

**Optimierung und Echtzeit-Realisierung  
eines Berechnungsmodells zur  
Bestimmung des Nagelgeräusches von  
Dieselmotoren**

MASTERARBEIT

von

PACO LANGJAHR

Durchgeführt und eingereicht am:

Institut für Elektronische Musik und Akustik - IEM  
der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz (KUG)

in Zusammenarbeit mit

AVL List GmbH

Begutachter: Robert Höldrich, O. Univ. Prof. Mag. Art. DI Dr. techn.

Betreuer: Alois Sontacchi, Dipl.-Ing. Dr. techn.

Graz, Juni 2014

# Kurzfassung

Bei einem fehlerhaften Verbrennungsvorgang - typischerweise bei Dieselmotoren – entstehen sogenannte „Nagelgeräusche“. Da diese Geräusche meist störend in Erscheinung treten, versucht man diese in der Motorenentwicklung vorzeitig bzw. durch die Motorfeinabstimmung im bereits eingebauten Zustand zu reduzieren. Mit dem Dieselnagelindex CKI (engl. für Combustion Knocking Index) existiert ein Berechnungsalgorithmus, der diese Motorengeräusche objektiv bewertet. Die bislang vorliegende Implementierung ist jedoch nicht echtzeitfähig und kann daher zur Datenauswertung erst nach erfolgter Messung eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird der bestehende Algorithmus für einen Echtzeiteinsatz optimiert.

Die Arbeit gibt einen Überblick über die dem Algorithmus zu Grunde liegenden Prinzipien der Psychoakustik und deren Umsetzung in der digitalen Signalverarbeitung. Optimierungsaspekte und erforderliche Umstrukturierungen zur Blocksignalverarbeitung werden diskutiert und untersucht, weiterhin werden einige ausgewählte Einflussfaktoren des CKI-Wertes behandelt und ein neuer, alternativer Wert  $C\tilde{K}I$  zur Nagelgeräuschberechnung vorgeschlagen. Die Evaluierung der objektiven Werte erfolgt durch subjektive Hörversuche. Im praktischen Teil der Masterarbeit wird ein lauffähiger C-Code entwickelt, welcher aus den Eingangssignalen Luftschall und Motordrehzahl in Echtzeit den CKI berechnet und auf einem Display zur Anzeige bringt.

Durch die Optimierungen wird eine Reduktion der Rechenzeit um den Faktor 12 erreicht, bei 99% Korrelation zwischen alten und neuen Ausgangswerten. Die lineare Regression ergibt mit den berechneten Werten aus den vorliegenden objektiven Modellen und den subjektiven Bewertungen aus der durchgeführten informellen Versuchsreihe ein Bestimmtheitsmaß von 85% (CKI) und 94% ( $C\tilde{K}I$ ).

Die Masterarbeit erfolgt im Auftrag und Kooperation mit der AVL List GmbH.

# Abstract

In a faulty combustion process (typically in diesel engines), “knocking noises” occur. Since these noises are perceived as disturbing, one often tries to reduce them prematurely during development or fine tuning of the installed engine. The Combustion Knocking Index (CKI) uses a calculation algorithm to evaluate these noises objectively. The existing implementation of the CKI, however, is not capable of real-time calculation and therefore can only be used for data analysis after the measurement. Within the context of this thesis, the existing algorithm is optimized for real-time calculation.

This thesis gives an overview of the underlying principles of psychoacoustics employed in the algorithm, as well as their implementation in the field of digital signal processing. Aspects of optimization and necessary restructurings of the algorithm for block signal processing are discussed and investigated. Furthermore, selected factors influencing the CKI value are investigated and a new, alternative metric  $C\tilde{K}I$  for knocking noise detection is proposed. The evaluation of the objective data is conducted through subjective listening tests. In the practical part of this thesis, an executable C-Code is developed. The code calculates the CKI in real-time based on the input signals of airborne sound and engine speed, and then shows it on a display.

As a result of the optimization process, the calculation time is reduced by a factor of 12, with a correlation of 99% between the old and the new CKI algorithms. A linear regression of the calculated values from the objective models and the subjective ratings from the informal test series results in coefficients of determination of 85% (CKI) and 94% ( $C\tilde{K}I$ ).

The master thesis is carried out on behalf of and in cooperation with AVL List GmbH.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bestehender Algorithmus</b>	<b>4</b>
2.1	Berechnung des Lautstärkepegels . . . . .	5
2.2	Berechnung der Modulationen . . . . .	9
2.3	Berechnung der Simultanmaskierung . . . . .	14
2.4	Zeitliche Mittelung . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Neuer, echtzeitfähiger Algorithmus</b>	<b>19</b>
3.1	Beitrag der einzelnen Motorordnungen und Frequenzbänder . . . . .	20
3.2	Reduzierung Überlappungsbereiche und Blockgröße . . . . .	21
3.3	Demodulation ins Basisband . . . . .	23
3.4	Aufteilung der Berechnungsschritte . . . . .	23
3.5	Struktur des neuen Algorithmus . . . . .	24
3.6	Umsetzung in der Programmiersprache C . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Untersuchung ausgewählter Einflussparameter des CKI</b>	<b>29</b>
4.1	Lautheit . . . . .	30
4.2	Motordrehzahl . . . . .	31
4.3	Rauigkeit . . . . .	32
4.4	Impulshaltigkeit . . . . .	33
4.5	Alternativer Modellansatz zur Bestimmung des Nagelgeräusches . . . . .	35
4.6	Evaluierung des neuen CKI . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Subjektive Evaluierung des Diesel-Nagelgeräusches</b>	<b>39</b>
5.1	Versuchsaufbau und Datenaufbereitung . . . . .	39
5.2	Lautheitseinfluss . . . . .	40
5.3	Verteilung der subjektiven Daten . . . . .	41
5.4	Ausschluss von Versuchspersonen . . . . .	41
5.5	Reihungsübereinstimmung mit dem CKI . . . . .	43
5.6	Differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle . . . . .	44
5.7	Regressionsanalyse . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Hardwareumsetzung einer CKI-Messbox</b>	<b>48</b>

Inhaltsverzeichnis	ii
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>50</b>
<b>A Bedienung der neu entwickelten CKI-Software</b>	<b>52</b>
A.1 MATLAB-Script . . . . .	52
A.2 Pure Data (pd)-Objekt . . . . .	54
A.3 Sonstige Verwendung des C-Codes . . . . .	54
<b>B Liste der verwendeten Audioaufnahmen</b>	<b>57</b>
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>59</b>
Literatur . . . . .	59
Online-Quellen . . . . .	60

# Kapitel 1

## Einleitung

Die von Automobilkunden empfundene Geräuschqualität von Dieselmotoren beschäftigt Ingenieure in der Automobilindustrie bereits seit den Achtziger Jahren - eine der ersten kundenorientierten Studien findet sich mit [16]. Das Selbstzündungsprinzip bei Diesel-Motoren bietet zwar Vorteile im Hinblick auf Kraftstoffeffizienz und Drehmoment[2], die subjektiven Bewertungen zur Geräuschqualität fallen jedoch meist schlechter aus als bei Ottomotoren. Bereits 1987 konnte dazu von Russel et. al. beobachtet werden, dass der „impulsive Charakter“ des Motorgeräusches möglicherweise entscheidender ist als der Gesamtpegel [16]. In einer neueren Studie [14] versuchten Patouras et. al. den Klang eines Dieselmotors soweit zu modifizieren, dass die Versuchspersonen die Geräuschqualität gleich bewerten wie die eines Benzinmotors. Um diese Gleichwertigkeit in der subjektiven Beurteilung zu erreichen, waren 12 dB Abschwächung des gesamten Spektrums notwendig. In einer weiteren Studie [15] wurden Motorengeräusche von Versuchspersonen bezüglich einiger Empfindungsgrößen wie Lautstärke, Schärfe oder Rauigkeit bewertet. Dabei ergab sich eine starke negative Korrelation der empfundenen Geräuschqualität mit einer in der Studie als "Dieselhaftigkeit" bezeichneten Größe. Dieser Begriff steht für impulsartige Schläge, welche häufig bei Dieselmotoren hörbar sind und somit als typisch für den Klangcharakter dieser Motoren gilt. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet das Ergebnis der Studie, dass ein Motorgeräusch allgemein umso unangenehmer empfunden wird, je mehr es nach einem Dieselmotor klingt.

Neben der somit ohnehin schon als minderwertiger empfundenen Geräuschqualität von Dieselmotoren ergeben sich aktuell zusätzlich durch immer strengere Abgasrichtlinien vor allem im europäischen Raum (EU-Abgasnormen [29]) Probleme im Hinblick auf die Akustik des Fahrzeugs, da durch strikte Vorgaben die Freiheiten im Motordesign stark eingeschränkt werden [5]. Umso wichtiger wird die ständige Überwachung der unangenehmen impulsiven Geräuschkomponenten, welche im deutschsprachigen Raum auch als „Nageln“ bezeichnet werden (engl. „Diesel knock“ [17]).

Das Nagelgeräusch entsteht im Wesentlichen durch eine zu ungenaue zeitliche Abstimmung des Einspritz- und des Zündvorgangs und einer daraus resultierenden unvollständigen Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffs. Dieser in der Brennkammer verbliebene Kraftstoff verursacht in Folge einen zu starken Druckanstieg und daraus resultierende Explosionen zu nicht vorgesehenen Zeitpunkten. Mögliche Folgen sind Risse oder Erosionen im Kolbenboden, Temperaturschäden an Ventilen und Zylindern[28] sowie das in dieser Arbeit untersuchte Nagelgeräusch.

Da subjektive Tests im Allgemeinen sehr zeitaufwändig und teuer sind, besteht in der Automobilindustrie ein großes Interesse an einem aus messbaren Größen ableitbaren Einzahlwert, der in der Lage ist, die subjektiven Ergebnisse zuverlässig vorherzusagen. Dazu existieren derzeit verschiedene am Markt konkurrierende Algorithmen, welche dezidiert zur Detektierung des Diesel-Nagelgeräusches entwickelt wurden. Zwei Beispiele sind der DKI (engl.: Diesel Knocking Index) [6] und der in der vorliegenden Arbeit untersuchte CKI (engl.: Combustion Knocking Index). Beide Algorithmen berechnen auf der Grundlage einer zweistufigen Spektralanalyse einzelne Modulationsordnungen der Motorgrundschwingung und kombinieren diese mit dem A-bewerteten Lautstärkepegel zu einem Einzahlwert. Als weiterer ähnlich aufgebauter Algorithmus ist das Rauigkeitsmodell nach Höldrich und Pflüger [8] zu nennen, welches jedoch der Bewertung der Rauigkeit dient - auf den Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Dieselnagelgeräusch wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

Um den CKI bei akustischen Messungen bzw. Kalibrierungen des Motors in Echtzeit mitmessen bzw. analysieren zu können, ist der bestehende Algorithmus zu langsam, sodass nur eine nachträgliche Offline-Auswertung möglich ist. Bei Verwendung eines Achtkern-Prozessors benötigt ein entsprechender Computer neuester Generation derzeit ca. fünf Sekunden, um den CKI-Verlauf über eine Sekunde Audioaufnahme zu berechnen.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Reduktion des Berechnungsaufwands um einen Faktor 10 sowie die Umstrukturierung des Algorithmus, sodass eine Berechnung in Echtzeit mit gewöhnlicher Hardware möglich wird. Des Weiteren soll der Algorithmus im Detail untersucht und mit anderen Ansätzen aus der Literatur verglichen, sowie die Übereinstimmung mit subjektiven Bewertungen des Nagelgeräusches überprüft werden.

