{\text{Hz}} \cdot (1 + \nu_\mu) \text{ pu} \quad (14)$$

$$LX'_\mu = L_\mu - 20 \cdot \log_{10} \sum_{\nu=1}^{\mu-1} 10^{L_{E\nu} \frac{f_\mu}{20 \text{ dB}}} \text{ dB} \quad (15)$$

$$LX''_\mu = L_\mu - 20 \cdot \log_{10} \sum_{\nu=\mu+1}^N 10^{L_{E\nu} \frac{f_\mu}{20 \text{ dB}}} \text{ dB} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \nu_\mu = & 2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{L_\mu}{\text{dB}} - 60 \right) \left(\frac{f_\mu}{\text{kHz}} - 2 \right) \\ & + 1,5 \cdot 10^{-2} \exp \left(\frac{-LX'_\mu}{20 \text{ dB}} \right) \cdot \left(3 - \ln \frac{f_\mu}{\text{kHz}} \right) \\ & + 3 \cdot 10^{-2} \exp \left(\frac{-LX''_\mu}{20 \text{ dB}} \right) \cdot \left(0,36 + \ln \frac{f_\mu}{\text{kHz}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Gewichtung Die spektralen Tonhöhen werden nun gewichtet mit den Faktoren WS , abhängig davon, wie stark sie zum Gesamtklang beitragen.

$$WS_\mu = \left[1 - \exp \frac{-LX_\mu}{15 \text{ dB}} \right] \frac{1}{\sqrt{1 + 0,07 \left(\frac{H_\mu}{700 \text{ Hz}} - \frac{700 \text{ Hz}}{H_\mu} \right)^2}} \quad \text{if } LX_\mu \geq 0 \quad (18)$$

$$WS_\mu = 0 \quad \text{if } LX_\mu < 0 \quad (19)$$

Harmonische Struktur Der letzte Schritt ist, die durch die prominenten Frequenzkomponenten erzeugte harmonische Obertonstruktur zu finden. Dies geschieht über die Bestimmung des größten gemeinsamen Teilers der Tonhöhen-Kandidaten.

Zunächst werden für jeden der R relevanten Tonhöhen-Kandidaten f_i $M = 6$ mögliche Subharmonischen $\underline{H}_{m,i}$ bestimmt.

$$\underline{H}_{m,i} = \frac{H_i}{m} \quad \begin{array}{l} i \in [1, R] \\ m \in [1, M] \end{array} \quad (20)$$

Im Anschluss wird für jedes Paar aus Subharmonischer $\underline{H}_{m,i}$ und der n -ten Subharmonischen einer anderen Frequenzkomponente $\underline{H}_{n,j}$ der Koinzidenzoeffizient C_{ij} berech-

net. Der Faktor n wird nach Gleichung 21 berechnet, sodass jene ganzzahlige Subharmonische gewählt wird, die $m \frac{H_j}{H_i}$ am nächsten ist. Der Koeffizient γ gibt den Grad der Inharmonizität des untersuchten Paares an (Gleichung 22), δ ist die Breite des Koinzidenzintervalls (Gleichung 23).

Zur Berechnung von C_{ij} (Gleichungen 24 und 25) werden die in Gleichung 18 berechneten Gewichte WS_i und WS_j herangezogen.

$$n = \text{round} \left(m \frac{H_j}{H_i} + 0,5 \right) \quad (21)$$

$$\gamma = \left| \frac{nH_i}{mH_j} - 1 \right| \quad (22)$$

$$\delta = 0,08 = \text{const.} \quad (23)$$

$$C_{ij} = \sqrt{\frac{WS_i WS_j}{mn}} \left(1 - \frac{\gamma}{\delta} \right) \quad \text{if } \gamma \leq \delta \quad (24)$$

$$C_{ij} = 0 \quad \text{if } \gamma > \delta \text{ and/or } n > 20 \quad (25)$$

Nun wird das Gewicht der Subharmonischen $\underline{H}_{m,i}$ aus der Summe der Koinzidenzkoeffizienten, multipliziert mit dem Grundfrequenzgewicht β , berechnet (fundamental frequency weight). Aus allen Subharmonischen wird nun jene mit dem größten Gewicht ausgewählt und als virtuelle Tonhöhe ausgegeben.

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{H_{im}}{800 \text{ pu}} \right)^4} \quad (26)$$

$$W_{jm} = \beta \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^R C_{ij} \quad (27)$$

2.2.2 Ergebnisse der Berechnung der virtuellen Tonhöhe

Virtuelle Tonhöhe. Die Ergebnisse der Tonhöhenberechnung werden für jeden der Fahrzeugtypen anhand eines Beispiels aus der jeweiligen Gruppe dargestellt. Dafür werden das Spektrogramm und drei für die Zylinderzahl relevante Motorordnungen (durchgezogene Linien) abgebildet, sowie die vom Algorithmus detektierte Tonhöhe in Form von 'x'-Markern dargestellt.

Es wird erwartet, dass die virtuelle Tonhöhe im Bereich der Ordnung zu finden ist, die der halben Zylinderanzahl entspricht.

Das Ergebnis ist nicht in allen Fällen eindeutig. Angegeben wird als Tonhöhe jene Ordnung, der für die jeweilige Gruppe am meisten Treffer zugeordnet werden können. Es gibt jedoch in den meisten Fällen einige Ausreißer oder eine Überlagerung mit breiten Geräuschbändern, wo eine klare Identifikation der Tonhöhe - auch subjektiv hörend - erschwert ist. Dies ist insbesondere bei geringer Belastung häufig zu beobachten. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 20 dargestellt.

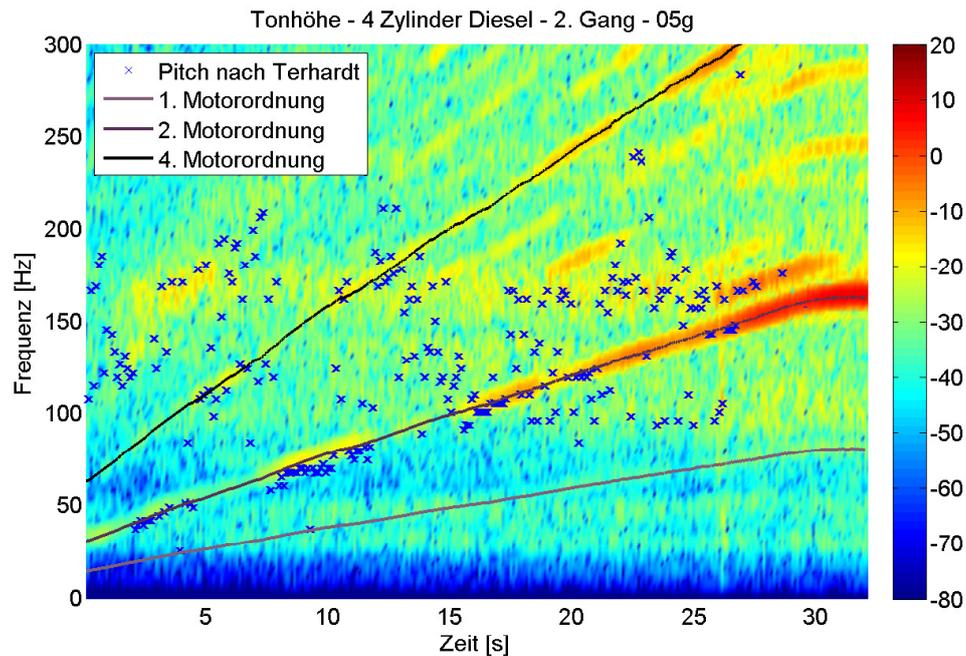


Abbildung 20 – Tonhöhe 4-Zylinder Benzin

Im Folgenden werden die Ergebnisse für jeden Fahrzeugtypen detailliert erläutert.

2 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: 1. Ordnung (Abbildung 21).

Dies entspricht dem erwarteten Ergebnis.

3 Zylinder Diesel: Virtuelle Tonhöhe: 1,5. Ordnung (Abbildung 22).

Auch dies entspricht der Erwartung, wobei die Detektion der 1,5. Ordnung bei niedrigen Drehzahlen stabiler ist.

3 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: 1,5. Ordnung (Abbildung 23).

Ähnlich wie bei den Dreizylinder-Dieselfahrzeugen, wird erwartungsgemäß die 1,5. Ordnung als Tonhöhe - insbesondere bei niedriger Drehzahl - ausgegeben. Es treten auch tiefere Tonhöhen im Bereich zwischen 1. und 1,5. Ordnung auf.

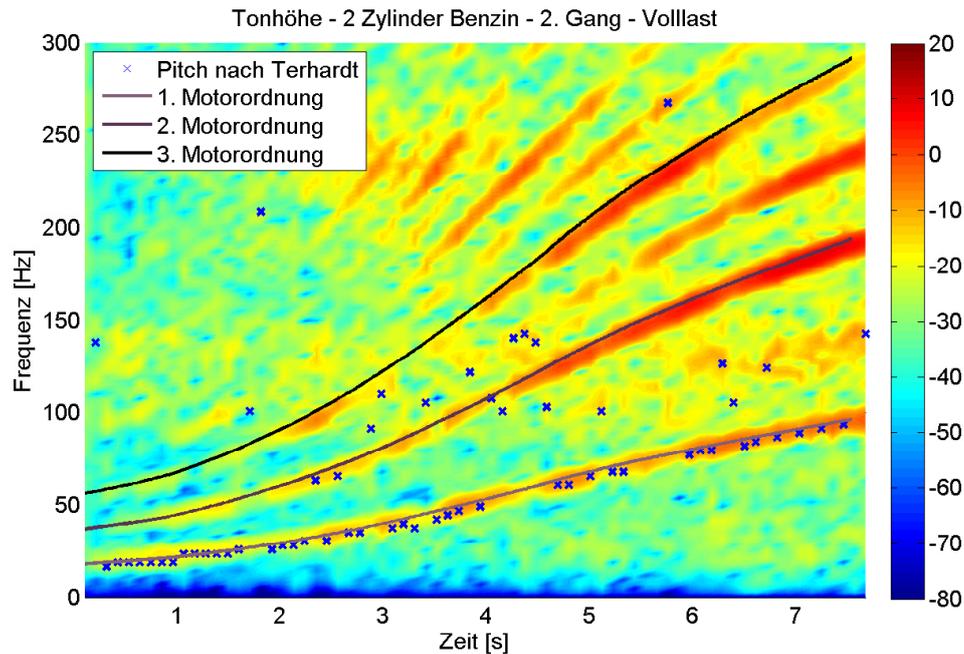


Abbildung 21 – Tonhöhe 2-Zylinder Benzin

4 Zylinder Diesel: Virtuelle Tonhöhe: 2. Ordnung (Abbildung 24).

Der Erwartung gemäß wird die zweite Ordnung überwiegend als Tonhöhe detektiert, in einigen Fällen wird die Tonhöhe allerdings in einem tiefen Geräuschband (in etwa zwischen 30 und 45 Hz) detektiert - die subjektive Wahrnehmung weicht hier aber oft ab, es wird eher der Hochlauf als Tonhöhe wahrgenommen. Hier kommt zum Tragen, dass der Algorithmus tendenziell tiefe Frequenzen favorisiert.

4 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: 2. Ordnung (Abbildung 25).

Auch hier entspricht die Tonhöhe überwiegend der Erwartung. Es gibt in Einzelfällen auch Treffer in der 4. und 1,5. Ordnung.