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen strukturiert: In den Kapiteln 2 und 3 wird der CKI-Algorithmus im Detail erklärt sowie die notwendigen Änderungen zur Beschleunigung der Berechnung dargelegt und begründet. In Kapitel 4 folgt eine genaue Analyse der vermuteten Haupt-Einflussfaktoren auf das Ergebnis des CKI. Basierend aus diesen Erkenntnissen, wird ein neues Berechnungsverfahren vorgestellt, welches mit geringem Berechnungsaufwand eine mögliche Alternative zum bestehenden Algorithmus bietet und aus denselben Eingangsgrößen ebenfalls einen Einzahlwert liefert (im Folgenden  $C\check{K}I$  genannt). In Kapitel 5 wird die Prädiktionsfähig-

keit des CKI anhand von Hörtests und den daraus resultierenden subjektiven Daten untersucht und mit  $C\tilde{K}I$  verglichen. Kapitel 6 gibt einen kompakten Marktüberblick zur Möglichkeit der Implementierung einer Hardware-Messbox zur Echtzeit-Berechnung des CKI. Abschließend beinhaltet Kapitel 7 eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einen Ausblick in Bezug auf weitere Forschungsthemen im Bereich dieser Arbeit.

## Kapitel 2

# Bestehender Algorithmus

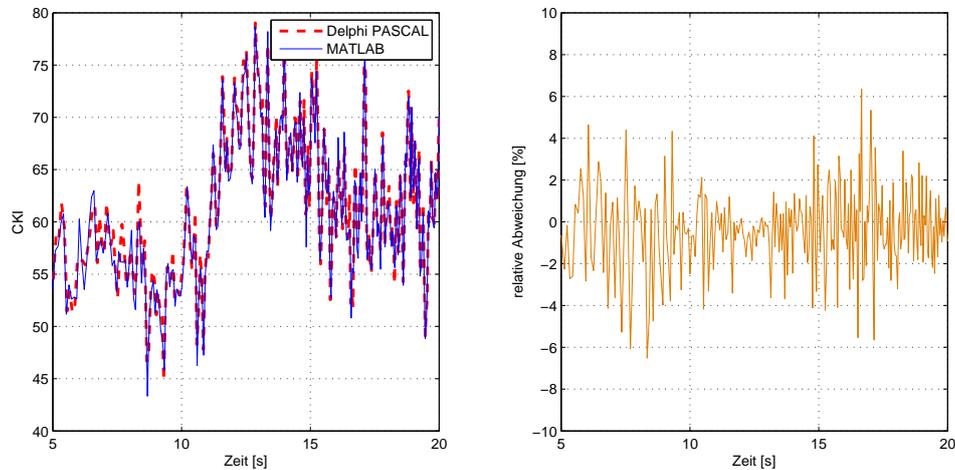
Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst der bestehende, in Delphi PASCAL geschriebene CKI-Algorithmus analysiert und in MATLAB implementiert. Dabei war der erste Schritt das Erreichen einer möglichst genauen Nachbildung des bestehenden Algorithmus. Die in Abschnitt 2.4 beschriebene Glättung wurde zunächst nicht berücksichtigt, da die Sinnhaftigkeit der fehlenden Normierung erst durch die subjektiven Hörversuche evaluiert werden konnte (vgl. Kapitel 5).

Abbildung 2.1 zeigt die erreichte Genauigkeit der Nachbildung in MATLAB anhand eines Beispiel-CKI-Verlaufs ('MT1012\_V1\_CoDriver\_TA20\_20mg\_TW25\_1\_pp.wav' - Zeitausschnitt von 15 Sekunden). Die relative Abweichung der Nachbildung gegenüber der Originalberechnung wird im rechten Diagramm dargestellt und berechnet sich nach [33] zu:

$$e = \frac{CKI_{neu} - CKI_{alt}}{CKI_{alt}} \quad (2.1)$$

Da die relative Messabweichung  $e$  in Gleichung 2.1 keiner Normalverteilung folgt (der Sha-piro-Wilk-Test schließt eine Normalverteilung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% aus), wurde der Medianwert der relativen Abweichung mit -0,37% ermittelt. Das 75% Quartil beträgt 0,76%. Anders ausgedrückt, weisen statistisch somit drei Viertel aller mit der MATLAB-Nachbildung berechneten CKI-Werte eine Übereinstimmung von über 99,24% gegenüber der Software in Delphi PASCAL auf. Die größten relativen Abweichungen finden sich über die beobachtete Messdauer in einzelnen Spitzen bis zu 6,51%.

In diesem Kapitel sollen die genauen Berechnungsschritte des bestehenden Algorithmus erklärt werden. Dieser berechnet den Ausgangswert aus einem Luft- bzw. Körperschallsignal und einem Drehzahlsignal. Die Berechnung kann grob in drei große Berechnungsblöcke unterteilt werden, welche wiederum in einzelne Berechnungsschritte gegliedert sind. Diese drei Blöcke sind entsprechend Abbildung 2.2 die Berechnung des Lautstärkepegels, die Berechnung der Modulationen und die Berechnung der Simultanmaskie-



**Abbildung 2.1:** Gegenüberstellung eines CKI-Verlaufs als Ergebnis der Originalberechnung in Delphi PASCAL und der Nachbildung in MATLAB. Links: Absolute CKI-Werte über der Zeit. Rechts: Relative Messabweichung.

rung. Die Ausgangsdaten für die Berechnung sind die Signalaufzeichnungen sowie ein Kalibrierwert, welcher das PCM-Signal entsprechend der Mikrofonempfindlichkeit und Eingangsparameter der verwendeten Verstärker auf Pascal-Werte skaliert. Die Abtastrate der Signalaufzeichnungen sollte mindestens  $f_s = 32$  kHz betragen. Die Berechnungssoftware erlaubt zwar auch niedrigere Abtastraten, jedoch wird in diesem Fall nur der Frequenzbereich bis zur Nyquist-Frequenz  $\frac{f_s}{2}$  berechnet, was je nach Frequenzgehalt des Signals das Ergebnis stark beeinflussen kann.

Die Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritte erfolgt in den folgenden Unterkapiteln.

## 2.1 Berechnung des Lautstärkepegels

Zu Beginn wird das Zeitsignal kalibriert. Dabei werden die 16 Bit Integer-Daten mit einem Faktor multipliziert, so dass das resultierende Signal dem Schalldruck an der Mikrofonposition in Pascal entspricht. Der Kalibrierwert berechnet sich aus der Eingangsempfindlichkeit der Mikrofons in mV/Pa, sowie den Eingangsempfindlichkeiten bzw. Verstärkungsfaktoren der nachfolgenden eingesetzten Verstärker.

Das gesamte Zeitsignal wird nun in Berechnungsblöcke von 4096 Abtastpunkten ( $\approx 85$  ms @  $f_s = 48$  kHz) unterteilt, welche sich jeweils zu 50% überlappen, um in den Randbereichen der nachfolgenden Fensterfunktion nicht zu viel Informationsgehalt zu verlieren. Bei einer Signallänge von N

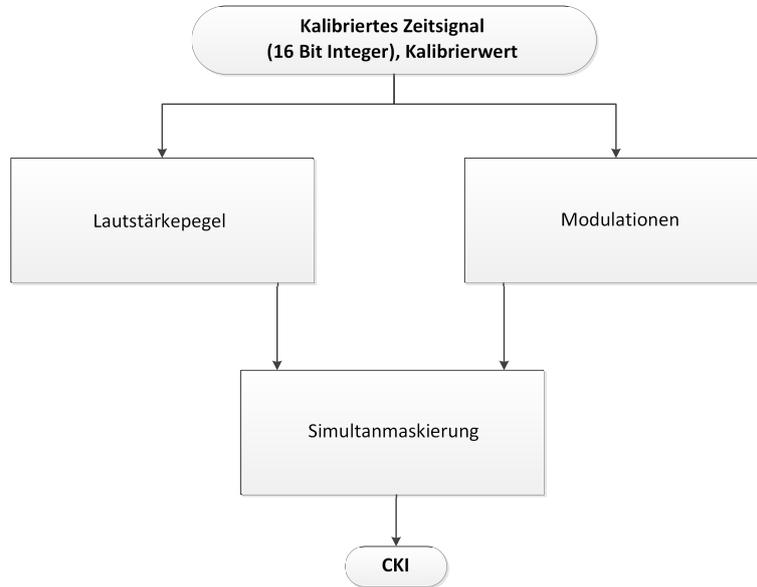


Abbildung 2.2: Struktur des CKI-Algorithmus.

Abtastpunkten ergeben sich:

$$M = \lfloor \frac{N}{2048} \rfloor - 1 \text{ Signalblöcke.} \quad (2.2)$$

Jeder Zeitblock wird mit einem Hann-Fenster gewichtet. Dieses berechnet sich nach [12] zu:

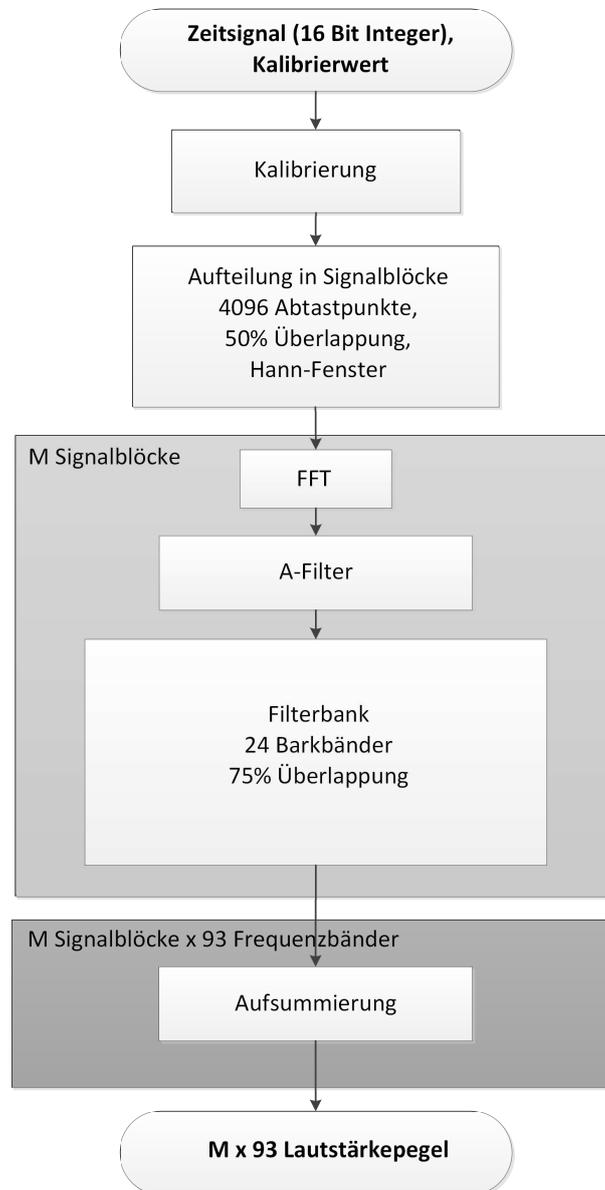
$$w[n] = \begin{cases} 0.5 - 0.5 * \cos(\frac{2\pi n}{M}), & \text{falls } 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.3)$$

Da durch die Anwendung einer Fensterfunktion die Amplitude und die Energie des Signals verändert wird, muss in den Fällen, in welchen der absolute Energiegehalt oder die absolute Amplitude des Signals betrachtet wird, der Fenstereinfluss entsprechend kompensiert werden. Dazu muss der Amplitudenkorrekturfaktor AKF bzw. der Energiekorrekturfaktor EKF berechnet werden. Nach [35] berechnen sich diese zu:

$$AKF = \frac{1}{\frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt} = \frac{1}{\bar{A}} \quad (2.4)$$

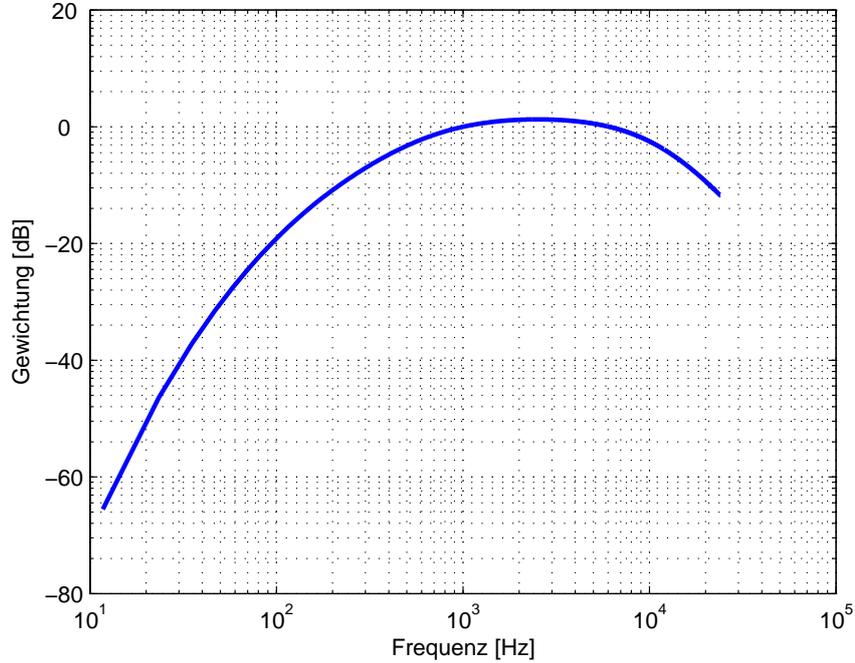
$$EKF = \frac{1}{\frac{1}{T} \int_0^T W(t)^2 dt} = \frac{1}{\bar{A}^2} \quad (2.5)$$

Jeder Zeitblock wird per FFT (engl.: Fast Fourier Transform) in den Spektralbereich transformiert. Die Länge der FFTs entspricht dabei genau der Länge eines Berechnungsblocks.



**Abbildung 2.3:** Berechnung des Lautstärkepegels.

Um die Frequenzabhängigkeit der Lautstärkeempfindung des menschlichen Gehörs zu berücksichtigen, wird jeder Zeitblock mit einem A-Bewertungsfilter gewichtet. Die A-Gewichtung entspricht in etwa der inversen 40dB-Kurve aus den Kurven gleicher Lautstärke in [4] und ist nur für geringe Lautstärken und schmalbandige Geräuschquellen gültig. Abbildung 2.3 zeigt die A-Gewichtungskurve. Die verwendete Formel für die Berechnung



**Abbildung 2.4:** A-Gewichtungskurve, berechnet nach Gleichung 2.6 (vgl. [11]). Doppelt-logarithmische Darstellung.

des A-Filters im Frequenzbereich findet sich in [11] mit:

$$\Delta L(f) = 20 * \log_{10}\left(\frac{f^4}{(f^2 + 20.6^2) * (f^2 + 12200^2) * \sqrt{(f^2 + 107.7^2) * (f^2 + 737.9^2)}}\right) + 165.45 \text{ [dB]}$$

(2.6)

Umgerechnet ergibt sich:

$$A(f) = \frac{187374174.3 * f^4}{(f^2 + 20.6^2) * (f^2 + 12200^2) * \sqrt{(f^2 + 107.7^2) * (f^2 + 737.9^2)}}$$

(2.7)

Die Empfindungsgröße Tonheit ist ein grundlegendes Element jedes auditiven Modells. Die Tonheit beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Frequenz und der tatsächlich wahrgenommenen Tonhöhe. Dieser Zusammenhang wurde bereits 1937 durch Stevens [20] entdeckt und kann

mit Hilfe der Mel-Skala dargestellt werden. Dabei entspricht eine Verdopplung der empfundenen Tonhöhe auch einer Verdopplung des Mel-Wertes. In psychoakustischen Versuchsreihen – beschrieben in [4] - wurde weiterhin die Frequenzauflösung des Gehörs erforscht. Aus den Ergebnissen wurden 24 Frequenzgruppen (kritische Bänder) abgeleitet, welche in der Einheit Bark angegeben werden und in folgendem linearen Zusammenhang zur Mel-Skala stehen:

$$100 \text{ Mel} = 1 \text{ Bark} \quad (2.8)$$

Die wesentliche Erkenntnis aus diesen Versuchsreihen ist, dass die Signalverarbeitung des menschlichen Gehörs einer Filterbank vergleichbar ist. Signale werden dementsprechend in einzelnen Frequenzgruppen verarbeitet und anschließend zu einer Gesamtinformation zusammengefügt. Um diese auditive Filterbank nun nachzubilden, durchläuft beim CKI-Algorithmus ebenfalls jeder Zeitblock eine Filterbank. Diese beinhaltet die 24 Barkbänder mit 75% Überlappung. Daraus ergeben sich insgesamt 93 Filter. Die Frequenzbänder werden mit einem Rechteckfenster ausgeschnitten und haben jeweils eine Bandbreite von 1 Bark. Für die Berechnung der Mittenfrequenzen der einzelnen Filter wurde eine von Aures in [1] vorgeschlagene Approximationsformel verwendet:

$$f_c(z) = 1000 * \left[ \left( \frac{\exp(0.219 * z)}{352} + 1 \right) * z - 0.0352 * \exp(-0.15 * (z - 5)^2) \right] \text{ [Hz]} \quad (2.9)$$

Die untere und obere Grenzfrequenz ist einer Bandbreite von 1 Bark entsprechend:

$$f_u(z) = f_c(z - 0.5z) \quad (2.10)$$

$$f_o(z) = f_c(z + 0.5z) \quad (2.11)$$

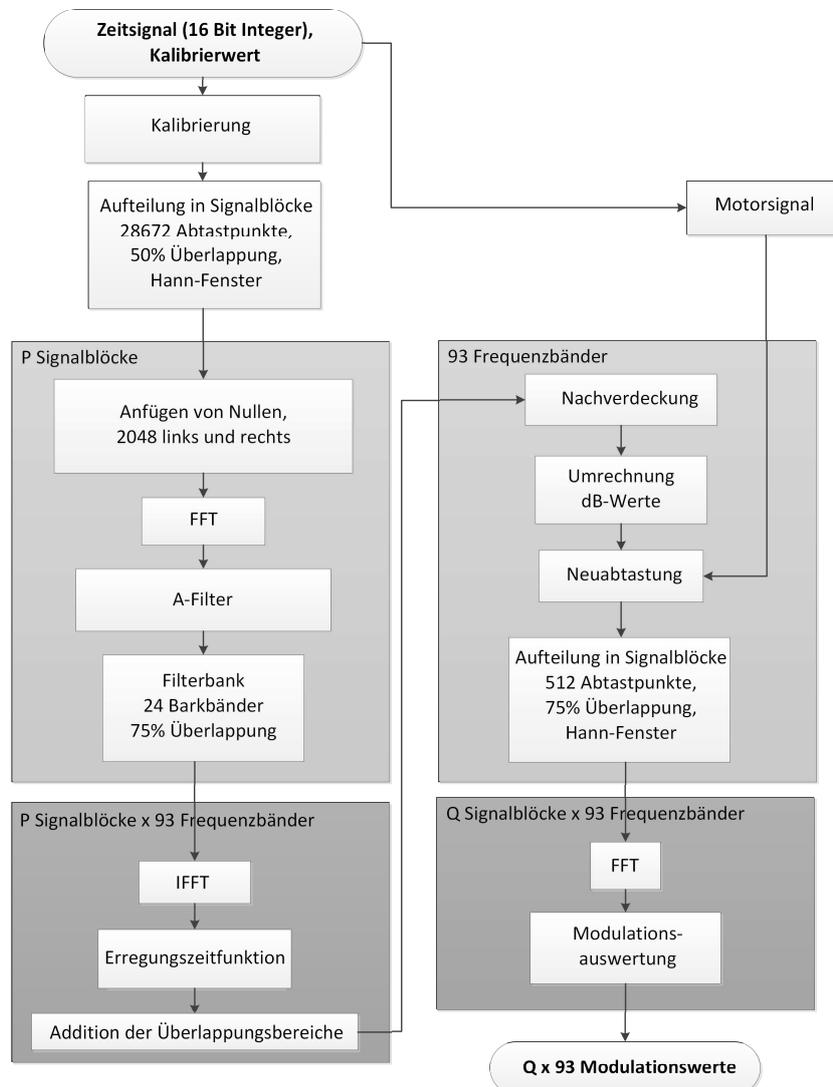
Alle Frequenzstützstellen im Sperrbereich werden mit dem Faktor 0.00001 (-100 dB) gewichtet, alle Frequenzen im Durchlassbereich mit 1.

Pro Zeitblock und Frequenzband wird nun ein Lautstärkepegel berechnet. Dieser berechnet sich aus der mittleren Energie der einzelnen Frequenzen zu:

$$L_{sum,z} = 20 * \log_{10} \left( \frac{\sqrt{\sum_n \text{abs}(L[n])^2}}{N * 0.00002} \right) \text{ [dB]} \quad (2.12)$$

## 2.2 Berechnung der Modulationen

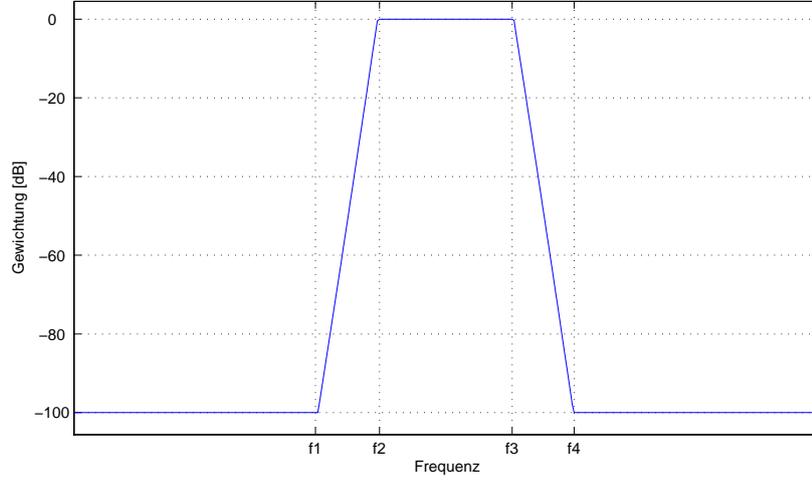
Das Drehzahlsignal ist als Impulssignal im LSB (engl.: Least Significant Bit) der Audiodatei gespeichert. Eine volle Motorumdrehung ist dabei durch zwei aufeinander folgende Einsen gekennzeichnet, ansonsten steht eine Null auf



**Abbildung 2.5:** Berechnung der Modulationen.

dem LSB. Der Abstand der Impulse ist somit umgekehrt proportional zur Motordrehzahl.

Das Zeitsignal wird entsprechend Abschnitt 2.1 kalibriert, in 28672 Abtastpunkte ( $\approx 0,6$  Sekunden bei einer Abtastrate von 48 kHz) große Berechnungsblöcke unterteilt und mit einer Hann-Fensterfunktion gewichtet. Um einen Verlust von Informationen auszuschließen, wird eine Überlappung der Signalblöcke von 50% gewählt. Rechts und links werden jeweils 2048 Nullen angefügt, sodass daraus 32768 Abtastpunkte große Signalblöcke resultieren. Durch die zyklische Faltung verursachte Artefakte an den Rändern des Be-



**Abbildung 2.6:** Bandpassfilter der Bark-Filterbank.

rechenblocks können so im Nachhinein weggeschnitten werden. Aus der Blockgröße und dem Überlappungsbereich ergeben sich bei einer Signallänge von  $N$  Abtastpunkten

$$P = \lfloor \frac{N}{14336} \rfloor - 1 \text{ Signalblöcke.} \quad (2.13)$$

Es folgt eine Transformation der einzelnen Signalblöcke in den Frequenzbereich (FFT). Anschließend wird jeder Signalblock mit einem A-Filter bewertet (Berechnung wie in Abschnitt 2.1).