6 Zylinder Diesel: Virtuelle Tonhöhe: Insgesamt sehr uneinheitlich, bei niedrigen Drehzahlen eher 2,5. und auch 3. Ordnung, bei höheren Drehzahlen auch 1,5. und 2. Ordnung möglich (Abbildung 26).

6 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: Die detektierten Tonhöhen sind weit verteilt, am ehesten in der 3., der 1,5. und der 1. Ordnung (Abbildung 27).

Bei niedrigen Drehzahlen wird eher die 3. Ordnung detektiert, mit steigender Drehzahl überwiegen eher die niedrigeren Ordnungen. Es wird in Einzelfällen

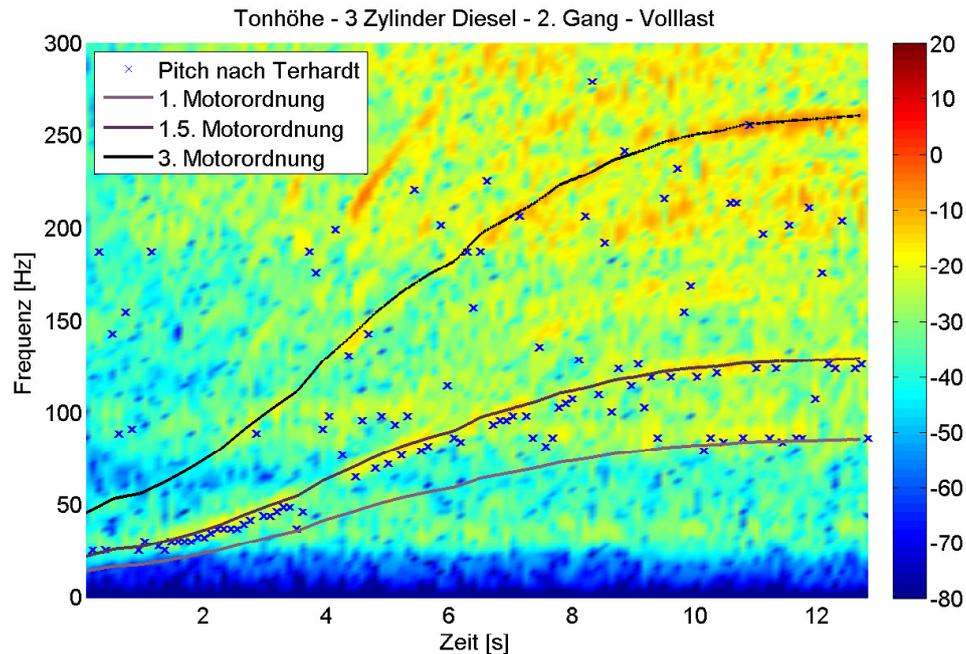


Abbildung 22 – Tonhöhe 3-Zylinder Diesel

auch die 2. Ordnung als Tonhöhe detektiert. Insgesamt sind die Ergebnisse wenig einheitlich.

8 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: Viel Schwankung bei der Detektion, am ehesten liegt die Tonhöhe bei der 1., teils auch bei der 1,5. Ordnung (Abbildung 28).

Die 4. Ordnung, die zu erwarten war, kommt nur in seltenen Fällen bei höherer Belastung vor.

10 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: 2,5. Ordnung im niedrigen Drehzahlbereich, bei höheren Drehzahlen 1. Ordnung (Abbildung 29).

Die erwartete 5. Ordnung wird nur in sehr wenigen Fällen als Tonhöhe detektiert.

12 Zylinder Benzin: Virtuelle Tonhöhe: Am ehesten 1,5. Ordnung, doch sind die Ergebnisse allgemein im Bereich zwischen der 1. und der 3. Ordnung verteilt (Abbildung 30).

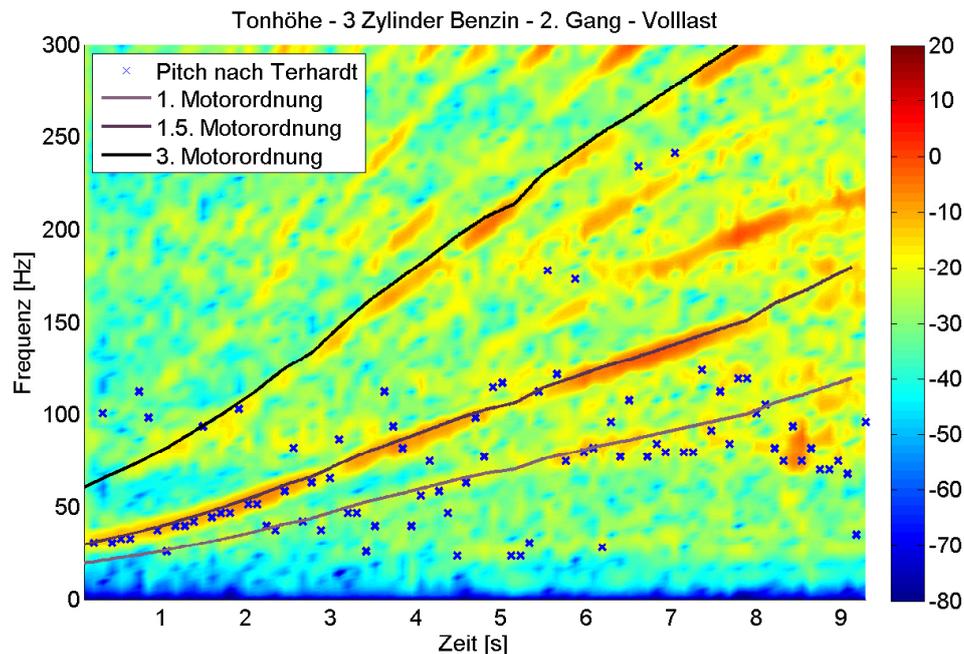


Abbildung 23 – Tonhöhe 3-Zylinder Benzin

Zusammenfassung Bei einigen Fahrzeugtypen entspricht das Tonhöhen-Ergebnis der erwarteten Ordnung - sie entspricht also der halben Zylinderanzahl. Dies gilt für die Fahrzeuge mit zwei, drei und vier Zylindern (Benzin und Diesel). Dabei ist in einigen Fällen festzustellen, dass dieses Ergebnis bei niedriger Drehzahl klarer auftritt als bei höheren Drehzahlen. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei höherer Drehzahl im Motorenklang oft mehr Geräusch-Anteile auftreten, die die Identifikation der Tonhöhe erschweren.

Bei Fahrzeugen mit einer höheren Zylinderanzahl tritt eine deutlich größere Streuung auf und ein eindeutiges Ergebnis ist nicht festlegbar. Die detektierten Tonhöhen liegen hier zumeist bei niedrigeren Ordnungen als erwartet. Auch lässt sich öfter ein drehzahlabhängiges Verhalten erkennen, wo bei höherer Drehzahl eher eine niedrigere Ordnung als Tonhöhe auftritt als bei geringer Drehzahl.

Insbesondere bei den Sechszylinder-Motoren ist das Ergebnis wenig einheitlich. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei höheren Zylinderzahlen als Bauform eher der V-Motor genutzt wird als der Reihenmotor. Durch die Anordnung der Zylinder und Kolben ist der Reihenmotor laufruhiger als der V-Motor. Hierbei bildet allerdings der V12 eine Ausnahme, da in diesem Fall alle Massenkräfte und Momente ausgeglichen sind [7]. Die Form des V-Motors ist kompakter, aber es werden mehr Vibrationen und damit mehr Störgeräusch erzeugt. Bei Sechszylinder-Motoren sind beide Bauformen verbreitet, somit setzt sich der vorhandene Datensatz aus Fahrzeugen mit Reihen- und V-Motor

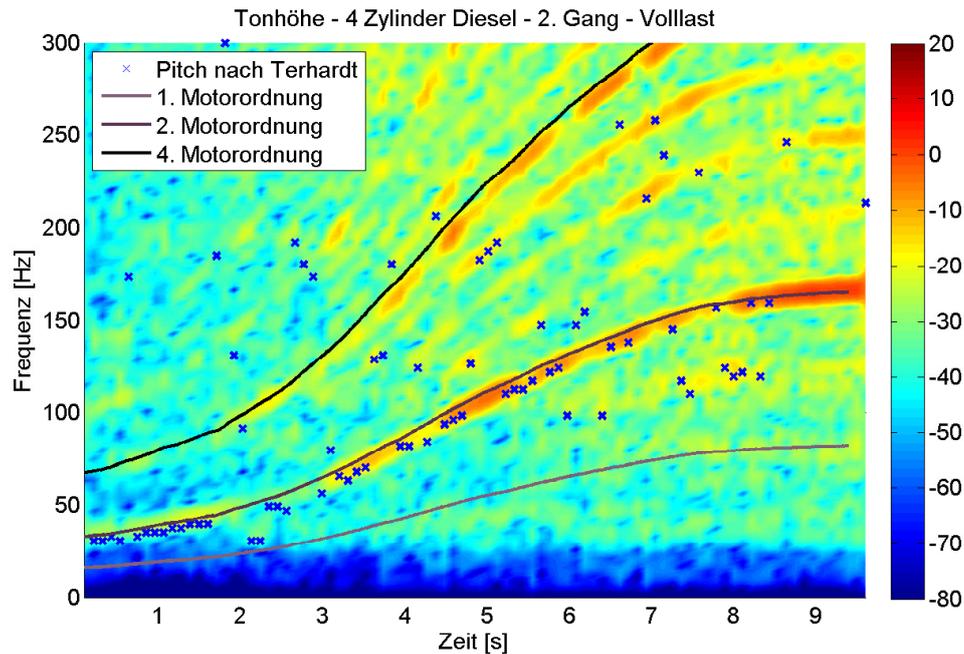


Abbildung 24 – Tonhöhe 4-Zylinder Diesel

zusammen. Dadurch kann sich das wenig einheitliche Ergebnis erklären. Bei höheren Zylinderzahlen wird fast ausschließlich der V-Motor genutzt. Daher treten bei den Acht- und Zehnzylindermotoren viele durch die Bauform bedingte Vibrationen auf, wodurch im Spektrum viele geräuschhafte Anteile vertreten sind. Diese beeinflussen die Detektion der Tonhöhe.

Hierbei muss angemerkt werden, dass es für die geräuschhaften Klänge auch subjektiv schwierig ist, eine klare Tonhöhe zu hören. Erschwerend kommt hinzu, dass der in [6] vorgestellte Algorithmus ursprünglich für Musik ausgelegt ist. Da das Motorengeräusch deutlich andere Eigenschaften in Bezug auf Grundfrequenz und Frequenzanteilen aufweist, können die Berechnungsschritte nicht identisch übernommen werden. Um die Berechnungsschritte auf das Fahrzeuggeräusch optimal anzupassen, sollten psychoakustische Untersuchungen zur Optimierung des Algorithmus durchgeführt werden.