Jeder Signalblock durchläuft eine Filterbank mit den 24 kritischen Bändern und einer Überlappung von 75%. Dabei sind die Flanken der Bandpassfilter, anders als bei der Lautstärkepegelberechnung, trapezförmig wie in Abbildung 2.6 gezeigt. Die vier Frequenzen  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  werden durch folgende einfache Formel berechnet:

$$f_1(z) = 0.97 * f_c(z - 0.5z) \quad (2.14)$$

$$f_2(z) = 1.03 * f_c(z - 0.5z) \quad (2.15)$$

$$f_3(z) = 0.97 * f_c(z + 0.5z) \quad (2.16)$$

$$f_4(z) = 1.03 * f_c(z + 0.5z) \quad (2.17)$$

$$(2.18)$$

In jedem Frequenzband wird jeder Signalblock zurück in den Zeitbereich transformiert und es wird aus dem Betragsverlauf des analytischen Signals nach [26] die Erregungszeitfunktion errechnet:

$$x_{env}[n] = |x[n] + j\mathcal{H}\{x[n]\}| \quad (2.19)$$

$\mathcal{H}$  steht dabei für die Hilbert-Transformation.

In jedem Frequenzband werden nun die einzelnen Signalblöcke wieder zu einem kontinuierlichen Zeitsignal zusammengefügt. Dazu werden die Randbereiche (2048 Abtastpunkte links und rechts) verworfen und der Rest mit 50% Überlappung addiert.

Wie in [4] beschrieben, ist die zeitliche Maskierung des menschlichen Gehörs ein nichtlinearer Prozess, welcher sowohl von der Art der Maskierung (Vor-, Simultan- oder Nachverdeckung), als auch von der Dauer und vom Frequenzgehalt des maskierenden Stimulus abhängt. In [23] und [24] finden sich Vorschläge zur effizienten Implementierung der Verdeckungseffekte. Beim CKI-Algorithmus wurde auf Grund der geringen relativen Relevanz im Vergleich zu anderen Maskierungseffekten auf die Berücksichtigung der Vorverdeckung verzichtet und auch die Frequenzabhängigkeit der Nachverdeckung vernachlässigt. Unabhängig von Dauer und Frequenzgehalt des Maskierers wurde eine exponentielle Abklingkurve mit 10 dB pro 50 ms gewählt:

$$x_{env,masked}[n] = x_{env}[n - m] * \exp(m * \frac{\log(10^{-0.5})}{0.05 * f_s}) \quad (2.20)$$

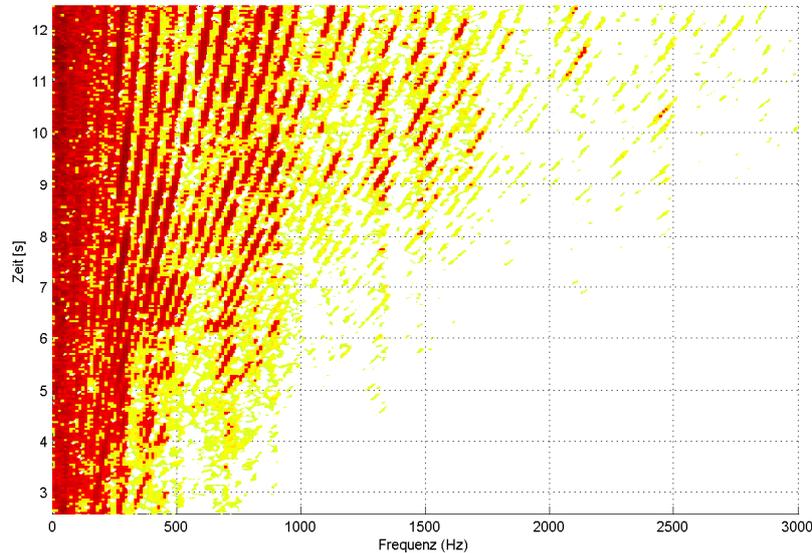
Umgerechnet ergibt sich durch die Abklingkurve aus Gleichung 2.20 eine Zeitkonstante von ca. 43 ms. Die PEAQ-Empfehlung [23] sieht für 1 Bark ( $\approx 100$  Hz) eine Zeitkonstante von  $\tau = 30ms$  und einen stetigen Abfall zu höheren Frequenzen bis auf  $\tau \approx 8ms$  vor. Die beim CKI gewählte frequenzunabhängige Zeitkonstante kann somit als deutlich zu hoch angenommen werden.

Die Amplituden (Einheit Pascal) der 93 Einhüllenden werden nun in dB-Werte umgewandelt, da eine logarithmische Darstellung der Amplitude grundsätzlich eher der Hörempfindung entspricht. Der Bezugspegel entspricht dabei üblicherweise der Ruheshwelle  $20 \mu Pa$ :

$$L = 20 * \log(\frac{x_{env,masked}}{0.00002}) \text{ [dB]} \quad (2.21)$$

Anschließend wird eine Neuabtastung des Zeitsignals für jedes Frequenzband durchgeführt. Da die Ursache des Nagelgeräuschs direkt mit der Motordrehzahl zusammenhängt, bzw. von der Motorgrundschwingung und seinen Oberschwingungen verursacht wird, sollen beim CKI die Motorordnungen erfasst und analysiert werden. Wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, sind diese jedoch bei einem Hochlauf je nach momentaner Drehzahl in einem anderen Frequenzbereich.

Um jede Motorordnung für sich auswerten zu können, muss statt eines auf die Abtastrate bezogenen Spektrums ein auf die Motorgrundschwingung bezogenes Modulationsspektrum berechnet werden. Die vorher konstante Abtastrate wird somit auf die Drehzahl angepasst. Um bei der Auswertung des Modulationsspektrums eine Auflösung der Motorordnungen von



**Abbildung 2.7:** Spektrogramm eines Motorhochlaufs - Lineare Frequenzachse. Die einzelnen Motorordnungen sind als dunkle, diagonal verlaufende Linien erkennbar.

0,1 zu erreichen, muss die Anzahl der Abtastpunkte pro Motorumdrehung ein Zehntel der verwendeten FFT-Länge betragen. Um bis zur 10. Motorordnung auswerten zu können, würde dabei eine FFT-Länge von 256 Abtastpunkten ausreichen. Beim bestehenden Algorithmus wurde dennoch eine FFT-Länge von 512 Abtastpunkten gewählt, somit werden bei der Neuabtastung 51,2 Abtastpunkte pro Motorumdrehung gesetzt. Die neue Abtastrate berechnet sich zu:

$$f_{s,neu} = 51.2 * \frac{RPM}{60} \quad (2.22)$$

Die Interpolation auf die neuen Abtastpunkte erfolgt durch eine Polynominterpolation 8.Grades.

Nach der Neuabtastung wird das Zeitsignal wiederum in Signalblöcke aufgeteilt, an dieser Stelle beträgt die Länge der Blöcke 512 Abtastpunkte. Dabei kommt wieder ein Hann-Fenster zum Einsatz. Die Signalblöcke überlappen sich mit 75%, um eine möglichst genaue Zeitaufösung zu erhalten. Daraus ergeben sich bei  $N'$  Abtastpunkten nach der drehzahlabhängigen Neuabtastung des Signals

$$Q = \lfloor \frac{N'}{128} \rfloor - 3 \text{ Signalblöcke.} \quad (2.23)$$

Pro Frequenzband  $z$  wird jeder der  $Q$  Signalblöcke mittels FFT in den

Frequenzbereich überführt. Abschließend werden die einzelnen Motorordnungen ausgewertet. Aus der neuen Abtastrate ergibt sich bei einer FFT-Länge von 512 Frequenzstützstellen genau eine Ordnungsauflösung von 0,1. Ausgewertet wird dabei jede 0,5. Ordnung des Motors bis einschließlich zur 10. Ordnung. Durch das Hann-Fenster und die daraus resultierende Verschmierung der einzelnen Frequenzstützstellen müssen für jede ausgewertete Ordnung die benachbarten Stützstellen mit berücksichtigt werden. Um den Modulationshub zu erhalten, werden diese jeweils drei Modulationsfrequenzen ins Verhältnis zu den Frequenzen zwischen den halben Ordnungen (Rauschen) gesetzt. Daraus ergibt sich für die Modulationen der Motorordnungen:

$$Mod_i = \sqrt{(L_{i-0.1}^2 + L_i^2 + L_{i+0.1}^2)} \quad (2.24)$$

Für den Abstand zum Rauschen soll jeweils der kleinere Hub in das Ergebnis einfließen. Somit ergibt sich für das Modulationsrauschen:

$$Mod_{i,noise} = \max(Mod_{in-}, Mod_{in+}) \quad (2.25)$$

$$= \max(\sqrt{L_{i-0.2}^2 + L_{i-0.3}^2}, \sqrt{L_{i+0.2}^2 + L_{i+0.3}^2}) \quad (2.26)$$

Abschließend werden alle Modulationshübe der einzelnen halben Ordnungen zu einem absoluten Modulationswert aufaddiert:

$$Mod_{Total}(z) = \sum_{i=0.5,1,\dots}^{10} (Mod_i - Mod_{i,noise}) \quad (2.27)$$

Somit ergibt sich am Ende der Modulationsberechnung genau ein Modulationswert pro 512 Abtastpunkte langem Signalblock und pro Frequenzband  $z$ . Die Zeitauflösung der Modulationswerte resultiert dabei direkt aus der Motordrehzahl und der zeitlichen Überlappung der Modulationsspektren zu:

$$\Delta t_{Mod} = \frac{128}{f_{s,neu}} \quad (2.28)$$

## 2.3 Berechnung der Simultanmaskierung

Aus den unterschiedlichen Blocklängen von 4096 Abtastpunkten für den Lautstärkepegelverlauf und 512 Abtastpunkte des auf die neue drehzahlabhängige Abtastrate reduzierten Signals für den Modulationsverlauf ergeben sich unterschiedliche Zeitachsen für Pegel und Modulationen. Daher werden in diesem Schritt alle Lautstärkepegelwerte der 93 Frequenzbänder auf die Modulationsachse linear interpoliert. Für die weitere Verarbeitung werden nur noch diese interpolierten Lautstärkepegel verwendet.

Die Simultanmaskierung [4] beschreibt die Verdeckung bestimmter Frequenzbereiche durch andere, gleichzeitig auftretende Frequenzanteile in spektraler Nähe. Dabei wird der Grad der Verdeckung durch den spektralen

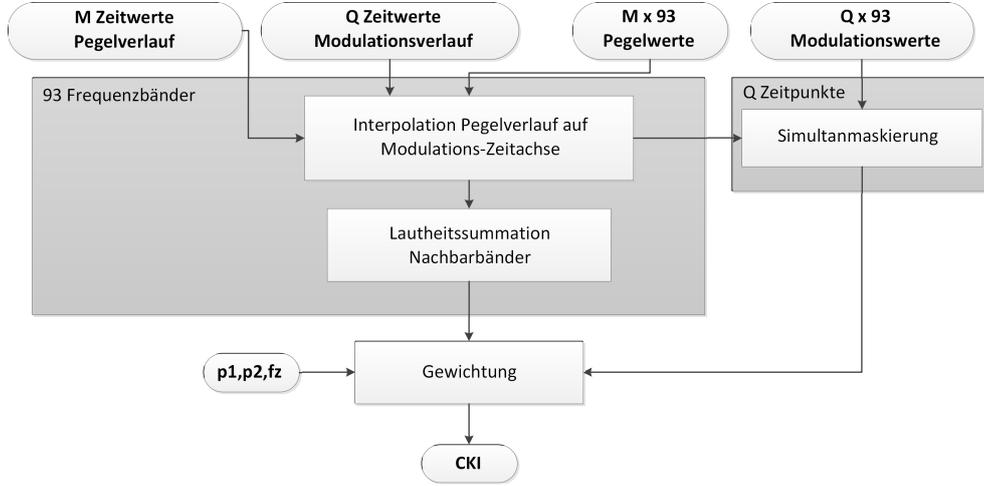


Abbildung 2.8: Berechnung der Simultanmaskierung.

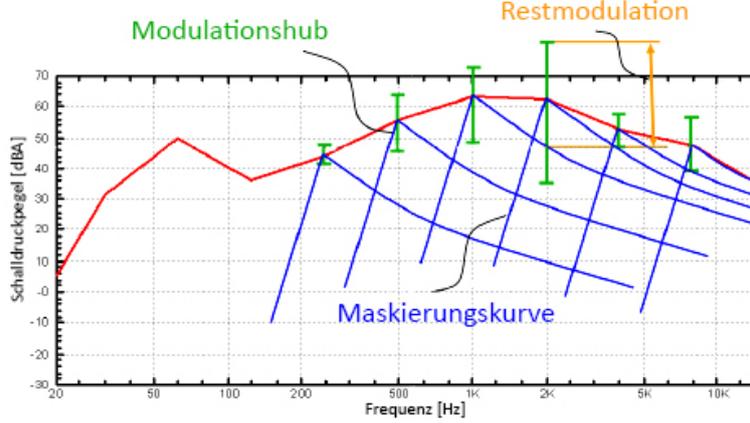
Abstand und das Lautstärkeverhältnis der beiden Frequenzkomponenten bestimmt. Beim CKI-Algorithmus werden unhörbare Modulationen nicht berücksichtigt, teilverdeckte Modulationen fließen reduziert in das Ergebnis ein. Entsprechend [22] errechnet sich jede einzelne Maskierungskurve zu:

$$L_{Masker,z}(z') = \begin{cases} L(z) - |(z - z')| * 27, & \text{falls } z' \leq z \\ L(z) + |(z - z')| * [-24 - \frac{230}{f(z)} + 0.2 * L(z)], & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.29)$$

Die linke Flanke (zu niedrigen Frequenzen) der Frequenzkomponente wird mit einem von Frequenz und Pegel unabhängigen Pegelabfall von 27 dB pro Bark angenommen. Die rechte Maskierungsflanke ist von der Frequenz und dem Pegel abhängig. Dabei ist  $L_{Masker,z}(z')$  der Pegel (in dB) des Maskierers mit Frequenz  $z$  (Bark) an der Stelle  $z'$  (Bark).  $f(z)$  ist entsprechend die Frequenz des Maskierers in Hz. Pro Zeitpunkt wird nun für alle 93 Frequenzbänder die Maskierungskurve aus den Lautstärkepegelwerten berechnet und daraus je eine Gesamtmaskierungskurve berechnet, indem die Pegel aller Maskierungskurven in dem jeweiligen Band per Pegeladdition addiert werden:

$$L_{Masker,gesamt}(z') = 10 * \log_{10} \left( \sum_{z=1,1.25,\dots}^{24} L_{Masker,z}(z') \right) \quad (2.30)$$

Vom Lautstärkepegel in jedem Band wird nun der errechnete Modulationspegel subtrahiert. Liegt das Ergebnis der Subtraktion über der Maskierungsschwelle, so wird der Modulationspegel mit 2 multipliziert, um den positiven und den negativen Modulationshub zu berücksichtigen. Liegt das



**Abbildung 2.9:** Prinzip der Simultanmaskierung (schematisch). Die rote Kurve zeigt den Pegelverlauf über die Frequenzbänder, der ursprüngliche Modulationshub ist in grün eingezeichnet, die Restmodulation in gelb.

Ergebnis unter der Maskierungsschwelle, wird die Restmodulation berechnet mit:

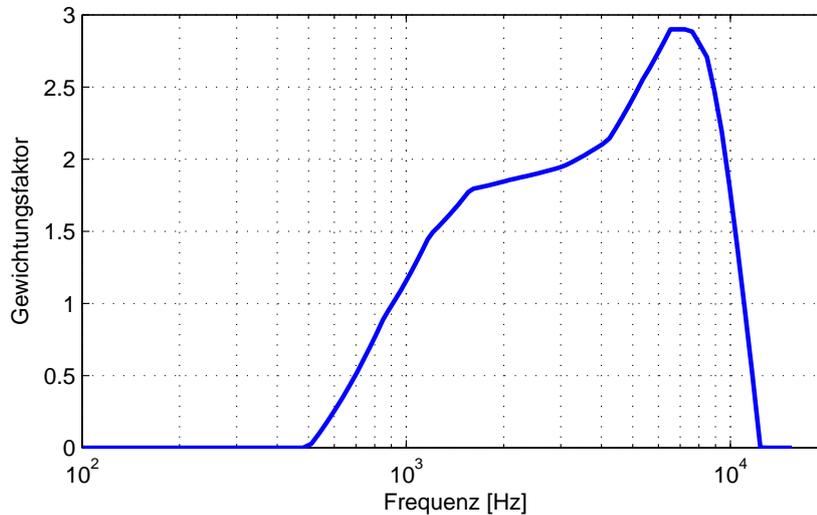
$$Mod_{Rest}(z) = L(z) + Mod_{Total}(z) - L_{Masker,gesamt}(z) \quad (2.31)$$

Der Effekt der Lautheitssummentation wird in [25] und [4] beschrieben: Wenn die Bandbreite eines Signals über ein kritisches Band hinausgeht, wird es als deutlich lauter empfunden, als wenn die spektralen Anteile innerhalb eines Bandes bleiben. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird beim CKI-Algorithmus eine Pegelsummentation der jeweils benachbarten Frequenzbänder durchgeführt:

$$L_{Total}(z)_{dB} = 10 * \log_{10}(10^{\frac{L(z-1)_{dB}}{10}} + 10^{\frac{L(z)_{dB}}{10}} + 10^{\frac{L(z+1)_{dB}}{10}}) \quad (2.32)$$

Abschließend werden die Lautstärkepegel und die Modulationswerte jeweils mit einem Gewichtungsfaktor potenziert. Dieser Faktor wurde empirisch ermittelt und beträgt für die Modulationswerte  $p1 = 0.5$  und für die Lautstärkepegel  $p2 = 1.5$ . Jedes Frequenzband  $z$  wird außerdem, abhängig von seiner Lage entlang der Frequenzachse mit einem Faktor  $f_z$  gewichtet, welcher ebenfalls empirisch ermittelt wurde und durch die Abbildung 2.10 beschrieben ist. Entlang der Modulationszeitachse ergeben sich letztendlich durch Aufsummierung und Gewichtung der einzelnen Bänder die CKI-Werte:

$$CKI = \sum_{z=1,1.25,\dots}^{24} ((Mod_{Rest}(z))^{p1} * (L_{Total}(z))^{p2} * f(z)) \quad (2.33)$$



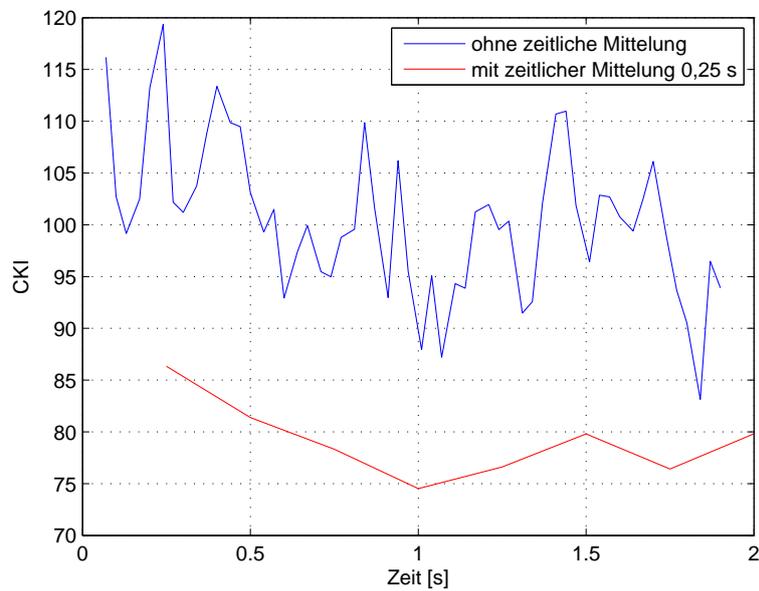
**Abbildung 2.10:** Empirisch bestimmte Gewichtungskurve der einzelnen Frequenzbänder bei der Berechnung des CKI-Einzahlwertes.

## 2.4 Zeitliche Mittelung

In der bestehenden Umsetzung zur Bestimmung der CKI-Werte ist eine Funktion zur Glättung des CKI-Verlaufs über der Zeit implementiert (in der Software wird diese Funktion "Time Smoothing" genannt). Das zeitliche Mittelungsfenster ist standardmäßig auf 0,25 Sekunden eingestellt, über diesen Zeitraum wird jeweils eine gewichtete Mittelung der berechneten Modulationswerte durchgeführt. Die Gewichtungsfunktion ist eine Dreiecksfunktion mit dem Wert 1 in der Mitte und dem Wert 0,5 an den Rändern:

$$y_{a,m}(t) = 1 - \frac{|t - t_m|}{0.125} * 0.5 \quad (2.34)$$

$t_m$  ist der Zeitpunkt in der Mitte des Fensters,  $y_{a,m}$  ist die Gewichtung zum Zeitpunkt  $t$ . Da bei dieser Formel keine Normierung integriert wurde, ergibt sich ein Energieverlust innerhalb des Mittelungsfensters, der sich bei höheren Drehzahlen durch die größere Anzahl an Werten innerhalb eines Mittelungszeitraumes umso stärker auswirkt und zu einem umgekehrt proportionalen Verhältnis von CKI-Wert und Drehzahl führt. Wie in Kapitel 5 gezeigt wird, entspricht dies durchaus der Hörempfindung und wird deshalb auch im neuen Algorithmus implementiert. Abbildung 2.11 verdeutlicht die Auswirkung der zeitlichen Mittelung (bzw. Implementierung eines negativen Drehzahlzuschlages) anhand einer mit der Delphi-Software berechneten Beispiel-CKI-Kurve ('02\_4500\_N81.wav' - Mittlere Drehzahl 4500 U/min).



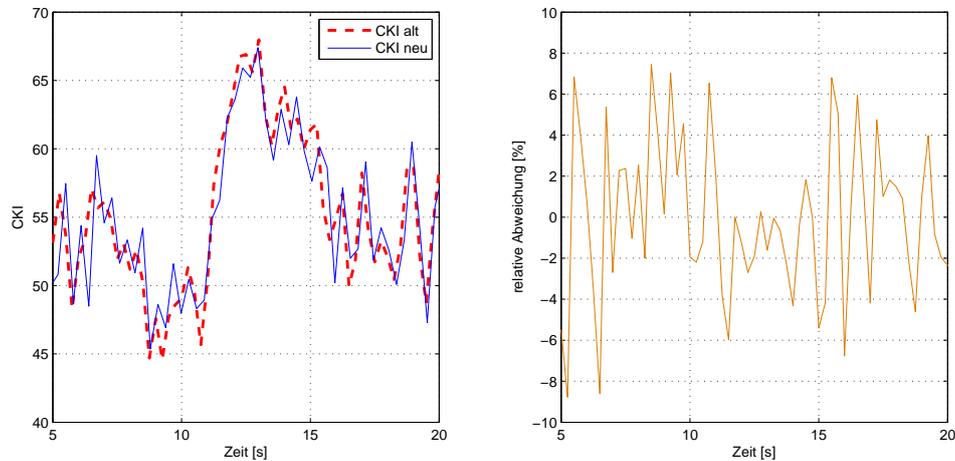
**Abbildung 2.11:** Vergleich einer CKI-Kurve aus der Original-Software in Delphi-PASCAL, mit und ohne aktivierter "Time Smoothing" Funktion. Durch die relativ hohe Drehzahl von 4500 U/min ist ein deutlicher Abfall der CKI-Kurve zu sehen.