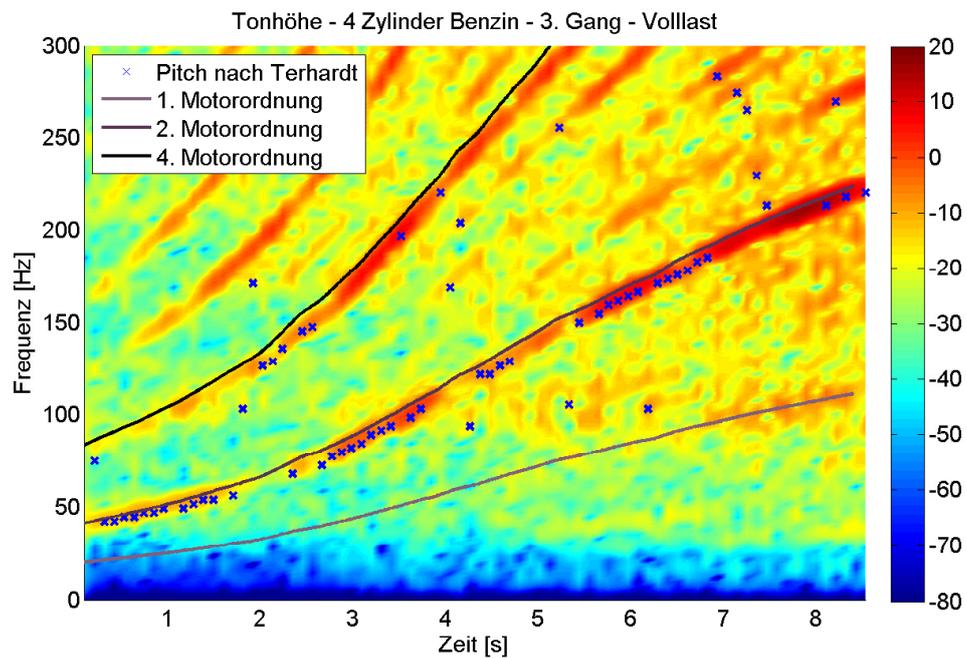


Abbildung 25 – Tonhöhe 4-Zylinder Benzin

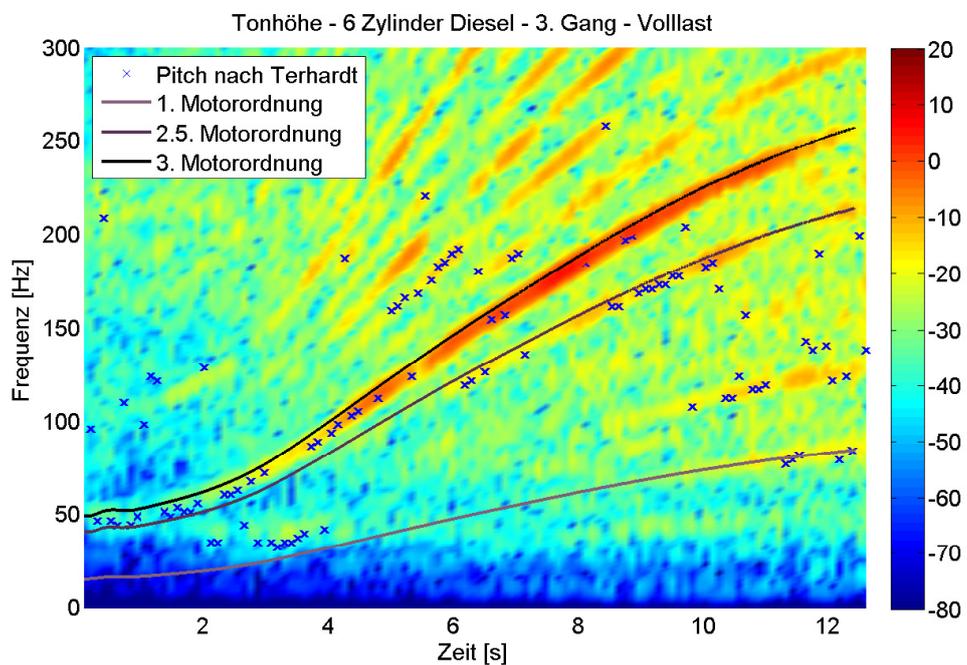


Abbildung 26 – Tonhöhe 6-Zylinder Diesel

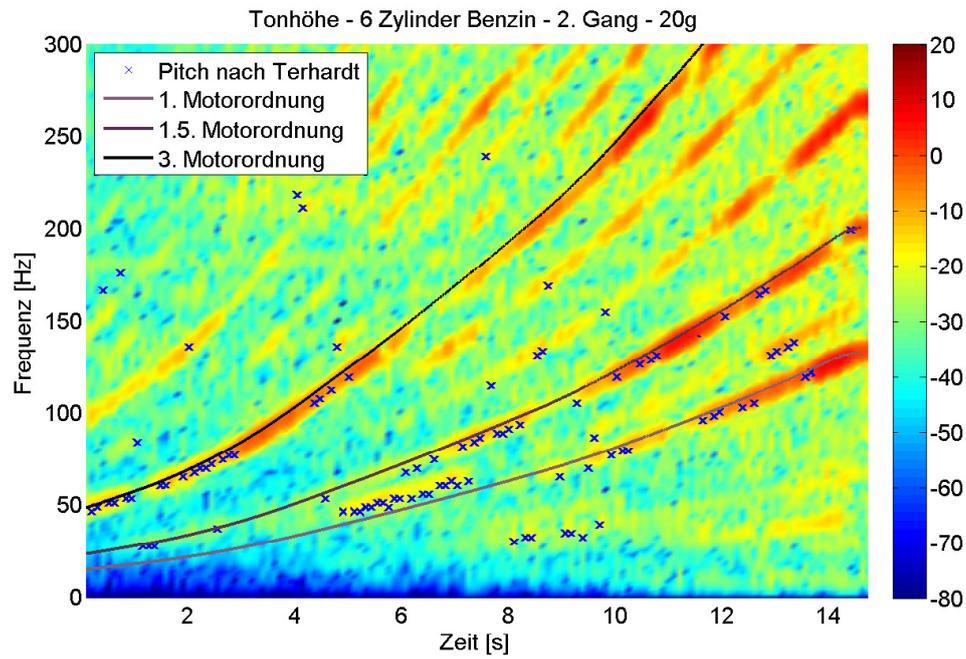


Abbildung 27 – Tonhöhe 6-Zylinder Benzin

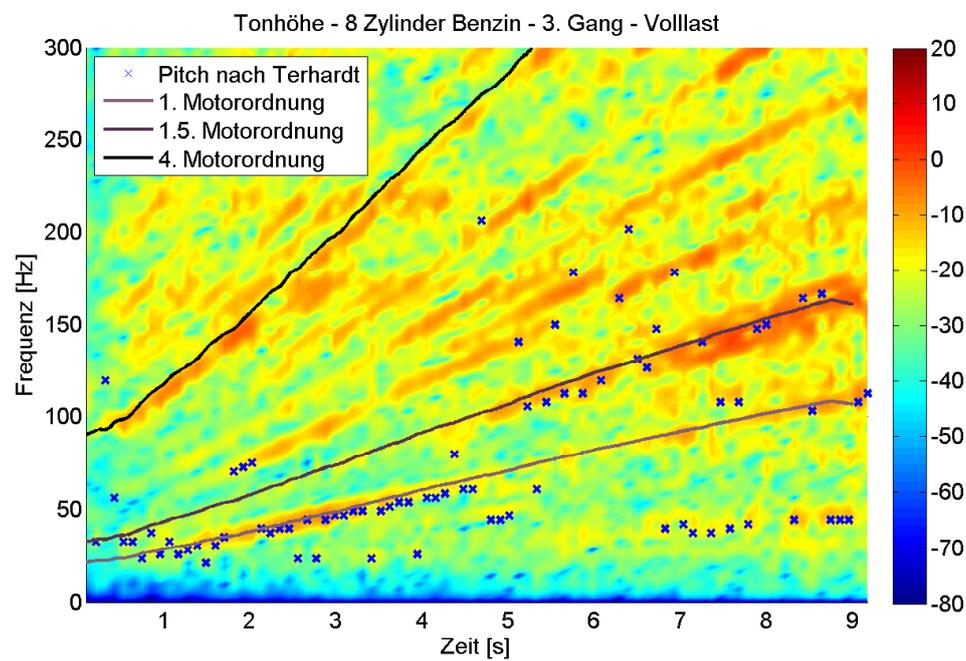


Abbildung 28 – Tonhöhe 8-Zylinder Benzin

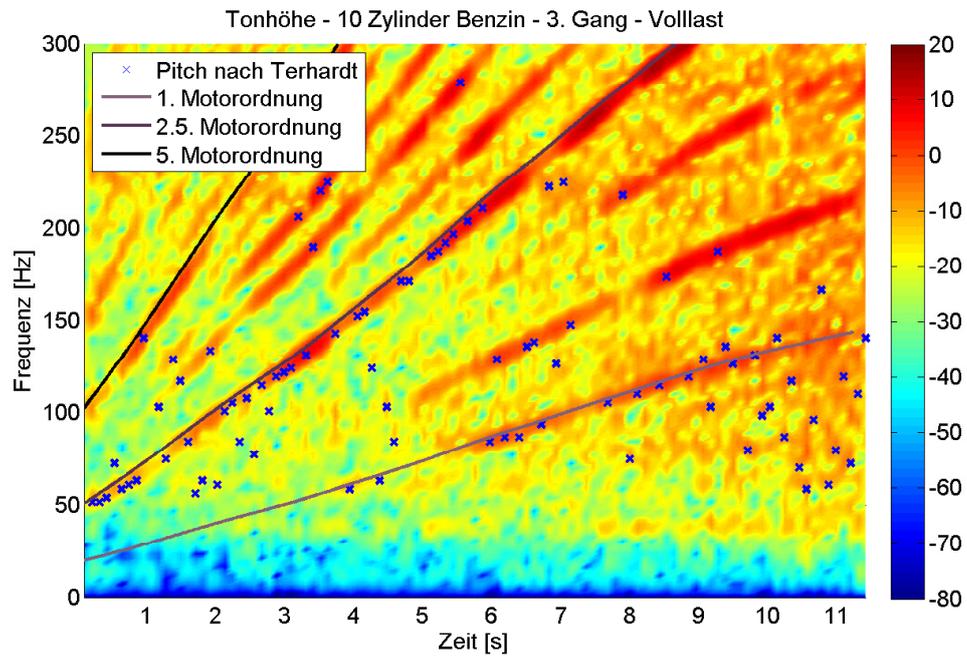


Abbildung 29 – Tonhöhe 10-Zylinder Benzin

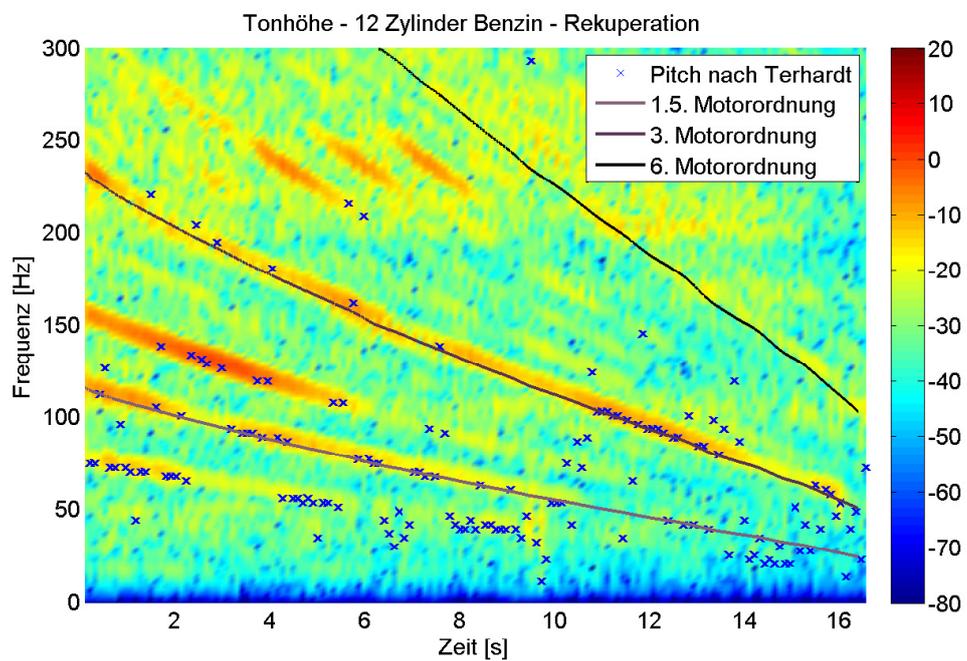


Abbildung 30 – Tonhöhe 12-Zylinder Benzin

2.3 Harmonische Strukturen

Es wird noch einmal separat untersucht, welche musikalischen Intervalle in den Klängen der Fahrzeuge vorherrschen. Hierfür werden als Grundlage die Ordnungsanalysedaten der Fahrzeuge genommen und die Energieanteile jener Ordnungen bestimmt, die ausgewählten Intervallen entsprechen. Betrachtet wurden hierbei Oktaven, Quinten, Terzen und in einigen Fällen auch Quarten.