## Kapitel 3

# Neuer, echtzeitfähiger Algorithmus

Um den Berechnungsaufwand für den CKI-Algorithmus zu reduzieren, wurden verschiedene Maßnahmen getroffen, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben und begründet werden. Das Ergebnis dieser Vereinfachungen ist in Abbildung 3.1 anhand desselben Beispiel-CKI-Verlaufs zu sehen, welcher auch bereits in Abbildung 2.1 zur Evaluierung der MATLAB-Nachbildung des alten Algorithmus herangezogen wurde. In Abbildung 3.1 wurde die zeitlich gemittelte CKI-Kurve der Delphi-Software mit dem endgültigen optimierten Algorithmus verglichen. Das obere Quartil der relativen Messabweichung liegt bei 2,3%, was bedeutet, dass drei Viertel der Messwerte im Beobachtungszeitraum eine Übereinstimmung von über 97,7% gegenüber dem Original-CKI aufweisen. Der Medianwert der relativen Abweichung liegt bei 0,008%.

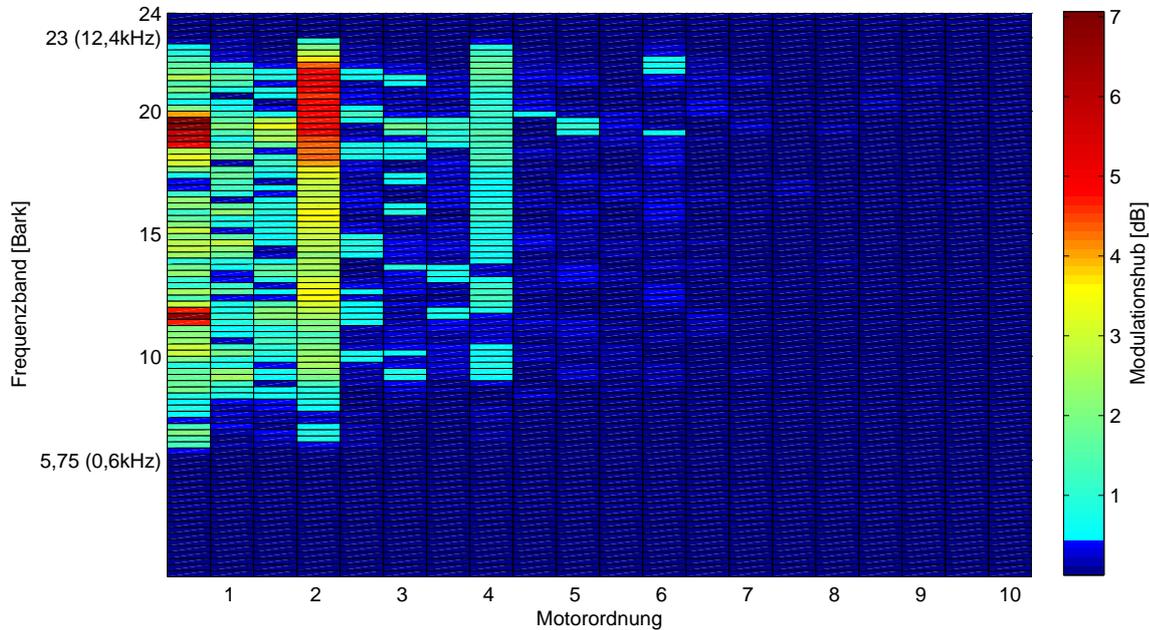
Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, ist ein Vergleich von Ausgangswerten bei Signalaufzeichnungen mit einer geringerer Abtastrate als  $f_s = 32$  kHz nicht sinnvoll. Für den neuen Algorithmus wird diese Mindest-Abtastrate somit vorausgesetzt. Hinzu kommt eine obere Begrenzung mit etwa  $f_s = 80$  kHz, da sonst das Berechnungszeitfenster (vgl. Abschnitt 3.2) zu klein wird, um bei niedrigen Drehzahlen eine verlässliche Schätzung der untersten Motorordnungen durchzuführen. Sollte auf Grund der zu hohen Abtastrate keine volle Motorumdrehung mehr im Beobachtungszeitraum liegen, kann die Drehzahl nicht mehr über das Impulssignal bestimmt werden. Zudem sind übermäßig hohe Abtastraten  $\geq 80$  kHz für eine effiziente Implementierung auf Grund des höheren Berechnungsaufwandes nicht sinnvoll.



**Abbildung 3.1:** Genauigkeit des neuen CKI-Algorithmus. Links: CKI über der Zeit. Rechts: relative Abweichung des neuen CKI-Wertes gegenüber dem alten CKI-Wert.

### 3.1 Beitrag der einzelnen Motorordnungen und Frequenzbänder

Um eine Reduzierung der Anzahl an erforderlichen Bandpass-Filtern sowie eine reduzierte FFT-Länge bei der Modulationsauswertung zu erreichen, wurde zunächst untersucht, ob wirklich alle Frequenzbänder und Modulationsordnungen für das Endergebnis relevant sind. Dabei lässt Abbildung 2.10 bereits einen klaren Optimierungspunkt erkennen: Frequenzbänder, welche am Ende ohnehin mit Null gewichtet werden, müssen nicht berechnet werden. Weiterhin wurden verschiedene Audiobeispiele auf den Einfluss der einzelnen Motorordnungen untersucht. Abbildung 3.2 zeigt ein Audiobeispiel mit einem sehr stark ausgeprägten Nagelgeräusch. Die Motorordnungen sind bis zur 6. Ordnung relevant ( $\geq 0,5$  dB) und tragen darüber nicht mehr entscheidend zum Gesamtergebnis bei. Somit liegt es nahe, auch nur bis zur 6. Motorordnung auszuwerten. Dadurch kann die FFT-Länge zur Auswertung der Motorordnungen (siehe Abschnitt 2.2) auf 128 Abtastpunkte reduziert werden (es ergeben sich gerundet 12,8 Abtastpunkte pro Motorumdrehung). Damit ist die Nyquist-Frequenz mit  $\frac{f_{s,neu}}{2} = 6,4 * \frac{RPM}{60}$  immer noch über der höchsten betrachteten Motorordnung. Abbildung 3.2 macht außerdem deutlich, dass Frequenzanteile mit  $z \leq 5,75$  ( $\approx 603$  Hz) und mit  $z \geq 23$  ( $\approx 12,363$  kHz) im Ordnungsspektrum praktisch nicht vorhanden sind. Somit wurde  $z = 6$  als untere Grenzfrequenz des tiefsten Filters und  $z = 22,75$  als obere Grenzfrequenz des obersten Filters bestimmt. Daraus ergeben sich für die

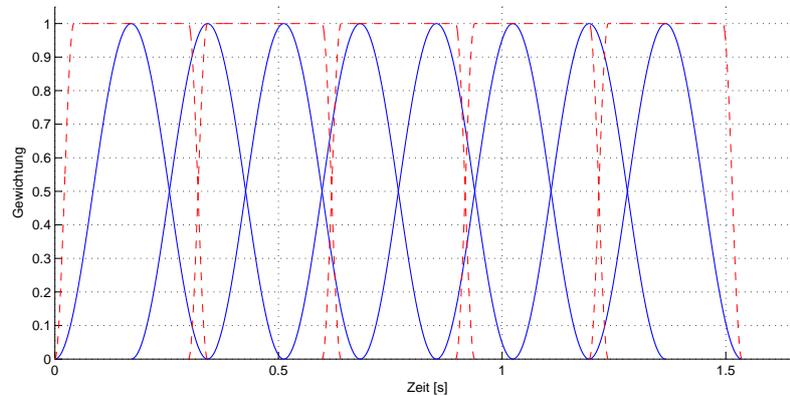


**Abbildung 3.2:** Modulationshub der einzelnen Motorordnungen in dB. Beispiel einer Aufnahme mit stark ausgeprägtem Nagelgeräusch ('06\_1000\_N81.wav' - CKI Medianwert 262). Bei der Optimierung wird die Berechnung auf den Frequenzbereich zwischen  $z=5.75$  und  $z=23$  eingegrenzt und die Modulationen werden nur bis zur 6. Motorordnung ausgewertet.

Berechnung statt vorher 93 Bänder nur noch 64 Bänder mit den Mittenfrequenzen  $z=6.5$  ( $\approx 704$  Hz) bis  $z=22.25$  ( $\approx 10,485$  kHz).

### 3.2 Reduzierung Überlappungsbereiche und Blockgröße

Die Blockgröße und der Überlappungsbereich für die Modulationsberechnung wurde im Zuge der Optimierung auf 16384 Abtastpunkte mit 2048 Abtastpunkten Überlappung festgesetzt. Dabei wurde statt eines Hann-Fensters ein Tukey-Fenster verwendet (Abbildung 3.3). Da der Einfluss der zyklischen Faltung vor allem in den Randbereichen der einzelnen Signalblöcke auftritt und diese durch die Gewichtung der Fensterfunktion stark abgeschwächt werden, wurde auf das Anfügen von Nullen verzichtet. Dies ist anhand der Erfordernisse zulässig, da keine Rücktransformationen des Signals benötigt wird, sondern lediglich der zeitliche Verlauf der Erregungszeit-



**Abbildung 3.3:** Tukey (rot strichliert) vs. Hann Fenster (blau durchgezogen). Für die Berechnung derselben Aufnahmelänge werden beim Tukey-Fenster 5 statt 8 Blöcke benötigt.

funktion von Interesse ist. Zudem ist die Flankensteilheit der verwendeten Bandpassfilter moderat. Die Blockgröße resultiert aus folgenden Überlegungen:

- Bei einem CKI-Wert pro 14336 Abtastpunkten (16384 Abtastpunkte Blocklänge abzüglich 2048 Abtastpunkte Überlappung) ergibt sich eine Zeitauflösung der CKI-Kurve von 0,3 s bei einer Abtastrate von 48 kHz. Dies entspricht in etwa der Standard-Einstellung von 0,25 s zeitlicher Mittelung bei der alten Berechnungssoftware. Bei hohen Drehzahlen können somit die berechneten Modulationswerte über der Zeit gemittelt werden, was den Aufwand bei der Berechnung der Simultanmaskierung reduziert. Ein kleiner Genauigkeitsverlust ergibt sich allerdings bei niedrigeren Drehzahlen als 900 U/min, hier sind inkl. Überlappungsbereich pro Berechnungsblock nach der drehzahlabhängigen Neuabtastung weniger als 128 Abtastpunkte übrig. Somit muss mit Nullen aufgefüllt werden, um wenigstens einen CKI-Wert liefern zu können.
- Der Überlappungsbereich ist mit 2048 Abtastpunkten für die verwendeten Filter groß genug, um die Auswirkungen der zyklischen Faltung auf das Ergebnis zu reduzieren und klein genug, um die Recheneffizienz deutlich zu steigern. Wie aus [Abbildung 3.3](#) ersichtlich, werden über denselben Zeitraum nur noch fünf Blöcke benötigt anstatt acht bei Verwendung eines Hann-Fensters, es wird somit die Effizienz um den Faktor 1,6 gesteigert.
- Bei einer Länge des Ringspeichers von 16384 Abtastpunkten kann bei der empfohlenen Abtastrate von 48 kHz die Drehzahlbestimmung über

das Impulssignal auch bis in den untersten Drehzahlbereich von Dieselmotoren durchgeführt werden, da immer mehrere volle Motorumdrehungen im Beobachtungszeitraum liegen.