2.3.1 Berechnung der harmonischen Struktur

Harmonisches Gefüge. Um zu bestimmen, welche Intervallstruktur den Fahrzeugklang dominiert, wird die Energie E_I , die in jenen Ordnungen O_I liegt, die dem jeweiligen Intervall $I \in \{\text{Oktav, Quint, Quart, Terz}\}$ entsprechen, mit der Gesamtenergie in allen Ordnungen E_{ges} ins Verhältnis gesetzt und dieses Verhältnis dann als Prozentzahl p_I angegeben (Gleichung 28). A_i steht hier für die Amplitude der i -ten Ordnung.

Welche Ordnungen konkret für die Berechnung der Energieinhalte der Intervalle herangezogen werden, hängt von der Zündfrequenz und damit von der Zylinderanzahl N_Z des jeweiligen Motors ab. Eine Auflistung der Ordnungen für die Berechnung ist in Tabelle 3 zu finden. Hier wird das dem Intervall entsprechende Frequenzverhältnis auf jene Ordnung O_Z bezogen, die der Zündfrequenz entspricht.

Für die Berechnung von E_I wird diese Ordnung allerdings aus der Summe herausgenommen. Relevant ist dies im Fall der Oktav. In der Ordnung, die der Zündfrequenz entspricht, ist ein hoher Energieanteil enthalten, wodurch bei einer Berechnung der prozentualen Energie der Oktav ein deutlich höherer Wert verglichen zu der Energie der anderen betrachteten Intervalle herauskommt. Die Oktav ist somit übermäßig stark gewichtet. Für die Analyse der Unterschiede in der Ausprägung der Intervalle wird diese Ordnung nun herausgenommen.

$$p_I = \frac{E_I}{E_{ges}} \cdot 100\% = \frac{\sum_{\substack{i \in O_I \\ i \neq O_Z}} A_i^2}{\sum_{i \in O_{ges}} A_i^2} \cdot 100\% \quad \begin{array}{l} O_I \dots \text{Ordnungen zum Intervall I} \\ O_Z = \frac{N_Z}{2} \\ O_{ges} \in \{0,5, 1, 1,5, 2, \dots, 32\} \end{array} \quad (28)$$

Bei der Betrachtung von Tabelle 3 ist zu sehen, dass jene Ordnung, die einer bestimmten Zylinderanzahl und einem bestimmten Intervall zugeordnet sind, für eine andere Zylinderanzahl, einem anderen Intervall entsprechen. So gehören beispielsweise die Ordnungen, die bei einem Dreizylinder-Fahrzeug der Oktav zugeordnet sind, bei einem Vierzylinder-Fahrzeug zur Quint.

Wählt man also statt der Zündfrequenz die Drehzahl - und damit die erste Ordnung - als

Intervall	Frequenzverhältnis	Zylinderzahl	Ordnungen						
Oktav	1:2	2, 4, 8	0,5	1	2	4	8	16	32
		3, 6, 12	1,5	3	6	12	24		
		10	2,5	5	10	20			
Quint	2:3	2, 4, 8	1,5	3	6	12	24		
		3, 6, 12	4,5	9	18				
		10	7,5	15	30				
Quart	3:4	3, 6, 12	0,5	1	2	4	8	16	32
Terz	4:5	2, 4, 8	2,5	5	10	20			
		3, 6, 12	7,5	15	30				
		10	12,5	25					

Tabelle 3 – Ordnungen für die Berechnung der Intervall-bezogenen Energie, wobei jene Ordnung, die der Zündfrequenz entspricht aus der Berechnung herausgenommen wird

Grundlage für die Ordnungsauswahl bei der Energiebestimmung der Intervalle, so ergeben sich für die Fahrzeuge mit drei, sechs, zehn oder zwölf Zylindern deutlich andere Ergebnisse.

Bei jenen Fahrzeugen mit zwei, vier und acht Zylindern sind die Unterschiede wesentlich geringer, da dieselben Ordnungen genutzt werden, wie zuvor.

Die Quart wird nur für Fahrzeuge mit einer durch drei teilbaren Zylinderanzahl betrachtet, da nur in diesem Fall das Frequenzverhältnis 3 : 4 zu halb- beziehungsweise ganzzahligen Ordnungen führt.

2.3.2 Ergebnisse der Harmoniebestimmung

Vergleich der verschiedenen Fahrzeugtypen und Lastzustände Je nach Motorentyp und Lastzustand ergeben sich unterschiedliche Energieanteile in den Ordnungen, die den musikalischen Intervallen der Oktav (O), der Quint (Q / Qi), der Quart (Qa) und der Terz (T) zugeordnet werden können. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail erläutert.

Die Ergebnisse für alle Motorentypen werden in Form von Boxplots für jeden Lastzustand dargestellt. Die Box enthält die Ergebnisse zu jedem Fahrzeug der entsprechenden Gruppe, berechnet nach der zuvor vorgestellten Methode. Für den Fall der Oktav zeigt die blaue Box den Anteil ohne den Energieanteil in der Ordnung der Zündfrequenz an, die rote Box zeigt den Energieanteil mit der Ordnung der Zündfrequenz an.

Bei jenen Fahrzeugen, deren Zylinderzahl nicht einer Potenz von zwei entspricht, wird in Ergänzung noch das Intervall genannt, das dominant ist, wenn man an Stelle der Zündfrequenz, die Drehzahl als Grundlage für die Auswahl der Ordnungen für die Berechnung hinzuzieht.

2 Zylinder Benzin: Das dominante Intervall ist hier eindeutig die Oktav, wobei zusätzlich eine Abhängigkeit vom Lastzustand erkennbar ist. Die Oktav ist bei höherer Belastung schwächer ausgeprägt, wenn man die Ordnung der Zündfrequenz außen vor lässt, andernfalls hat die Oktav einen konstant hohen Energieanteil.

Die Quint ist zumeist stärker ausgeprägt als die Terz, ausgenommen ist hierbei der Fall der Rekuperation. Auch ist hier die Oktav wesentlich stärker als bei den übrigen Belastungszuständen (Abbildung 31).

3 Zylinder Diesel: Bei Einbeziehung der Ordnung der Zündfrequenz ist die Oktav das Intervall, in dem die meiste Energie auftritt. Der Anteil der Zündfrequenz-Ordnung steigt mit größerer Last. Ohne diese überwiegt teilweise auch die Quart. Die Höhe der vier gewählten Intervalle ist ohne Zündfrequenz insgesamt eher niedrig. Insbesondere die Terz ist schwach ausgeprägt (Abbildung 32).

Bezogen auf die Drehzahl wäre in diesem Fall nicht die Oktav, sondern die Quint das vorherrschende Intervall.

3 Zylinder Benzin: Wie schon beim entsprechenden Dieselmotor, ist auch hier die Oktav das vorherrschende Intervall bei Einbezug der Zündfrequenzordnung, insbesondere unter hoher Last. Wird diese vernachlässigt ist teils die Oktav, teils die Quart dominant. An dritter Stelle folgt die Quint, die Terz tritt nur in geringem Maße auf, ihre Beteiligung liegt meist unter 1%. Diesel- und Benzinmotor ähneln sich stark im Bezug auf Beteiligung der untersuchten Intervalle (Abbil-

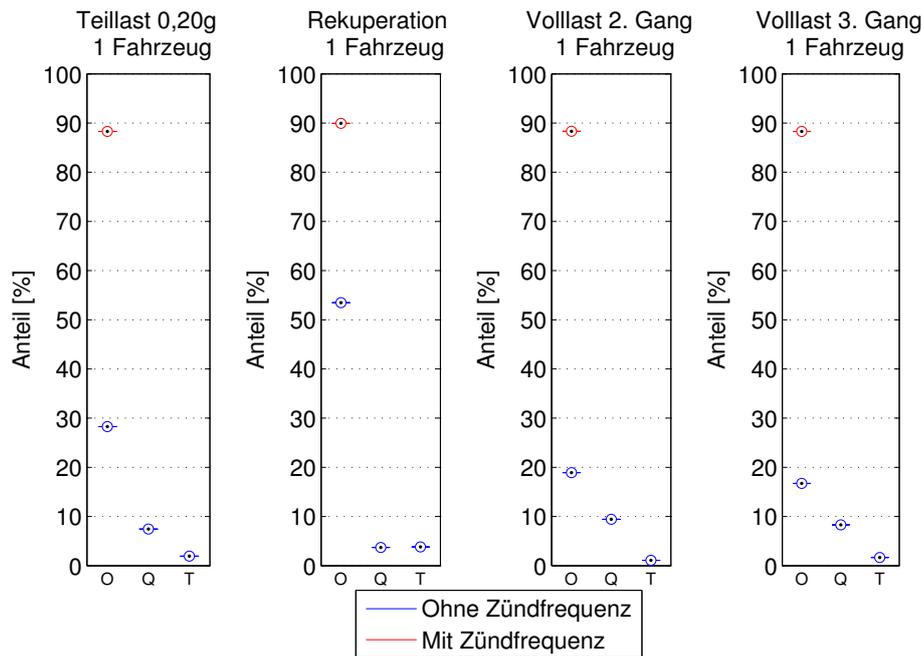


Abbildung 31 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 2 Zylinder Benzin

dung 33).

Bei Bezug auf die Drehzahl anstelle der Zündfrequenz wäre auch hier - wie beim Diesel - die Quint das dominante Intervall.

4 Zylinder Diesel: Bei Vierzylinder-Motoren ist erneut die Oktav das dominante Intervall. Ohne Berücksichtigung der Zündfrequenzordnung steigt ihre Ausprägung mit höherer Last, wobei das Maximum bei der Last von 0.4g erreicht ist, bei Vollast ist das Niveau wieder etwas geringer.

Bei geringer Belastung ist die Quint etwas stärker ausgeprägt als die Terz, ansonsten sind beide auf ähnlichem Niveau (Abbildung 34).

4 Zylinder Benzin: Auch hier ist die Oktav vorherrschend. Die Quint ist etwas stärker ausgeprägt als die Terz, bei niedriger Last ist der Unterschied deutlicher (Abbildung 35).