Bei der FFT zur Berechnung des Ordnungsspektrums wurde die Verwendung des Hann-Fensters beibehalten. Die Überlappung von vorher 75% wurde jedoch auf die bei Hann-Fensterung üblicherweise verwendeten 50% reduziert werden.

Bei der Berechnung der Lautstärkepegel erfolgte die Wahl der Blocklänge und Fensterlänge analog der Berechnung der Modulationen. Somit ergibt sich für die Lautstärkepegel die gleiche Zeitauflösung wie für die Modulationswerte und es ist keine Interpolation erforderlich. Ebenso entfällt die Berechnung zusätzlicher FFTs für die Lautstärkepegelberechnung (vgl. Abschnitt 2.1).

### 3.3 Demodulation ins Basisband

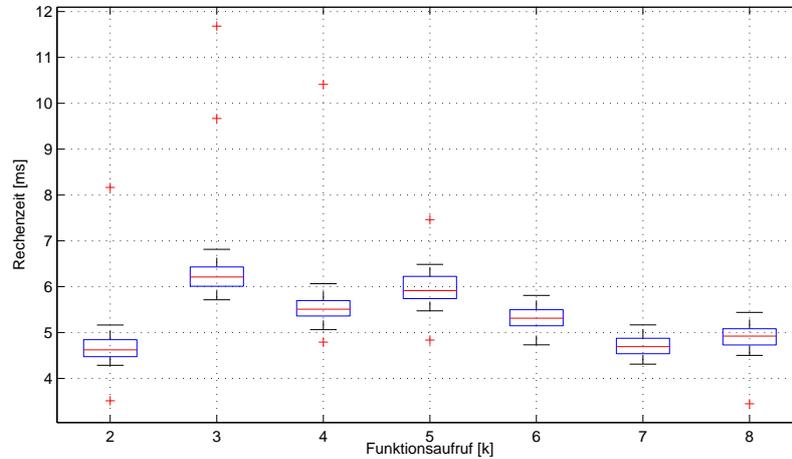
Da die Berechnung der Modulationen in schmalbandigen Frequenzbändern erfolgt, liegt eine Abtastratenreduktion nahe. Durch Demodulation ins Basisband und anschließende Filterung und Abtastratenreduktion erfolgt eine Reduzierung der zu verarbeitenden Daten. Die Demodulation erfolgt im Frequenzbereich, indem die entsprechenden Frequenzbereiche um die jeweilige Anzahl Frequenzstützstellen nach unten verschoben werden. Das Optimum der Datenreduktion wäre eine frequenzabhängige Abtastratenreduktion, zugunsten einer nachfolgend einheitlichen Datenlage wurde jedoch darauf verzichtet. Stattdessen wird der Grad der Datendezimierung vom Filter mit der größten Bandbreite bestimmt. Mit einer unteren Grenzfrequenz von  $f_1(21.75) = 9129.8$  Hz und einer oberen Grenzfrequenz von  $f_4(22.75) = 12049$  Hz ergibt sich bei einer Abtastrate von  $f_s = 48$  kHz die Bandbreite zu:

$$f_B(22.25) = \frac{N}{f_s} * (f_4(z) - f_1(z)) = 2919.2 * \frac{16384}{48000} \approx 996 \text{ Frequenzstützstellen} \quad (3.1)$$

Für die inverse FFT reicht somit eine Länge von 2048 Frequenzstützstellen, was einem Dezimierungsfaktor von 8 entspricht.

### 3.4 Aufteilung der Berechnungsschritte

Bei einer Echtzeitumsetzung in der Programmiersprache C ergibt sich in der vorliegenden Struktur des Algorithmus das Problem, dass nach jeweils 14336 Abtastpunkten ( $N - N_{overlap} = 16384 - 2048 = 14336$ ) sehr viele Daten berechnet werden müssen. Da C-Code im Normalfall sequentiell abgearbeitet wird, können während dieser Berechnung keine neuen Daten eingelesen werden. Daher wurde die Berechnung in sieben etwa gleich große



**Abbildung 3.4:** Rechenzeit über den einzelnen Funktionsaufrufen. Es wird eine gleichmäßige Verteilung über alle Funktionsaufrufe erreicht. Die maximale Rechenzeit für einen Funktionsaufruf liegt bei etwa 12 ms.

Zwischenschritte aufgeteilt, wofür die einzelnen Frequenzbänder eine sehr geeignete Basis bieten. Durch die ungleichmäßig verteilten Frequenzbänder in Tabelle 3.1 wurde die unterschiedliche Bandbreite und der daraus resultierende unterschiedlich großen Rechenaufwand berücksichtigt und es konnte eine gleichmäßige Rechenzeit über alle Funktionsaufrufe – wie in Abbildung 3.4 gezeigt – erreicht werden.

**Tabelle 3.1:** Frequenzbänder pro Funktionsaufruf.

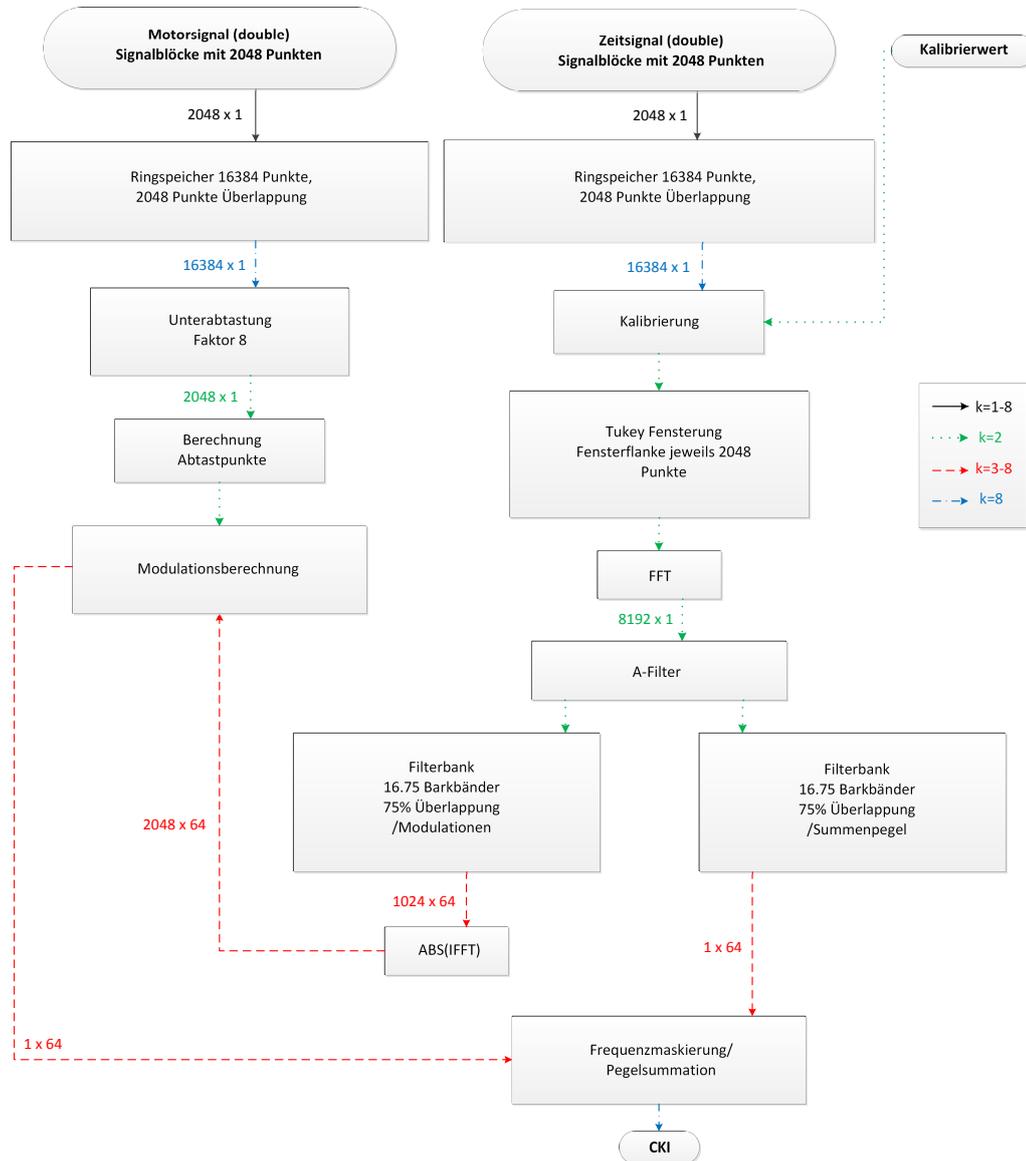
Funktionsaufruf (k)	2	3	4	5	6	7	8
Frequenzband [Bark]	6,5-8,5	8,75-11,25	11,5-14,25	14,5-16,75	17-18,75	19-20,75	21-22,25

### 3.5 Struktur des neuen Algorithmus

Im Folgenden soll die Struktur des neuen Berechnungsalgorithmus erklärt werden. Dabei wird nur auf die Änderungen eingegangen, unveränderte Berechnungsschritte, welche bereits in Kapitel 2 erläutert wurden, werden nicht noch einmal dargelegt. Im Blockschaltbild sind diese Abschnitte der Berechnung teilweise ebenfalls zusammengefasst dargestellt. Abbildung 3.5 zeigt die Struktur des neuen Algorithmus im Überblick. Da bei der Programmierung

eine geringe Berechnungsdauer höhere Priorität als eine gute Lesbarkeit des Programmcodes hatte, wurde auf eine Funktionen-Substruktur verzichtet und die gesamte laufende Berechnung in einer Funktion (*CKIfunction.m*) ausgeführt. Eine weitere Funktion *includevariables.m* wird nur einmal zu Beginn ausgeführt. Sie dient der Deklaration und Initialisierung von Variablen und der Berechnung von Gewichtungsvektoren, Fensterfunktionen und Filterparametern. Die im Blockschaltbild farblich gekennzeichneten Pfeile stellen dar, zu welchem Zustand der Laufvariable  $k$  die jeweilige Berechnung aktiv ist (vgl. Abschnitt 3.4). Der Zustand  $k=1$  wird nur ein einziges Mal zu Beginn durchlaufen, um den Überlappungsbereich (2048 Abtastpunkte) des Ringspeichers zu füllen. Die beiden schwarzen Pfeile sind bei jedem Funktionsaufruf aktiv, da vom Analog-Digital-Konverter (ADC) bei jedem Funktionsaufruf ein neuer 2048 Abtastpunkte langer Block geliefert wird, welcher dann in den Ringspeicher eingelesen werden muss. Die Strukturierung der folgenden Erläuterungen ist dem Farbcode in Abbildung 3.5 entsprechend und somit der chronologischen Reihenfolge der Berechnung folgend aufgeteilt.

- $k=1$ :  
Es werden ein Datenblock für das Luft- bzw. Körperschallsignal und ein Datenblock für das Motorsignal vom ADC in den Ringspeicher eingelesen.
- $k=2$ :  
Das Audiosignal wird kalibriert, mit der Fensterfunktion gewichtet und in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend wird der Realteil des Spektrums (8192 Frequenzstützstellen) mit einem A-Filter multipliziert und gespeichert. Das Motorsignal wird mit einem Achtel der vorherigen Abtastrate neu generiert und es werden entsprechend Abschnitt 2.2 pro voller Motorumdrehung 12,8 Abtastpunkte gesetzt. Da sich dadurch Zeitpunkte zwischen den alten Abtastpunkten ergeben, wird eine Interpolation erforderlich, welche durch Rundung der Abtastpunkte realisiert wurde. Diese werden nun für die weitere Berechnung zwischengespeichert.
- $k=3$  bis 8:  
Je nach Zustand der Laufvariable  $k$  werden die jeweiligen Frequenzbänder entsprechend Tabelle 3.1 verarbeitet. Dazu werden aus den zwischengespeicherten A-gefilterten halben Spektren die im Durchlassbereich des entsprechenden Barkfilters vorkommenden Frequenzstützstellen herausgegriffen, der jeweiligen Filtercharakteristik entsprechend gewichtet (vgl. Abb. 2.6), für den Lautstärkepegel aufaddiert und mit der Energiekorrektur des Tukey-Fensters bereinigt. Für die Berechnung der Einhüllenden werden die Frequenzstützstellen in das Basisband verschoben (Breite des höchsten kritischen Frequenzbandes 996 Frequenzstützstellen), es wird mit Nullen auf eine Länge von 2048



**Abbildung 3.5:** Struktur des neuen Algorithmus. Unveränderte Berechnungsschritte wurden zusammengefasst, die farbliche Markierung der Pfeile stellt die Reihenfolge der Abarbeitung dar.