Wie schon bei den Dreizylinder-Fahrzeugen, ist kein eklatanter Unterschied zwischen Diesel- und Benzinfahrzeugen zu erkennen, es sind lediglich die Werte für alle Intervalle beim Diesel etwas höher als beim Benzinfahrzeug und der Anteil der Zündfrequenz ist bei geringer Last etwas größer.

6 Zylinder Diesel: Bei Einbezug der Zündfrequenz-Ordnung ist die Oktav das ener-

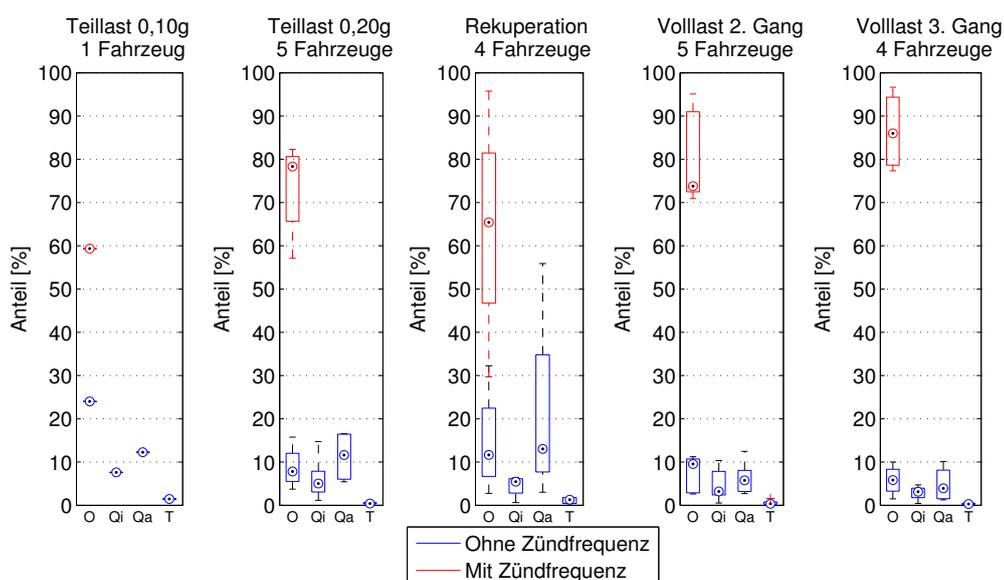


Abbildung 32 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Qi), Quart (Qa) und Terz (T) - 3 Zylinder Diesel

giereichste Intervall, der Anteil an der Gesamtenergie ist aber insbesondere bei geringer Last auffallend gering.

Ohne die Zündfrequenz-Ordnung ist teils die Quart, in einigen Fällen aber auch die Quint das dominante Intervall. Dies trifft bei keinem der anderen Motorentypen zu.

Die Oktav ist mal am zweit-, mal am drittstärksten ausgeprägt und hat für alle Lastzustände ein höheres Niveau als die Terz (Abbildung 36).

Interessanterweise ist bei Bezug auf die Drehzahl anstelle der Zündfrequenz, die Quint das vorherrschende Intervall bei diesem Motorentyp.

6 Zylinder Benzin: Die Energieverteilung unterscheidet sich vom entsprechenden Dieselmotor.

Berücksichtigt man die Zündfrequenz, ist die Oktav vorherrschend, ihr Anteil steigt mit größerer Last. Ohne die Zündfrequenz-Ordnung trifft dies nur auf die Volllastzustände zu, ansonsten ist die Quart das dominante Intervall.

Der Anteil von Quint und Terz ist durchgehend sehr gering und liegt bei der Terz zumeist unter 1% (Abbildung 37).

Auf die Drehzahl bezogen wäre in diesem Fall die Quint das dominante Intervall.

8 Zylinder Benzin: In diesem Fall ist die Oktav das vorherrschende Intervall, insbesondere im Falle der Rekuperation. Der Unterschied des Energieanteils der

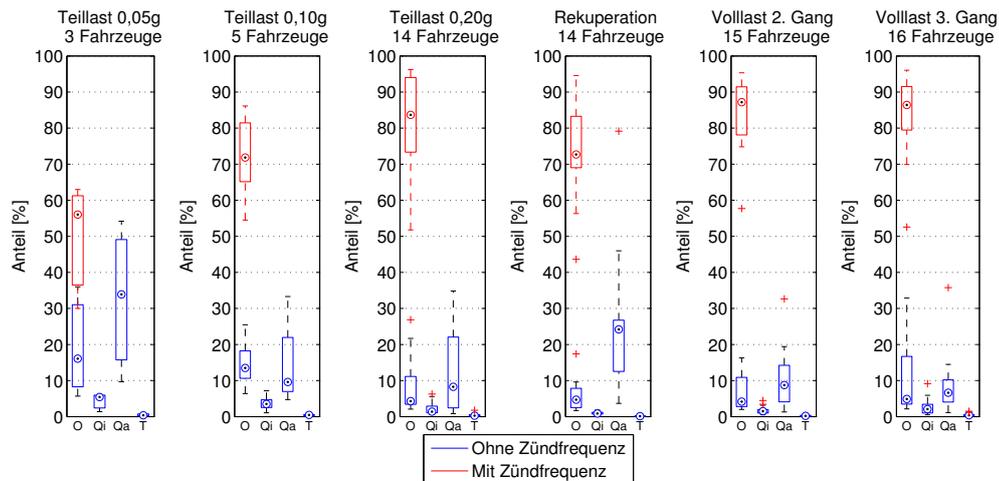


Abbildung 33 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Qi), Quart (Qa) und Terz (T) - 3 Zylinder Benzin

Oktav mit und ohne Einbezug der Zündfrequenz-Ordnung ist vergleichsweise gering. Ansonsten ist keine Abhängigkeit vom Belastungszustand zu erkennen. Die Quint ist zumeist am zweitstärksten ausgeprägt, ausgenommen ist hierbei die Volllast, wo Terz und Quint auf ähnlichem Niveau sind (Abbildung 38). Der Anteil der Terz ist größer als bei allen anderen betrachteten Motorentypen. Die Anteile der drei Intervalle sind beim Achtzylinder-Benzinfahrzeug insgesamt bei vergleichsweise hohen Werten.

10 Zylinder Benzin: Hier ist erneut die Oktav das deutlich vorherrschende Intervall, ihr Anteil ist im Vergleich mit den anderen Motorentypen auf einem hohen Niveau. Auffallend ist, dass der Beitrag der Zündfrequenzordnung sehr gering ist. Ausgenommen ist hierbei der Volllastzustand im zweiten Gang. Hier liegt der Anteil der Oktav ohne die Zündfrequenzordnung für eines der beiden untersuchten Fahrzeuge deutlich niedriger - dafür ist die Zündfrequenzordnung, aber auch die Quint etwas stärker. Ansonsten haben Quint und Terz nur einen sehr geringen Anteil am Klang (Abbildung 39).

Bezogen auf die Drehzahl wäre hier die Terz das dominante Intervall.

12 Zylinder Benzin: Bei diesem Motor ist meist die Oktav stark dominant, bei Rekuperation ist allerdings der Anteil der Quart größer und übersteigt den Anteil der Oktav, sogar bei Berücksichtigung der Zündfrequenz-Ordnung. Anzumerken ist, dass diese vergleichsweise wenig Energie beiträgt. Die Quint ist am drittstärksten ausgeprägt. Die Terz hat nur einen sehr geringen Anteil (Abbildung 40). Die Ausprägung der Oktav ist verglichen mit den anderen Motorentypen

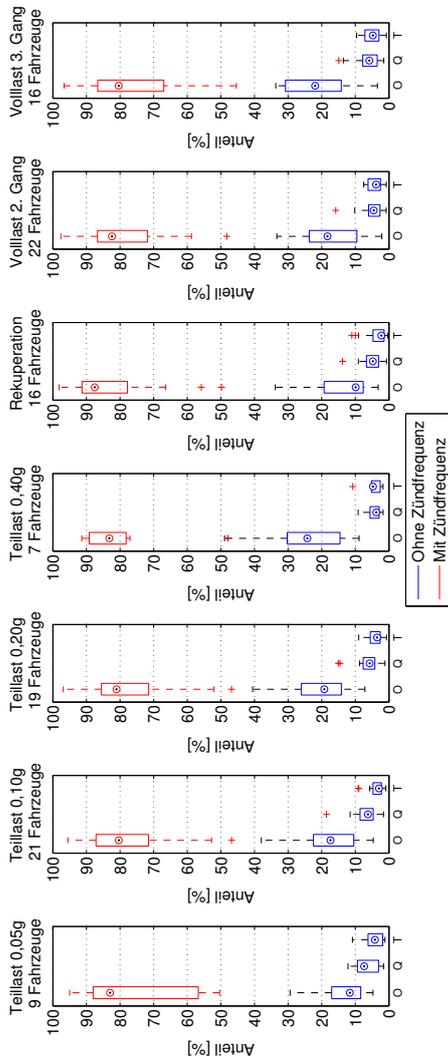


Abbildung 34 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 4 Zylinder Diesel

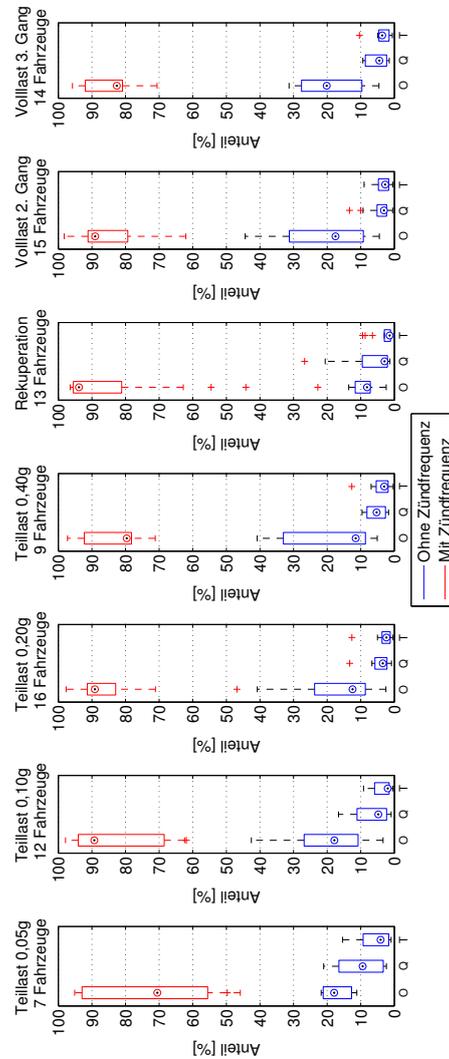


Abbildung 35 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 4 Zylinder Benzin

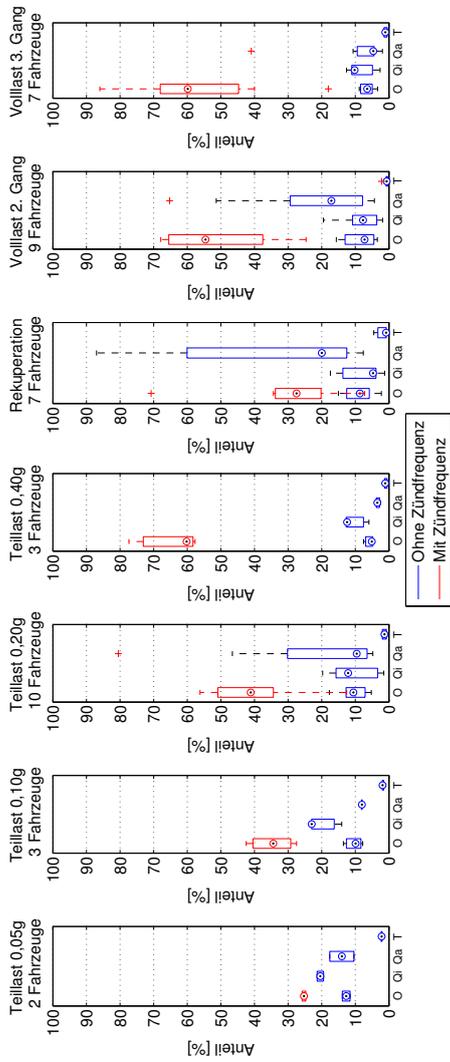


Abbildung 36 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 6 Zylinder Diesel

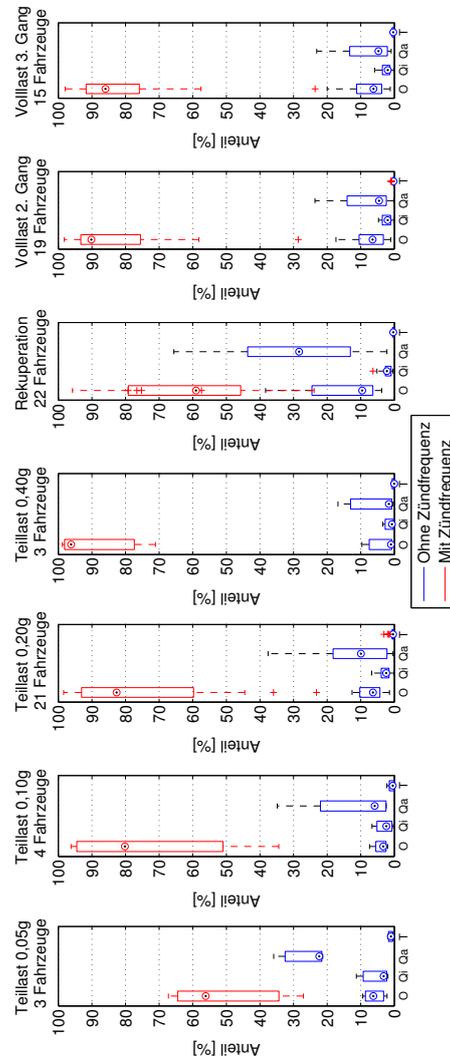


Abbildung 37 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 6 Zylinder Benzin

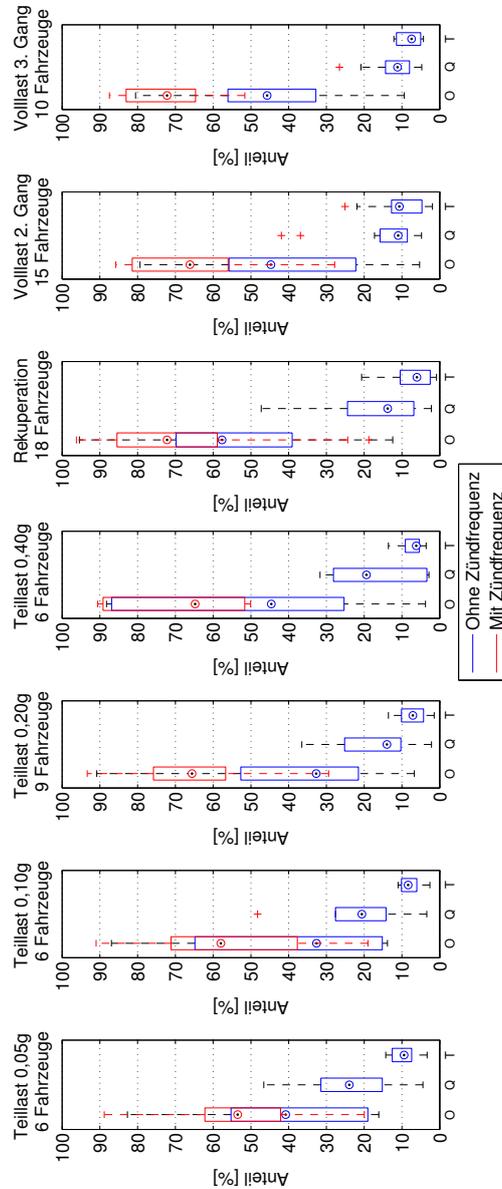


Abbildung 38 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 8 Zylinder Benzin

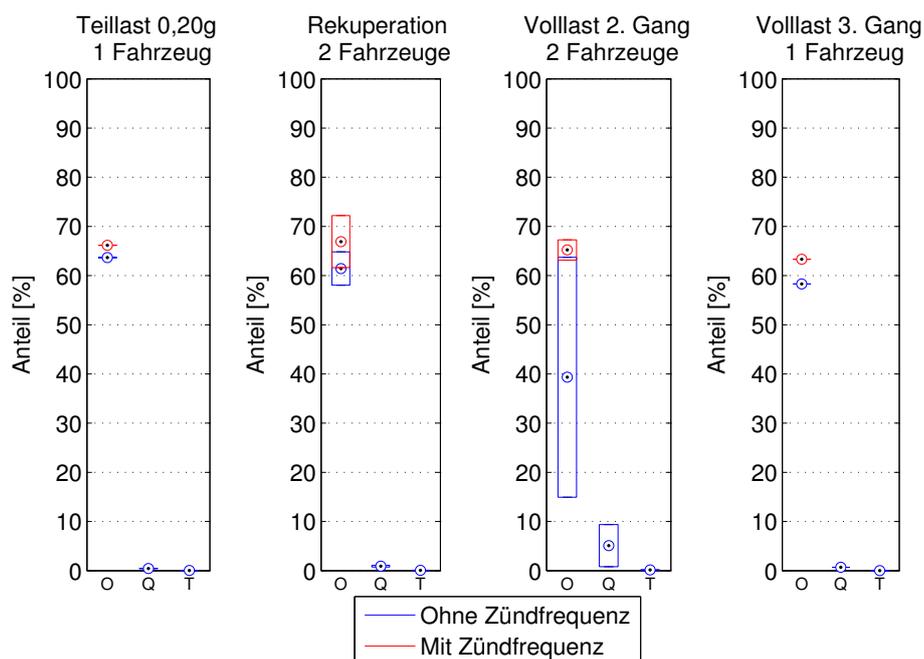


Abbildung 39 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 10 Zylinder Benzin

pen auf einem sehr hohen Niveau, lediglich bei den Zehnzylinder-Benzinmotoren ist der Anteil - je nach Belastungszustand - ähnlich.

Bei Bezug auf die Drehzahl würde die Quint vorherrschen.

Zusammenfassung Bei nahezu allen untersuchten Motorentypen ist die Oktave das vorherrschende Intervall. Da diese durch die jene Motorordnungen bestimmt ist, die der Zündfrequenz und deren Harmonischen entsprechen, ist dies zu erwarten.

Der Anteil der Ordnung, die der Zündfrequenz entspricht an der Gesamtenergie variiert je nach Zylinderzahl. Bei hohen Zylinderzahlen, insbesondere bei zehn und zwölf Zylindern ist der Anteil der Zündfrequenz gering, dafür findet sich viel Energie in den Oktaven oberhalb der Zündfrequenz wieder.

Lässt man diese Ordnung außen vor, ist das Schema der Energieanteile bis auf einen Ausnahmefall bei allen Motorentypen ähnlich, es sind jedoch systematische Unterschiede zu finden. Dabei lassen sich die Motoren in drei Gruppen unterteilen. Jene, deren Zylinderzahl einer Potenz von zwei entspricht (zwei, vier und acht Zylinder), jene, deren Zylinderzahl ein ganzzahliges Vielfaches von drei ist (drei, sechs und zwölf Zylinder) und als letzte Gruppe die Fahrzeuge mit 10 Zylindern. Im Folgenden werden diese Gruppen kurz als Zweier-, Dreier-, und Zehner-Gruppe bezeichnet.

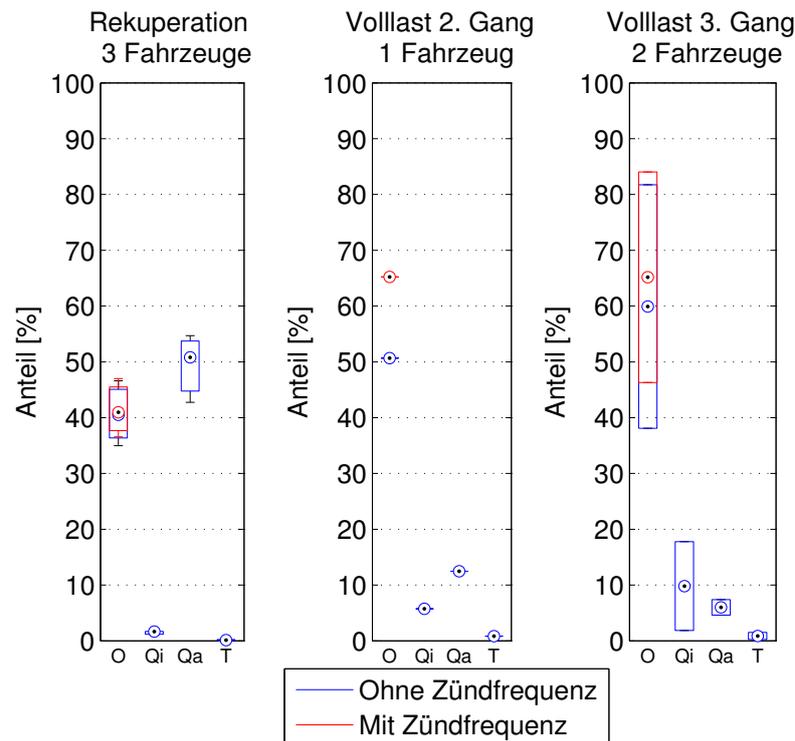


Abbildung 40 – Energieanteile der Intervalle Oktav (O), Quint (Q) und Terz (T) - 12 Zylinder Benzin

In der Zweier- und Zehner-Gruppe ist die Oktav dominant, wobei die höchsten Anteile der Oktav in der Zehner-Gruppe anzutreffen sind. In der Dreier-Gruppe hat mitunter auch die Quart einen auffallend großen Energieanteil. Einen Sonderfall hierzu bilden die Sechszylinder-Dieselmotoren - hier hat nicht nur die Quart, sondern auch die Quint einen großen Energieanteil - die Oktav ist hingegen verhältnismäßig schwach ausgeprägt.

Schon bei der Untersuchung der virtuellen Tonhöhe war zu beobachten, dass das Ergebnis für Sechszylinder-Dieselmotoren nicht der Erwartung entspricht, sondern insgesamt wenig einheitlich ist. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich der Datensatz aus Fahrzeugen der zwei Bauformen Reihen- und V-Motor zusammensetzt, deren Klänge sich voneinander unterscheiden. Auch treten beim V-Motor mehr Vibrationen und somit mehr Störgeräusche auf, was erklären könnte, warum das Ergebnis für diesen Motor von dem der anderen Motorentypen abweicht.

Eine weiterführende Untersuchung, die genauer die Unterschiede in den Klängen der verschiedenen Bauformen untersucht, könnte Aufschluss dazu bieten.

Die Quint ist für alle Gruppen am zweitschwächsten ausgeprägt. In der Zehner-Gruppe hat sie einen geringeren Anteil als in Zweier und Dreiergruppe. Dort sind die Anteile

relativ ähnlich.

Die Terz ist in allen Fällen das am schwächsten ausgeprägte Intervall, wobei die Anteile in der Zweier-Gruppe höher sind als in der Dreier- und Zehner-Gruppe, wo die Werte zumeist unter 1% liegen.

Bei den Fahrzeugen mit drei und vier Zylindern ähnelt sich das Verhalten zwischen den jeweiligen Benzin- und Dieselmotoren stark, jedoch liegen die Anteile für alle drei Intervalle im Falle der Dieselmotoren auf einem geringfügig höheren Niveau als bei den jeweiligen Benzinmotoren.

Des Weiteren fällt auf, dass die Fahrzeuge mit Achtzylinder- bzw. Zwölfzylinder-Benzinmotor in ihrer jeweiligen Gruppe vergleichsweise hohe Anteilswerte für die drei untersuchten Intervalle aufweisen. Ob das in Zusammenhang mit der hier überwiegend genutzten Bauform des V-Motors steht, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden - weitere Untersuchungen zu diesem Thema wären aber von Interesse.

Im Bezug auf den Lastzustand lassen sich kaum klare Trends erkennen. Es ist allerdings in einigen Fällen zu beobachten, dass die Quint bei niedriger Last stärker ausgeprägt ist als bei hoher Last. Des Weiteren bildet der Fall der Rekuperation oft eine Ausnahme zum allgemeinen Trend der Intervalle beim jeweiligen Fahrzeug.

3 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten von verschiedenen Verbrennungsmotoren hinsichtlich Formanten, virtueller Tonhöhe und Intervallstrukturen untersucht. Ziel war es Klangcharakteristiken auszumachen, die für die jeweiligen Motoren typisch sind.

Die Formanten, die im Fahrzeug auftreten liegen deutlich unter denen der menschlichen Stimme. Die Formantfrequenzen der unterschiedlichen Motorentypen unterscheiden sich nur für die ersten beiden Formanten. Hier liegen die Formanten einzelner Fahrzeuggruppen (Vierzylinder-Benzinfahrzeuge und Sechszylinder Dieselfahrzeuge bei jeweils 0,4g Belastung) erhöht im Vergleich zu anderen Gruppen. Der Energieinhalt der verschiedenen Formanten ist abhängig von Belastungszustand und variiert für die verschiedenen Zylinderzahlen. Eine höhere Belastung geht mit einem höheren Energieverlauf einher. Bei niedrigerer Last liegt die Kurve tiefer und ihr Abfall geschieht rascher. Dieses lastabhängige Verhalten lässt sich insbesondere im Vergleich zwischen Fahrzeugen im Schubbetrieb und unter Vollast im zweiten Gang beobachten.

Der Verlauf der Maxima in den kumulierten Spektren folgt in etwa einer parabelförmigen Kurve, abhängig von der Belastung. Demnach sinkt der Pegel aufeinander folgender Maxima in den meisten Fällen monoton, es gibt allerdings Ausnahmen von diesem Schema.

Für die Gestaltung des Klangs von Elektrofahrzeugen sind die Verläufe der kumulierten Spektren unter Berücksichtigung des lastabhängigen Verhaltens von Interesse, sie können als Ausgangspunkt für das Sound-Design dienen.

Die Detektion der wahrgenommenen Tonhöhe im Fahrzeug ist nicht trivial. Bei Auftreten von breitbandigen Störgeräuschen im Fahrzeugklang hat der genutzte Algorithmus Schwierigkeiten mit der Detektion der Tonhöhe. In einigen Fällen ist hier auch die subjektive Wahrnehmung der Tonhöhe nicht eindeutig. Psychoakustische Untersuchungen zur Optimierung der Tonhöhendetektion könnten sich als sinnvoll erweisen.

Die Empfindlichkeit des Algorithmus' gegenüber Störgeräuschen spiegelt sich auch im Ergebnis der Analyse wieder. So trifft die detektierte Tonhöhe bei niedrigeren Zylinderzahlen (zwei, drei, vier) die Erwartung. Insbesondere bei geringer Drehzahl liegt hier die Tonhöhe bei der Ordnung, die der Zündfrequenz entspricht. Eine höhere Drehzahl geht hier mit mehr Geräuschanteilen einher, wodurch die detektierte Tonhöhe stärker fluktuiert.

Bei höherer Zylinderzahl ist die Detektion insgesamt schwieriger. Vor allem im Falle der Sechszylinder-Motoren ist das Ergebnis wenig einheitlich, oft liegt die detektierte Tonhöhe unterhalb der erwarteten Ordnung. Eine mögliche Erklärung ist die bei höherer Zylinderzahl oft genutzte Bauform des V-Motors, die konstruktionsbedingt mehr Vibrationen und somit Störgeräusche aufweist. Eine genauere Untersuchung zu diesem

Sachverhalt sollte folgen - auch um diese verschiedenen Eigenschaften beim Design des Klang von Elektrofahrzeugen aufzugreifen.

Bei der Untersuchung der im Fahrzeugklang vorhandenen Intervallstrukturen, werden die Energieinhalte der Ordnungen, die den Intervallen Oktav, Quint, und Terz zugeordnet werden, untersucht. Bei einem Teil der Fahrzeuge wird auch die Quart betrachtet. Das sich ergebende Schema ist für fast alle Motortypen ähnlich. Die Oktav hat den größten Anteil- insbesondere, wenn man die Ordnung einbezieht, die der Zündfrequenz entspricht. Ohne die Zündfrequenzordnung hat mitunter auch die Quart den höchsten Anteil. An nächster Stelle folgt die Quint, die Terz hat meist nur einen geringen Anteil. Die einzige Ausnahme von diesem Schema bilden die Sechszylinder-Dieselfahrzeuge. Je nach Zylinderanzahl ergeben sich systematische Unterschiede in der Energieverteilung zwischen den Intervallen. Eine höhere Zylinderanzahl geht zumeist mit höheren Energieanteilen in den drei Intervallen einher, der Anteil der Zündfrequenz sinkt hingegen bei höherer Zylinderanzahl. Eine klare Abhängigkeit vom Belastungszustand ist nicht zu erkennen.

Auch hier wäre eine detaillierte Untersuchung mit Hinblick auf die Bauform der Motoren interessant. Das vorgefundene Schema der Energieverteilung zwischen den untersuchten Intervallen kann zur Orientierung beim Sound-Design für Elektrofahrzeuge dienen.

A Mittlere kumulierte Energieverläufe

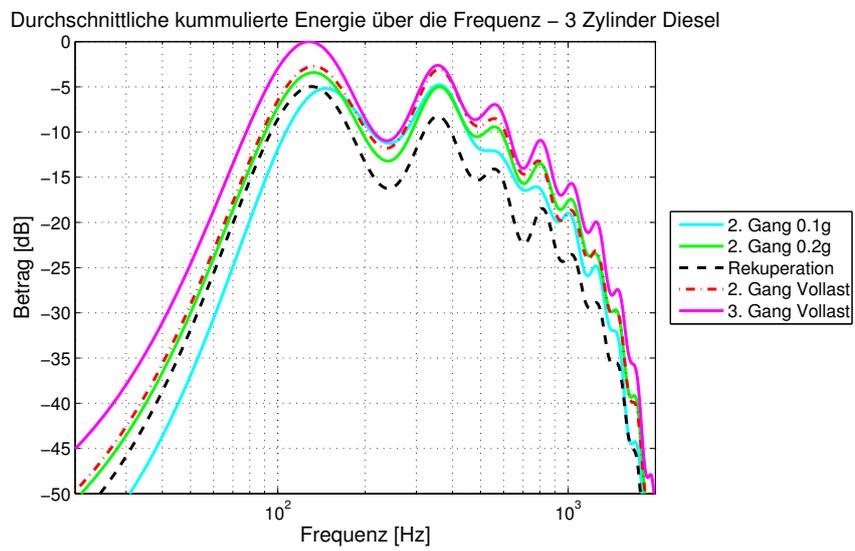


Abbildung 41 – Formantspektrum - 3 Zylinder Diesel für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

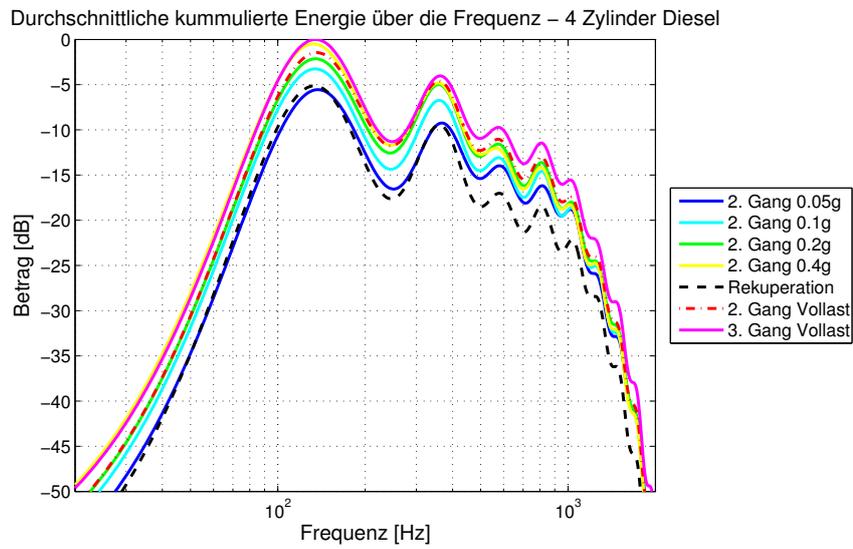


Abbildung 42 – Formantspektrum - 4 Zylinder Diesel für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

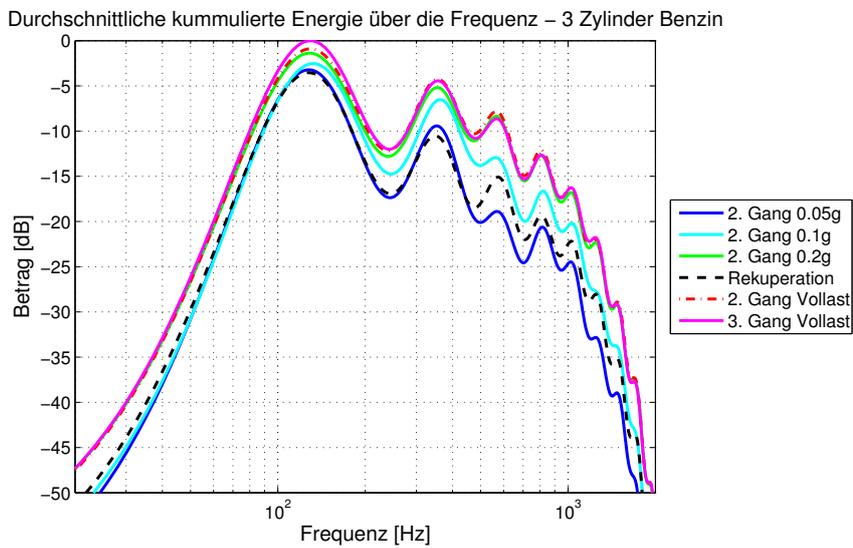


Abbildung 43 – Formantspektrum - 3 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

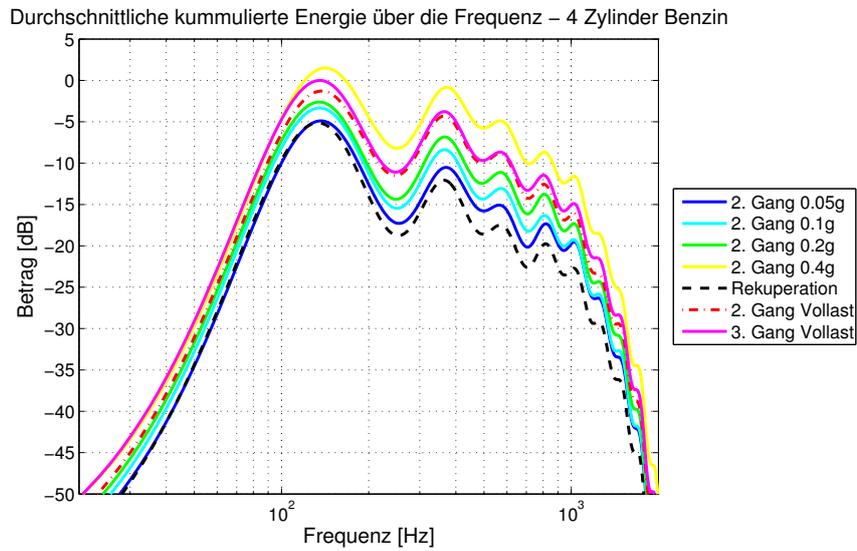


Abbildung 44 – Formantspektrum - 4 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

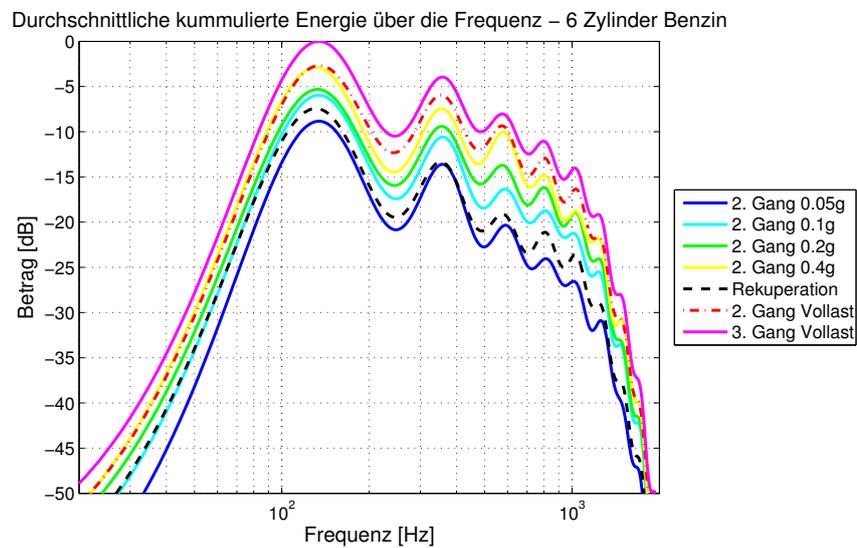


Abbildung 45 – Formantspektrum - 6 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

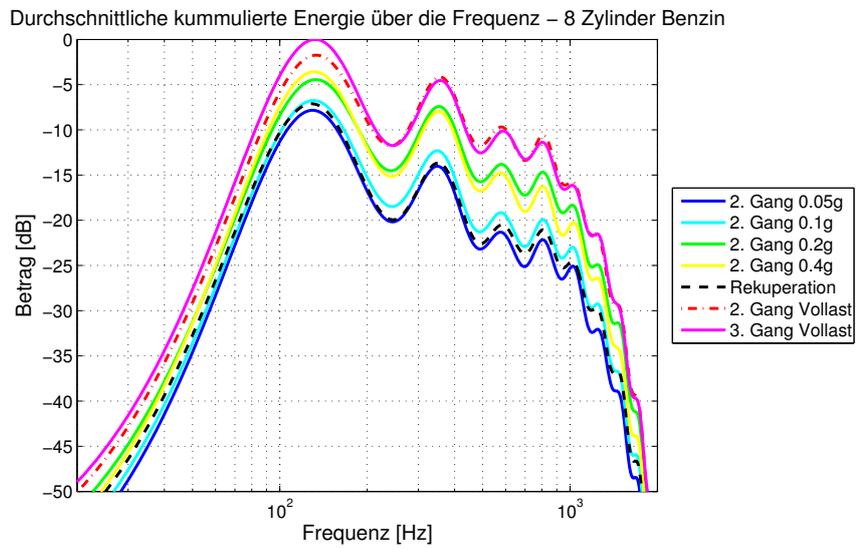


Abbildung 46 – Formantspektrum - 8 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

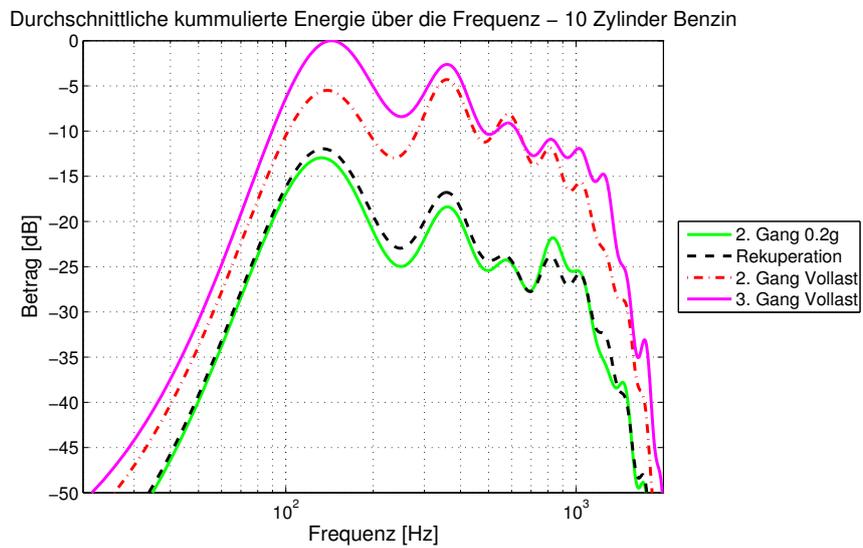


Abbildung 47 – Formantspektrum - 10 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

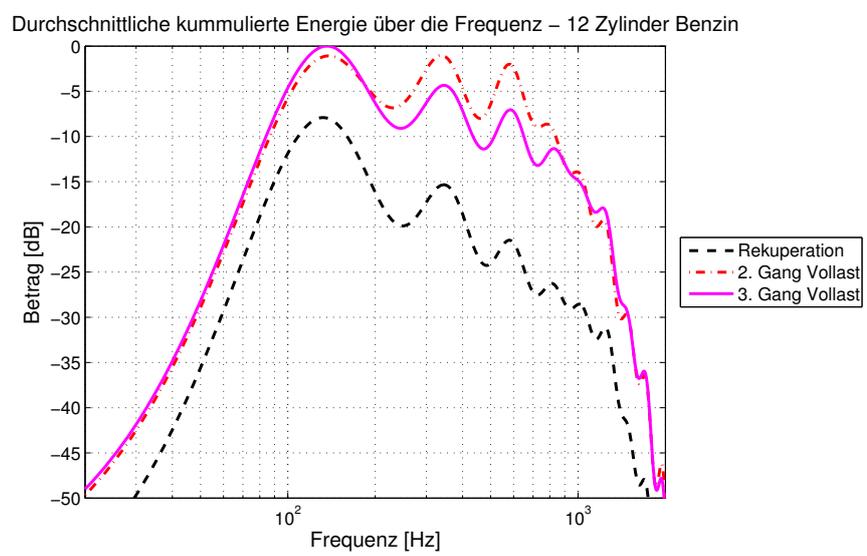


Abbildung 48 – Formantspektrum - 12 Zylinder Benzin für diverse Lastzustände im 2. und 3. Gang

B Nomenklatur

B.1 Lateinische Zeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_i	Amplitude der i-ten Ordnung	Pa
c	Cepstrum	-
b, b_i	Bandbreite des Formanten	Hz
C_{ij}	Koinzidenzoeffizient	-
E_I	Energie in Intervall I	Pa ²
E_{ges}	Gesamtenergie	Pa ²
f	Frequenz	Hz
f_S	Abtastrate	Hz
f_i	Formantfrequenz	Hz
$\underline{H}_{m,i}?$	Subharmonische	pu
H_S	Hop Size	Samples
H_μ	Spektrale Tonhöhe	pu
I	Intervall	-
k	Frequenzbins	-
l	Lifter	Samples
L_{Ex}	Anregungspegel	dB
L_{Sum}	Summenpegel	dB
L_{Th}	Hörschwelle	dB
LX	Schalldruckpegel-Übermaß	dB
m, M	Signalblöcke	-
n, N	Blocklänge, FFT-Punkte	Samples
N_p	Modellordnung	-
N_Z	Zylinderzahl	-
O_{ges}	Menge aller Motorordnungen	-
O_I	Menge der zum Intervall I gehörige Motorordnungen	-
O_Z	Der Zündfrequenz entsprechende Motorordnung	-
p_i	Polstellen mit positivem Imaginärteil	-
p_I	Prozentualer Energieanteil des Intervalls I	%
s	Flankensteilheit	$\frac{dB}{Bark}$
w	Fenster	Samples
$W_{m,i}$	Gewicht der Subharmonischen $\underline{H}_{m,i}$	-
WS_μ	Gewichtungsfaktor	-
x	Zeitsignal	-
X	Kurzzeitfourierspektrum	-
z	Tonheit	Bark

B.2 Griechische Zeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
β	Grundfrequenzgewicht	-
γ	Grad der Inharmonizität	-
δ	Breite des Koinzidentintervalls	-
ν_μ	Tonhöhenabweichung	-
ϕ_i	Argument von p_i	rad

B.3 Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
FFT	Fast-Fourier-Transformation
IFFT	Inverse Fast-Fourier-Transformation
LPC	Linear Predictive Coding
PKW	Personenkraftwagen

Literatur

- [1] Europäisches Parlament et Rat der Europäischen Union: *Verordnung (EU) Nr. 540/2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG Text von Bedeutung für den EWR*. Online, abgerufen am 29.05.2018, April 2014. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0540&from=DE>.
- [2] MathWorks Documentation: *Formant Estimation with LPC Coefficients*. Online, abgerufen am 17.04.2018. <https://de.mathworks.com/help/signal/ug/formant-estimation-with-lpc-coefficients.html>.
- [3] Sakshat Virtual Labs: *Cepstral Analysis of Speech*. Online, abgerufen am 23.04.2018. <http://iitg.vlab.co.in/?sub=59&brch=164&sim=615&cnt=1>.
- [4] Sendlmeier, W.F. et J. Seebode: *Formantkarten des deutschen Vokalsystems*. TU Berlin, Institut für Sprache und Kommunikation. Online, abgerufen am 29.05.2018. https://www.kw.tu-berlin.de/fileadmin/a01311100/Formantkarten_des_deutschen_Vokalsystems_01.pdf.
- [5] Terhardt, E.: *Akustische Kommunikation*. Springer Verlag, 1998.
- [6] Terhardt, E., G. Stoll et M. Seewann: *Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals*. Journal of the Acoustical Society of America, 71(3), 1982.
- [7] Zeller, P. (éd.): *Handbuch Fahrzeugakustik*. Vieweg+Teuber, 2009.