Frequenzstützstellen aufgefüllt und die inverse FFT berechnet. Aus dem Absolutbetrag ergibt sich direkt die Erregungszeitfunktion. Daraus werden entsprechend Abschnitt 2.2 und 3.1 mit einer FFT-Länge von 128 Abtastpunkten die Motorordnungen bis zur 6. Ordnung ausgewertet. Bei Formel 2.27 muss dazu die obere Grenze der Summe entsprechend angepasst werden:

$$Mod_{Total}(z) = \sum_{i=0,5,1,\dots}^6 (Mod_i - Mod_{i,noise}) \quad (3.2)$$

Für höhere Drehzahlen liegen nach der Unterabtastung im vordefinierten Zeitfenster von 14336 Abtastpunkten ( $\approx 0,3$  s @ 48 kHz) noch genügend Abtastpunkte vor, um mehrere sich überlappende FFTs und somit mehrere Modulationswerte zu berechnen. Diese werden durch Zentralwertbildung jeweils zu einem Einzahlwert zusammengefasst. Bei sehr kleinen Motordrehzahlen ( $< 900$  U/min) stehen nach der Unterabtastung weniger als 128 Abtastpunkte zur Verfügung und es wird mit Nullen auf 128 Abtastpunkte aufgefüllt, um einen Modulationswert berechnen zu können.

- k=8:

Aus den 64 Modulationswerten und Lautstärkepegeln wird entsprechend Kapitel 2.3 ein CKI-Wert berechnet. Dabei entfällt die Interpolation der unterschiedlichen Zeitachsen, da nur ein Zeitwert pro Frequenzband verarbeitet werden muss. In Abschnitt 2.4 wurde die Drehzahlabhängigkeit des CKI-Ausgangswertes bei aktivierter "Time Smoothing" Funktion in der bestehenden Software beschrieben. Um diese zu berücksichtigen, wurde aus einem Motorhochlauf mittels linearer Regressionsanalyse ein Korrekturfaktor  $\alpha_{rpm} = -0,0031$  ermittelt. Multipliziert mit der mittleren Drehzahl des Datenblocks  $R\bar{P}M$  ergibt sich der Korrekturterm DK mit:

$$DK = -0,0031 * R\bar{P}M \quad (3.3)$$

Dieser wird zu dem mit Formel 2.33 errechneten CKI-Wert addiert und ergibt den drehzahlkorrigierten Ausgangswert.

### 3.6 Umsetzung in der Programmiersprache C

Durch die beschriebenen Maßnahmen konnte die Rechenzeit für eine 2 Sekunden lange Audioaufnahme bereits von vorher 3,8 Sekunden auf 0,48 Sekunden reduziert werden, was ca. einem Faktor 8 entspricht.<sup>1</sup> Da als Ziel der Arbeit eine Umsetzung in C gefordert war, wurde der MATLAB-Code

<sup>1</sup>Die Rechenzeit der alten Software wurde mit Hilfe einer Stoppuhr gemessen, beim neuen Algorithmus wurde die Funktion tic in MATLAB verwendet.

bereits während des Optimierungsprozesses auf eine C-nahe Programmierung angepasst. Matrixoperationen wurden weitgehend vermieden und als for-Schleifen implementiert, sodass letztendlich nur noch die Syntax in C übersetzt werden musste. Durch die Umsetzung in C konnte der Geschwindigkeitsgewinn der Berechnung weiterhin auf einen Faktor  $> 12$  gegenüber der Version in Delphi PASCAL gesteigert werden, für eine 2 Sekunden lange Audiodatei benötigt der C-Code bei gleicher Hardware weniger als 0,3 Sekunden zur Berechnung des CKI. Im Sinne einer hohen Benutzerfreundlichkeit wurden zwei lauffähige Software-Versionen des C-Codes zur CKI-Berechnung umgesetzt. Die erste Variante nutzt als Interface die MATLAB-Umgebung und eignet sich vor Allem zur schnellen Stapelverarbeitung vieler Audiodateien. Dazu wurden sogenannte *MEX*-Funktionen<sup>2</sup> aus dem C-Code erstellt (*includevariables\_mex.mexw64* und *CKIfunction\_mex.mexw64*). Die zweite realisierte Variante ist die Verwendung des C-Codes als externes Objekt (external) für die Software *pure data* (pd). Damit kann der CKI in Echtzeit berechnet und angezeigt werden. Neben diesen zwei lauffähigen CKI-Auswertungsprogrammen könnte der nun vorliegende C-Code problemlos in andere Software eingebettet oder auf einem Mikroprozessor implementiert werden. Erklärungen zur Bedienung beider Software-Varianten sowie zur Syntax der C-Funktionen finden sich im Anhang A.

---

<sup>2</sup>Das MATLAB executable Interface bietet die Möglichkeit, C-Code innerhalb der MATLAB Umgebung auszuführen.

## Kapitel 4

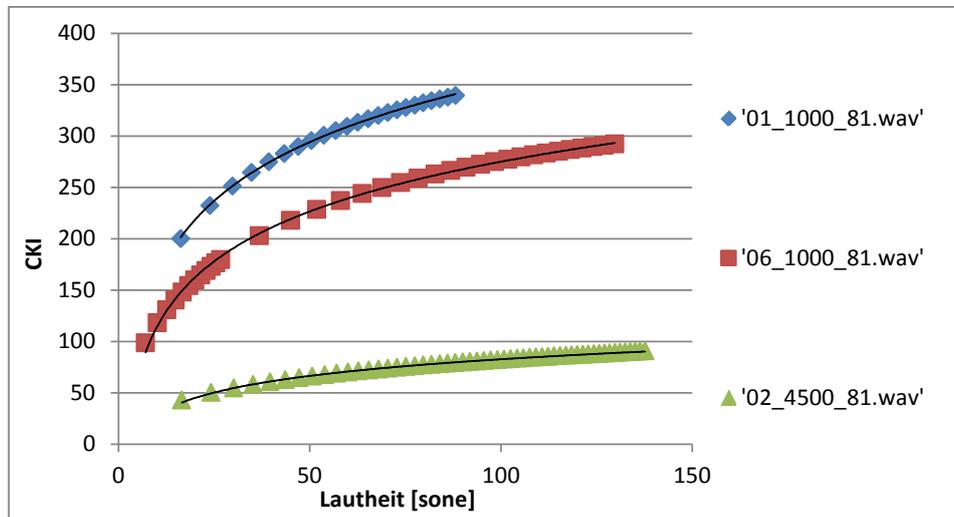
# Untersuchung ausgewählter Einflussparameter des CKI

In den folgenden Unterkapiteln werden die Einflussfaktoren Lautheit, Motordrehzahl, Rauigkeit und Impulshaltigkeit in Bezug auf den CKI-Wert untersucht. Als Datengrundlage standen die Audioaufnahmen der Motorgereusche von zehn verschiedenen Fahrzeugen in unterschiedlichen Betriebszuständen (Vollast, Leerlauf) und Drehzahlen (750 bis 4500 U/min) zur Verfügung. Die Lautheit der Aufnahmen war untereinander angeglichen. Eine Tabelle mit allen Audioaufnahmen findet sich im Anhang B.

Für die folgenden Untersuchungen und statistischen Auswertungen wurde jeweils der Medianwert des alten CKI-Algorithmus über die Zeitspanne der gesamten Audiodatei herangezogen. Der arithmetische Mittelwert ist aus folgenden Gründen ungeeignet:

- Da keine vollständige Stationarität des Motorzustandes garantiert werden kann, können die CKI-Werte über der Zeit nicht als normalverteilt angenommen werden.
- Durch die geringe Länge (2 Sekunden) der Aufnahmen sind die Randeffekte der ersten Fensterfunktion relativ groß. Durch den Medianwert werden diese Einflüsse minimiert.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs der einzelnen Parameter auf den CKI-Wert wurde das lineare Regressionsmodell [32] sowie für die Lautheit ein logarithmisches Regressionsmodell verwendet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches sich beim linearen Regressionsmodell direkt aus dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten nach Pearson ergibt, ist jeweils in den Abbildungen oder im Text angegeben. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die einzelnen Parameter nicht als vollständig unkorreliert angenommen werden können. So wird die Schallabstrahlung eines Motor bei höherer Drehzahl immer stärker ausfallen als bei niedriger Drehzahl. Nach [18] besteht außerdem ein proportionaler Zusammenhang zwischen Drehzahl und Rauigkeit. Somit sind Aussagen zum Einfluss einer einzelnen Größe mit Vorsicht zu

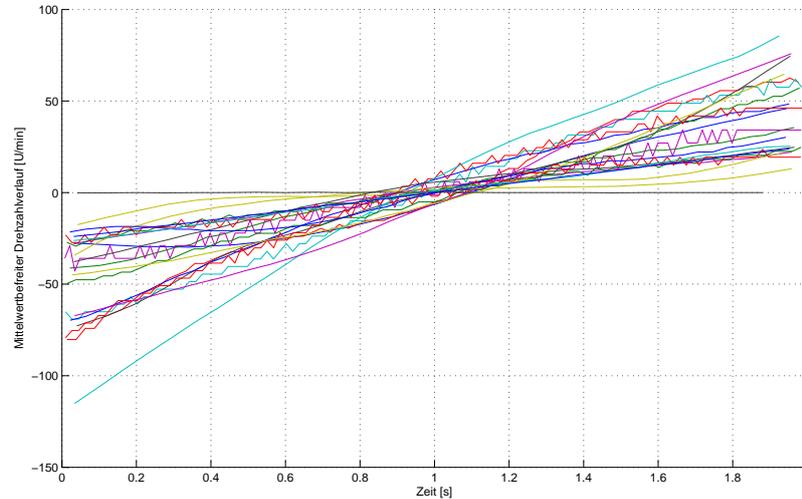


**Abbildung 4.1:** Einfluss der Lautheit auf den CKI-Wert. Deutlich erkennbar ist der logarithmische Zusammenhang.

treffen. Trotzdem kann die Regressionsanalyse Aufschluss über die Tendenz der einzelnen Einflüsse geben.

## 4.1 Lautheit

In verschiedenen Studien ([9] und [13] sind zwei Beispiele aus dem Automotive-Bereich) konnte bereits gezeigt werden, dass die Lautheit stark mit der empfundenen Lästigkeit von Geräuschen korreliert. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit eine Steigerung der Lautheit auch eine Erhöhung des CKI bewirkt. Zur Kontrolle wurde zunächst die Lautheit der Audioaufnahmen in Tabelle B.1 ausgewertet. Dabei ergab sich bei den lautheitskompensierten Aufnahmen eine gleiche Lautheit von  $81 \pm 0,02$  Sone, was als vernachlässigbare Differenz gewertet werden kann. Um die Auswirkung einer veränderten Lautheit möglichst getrennt von anderen Einflüssen bewerten zu können, wurden drei Audiobeispiele in ihrer Gesamtlautstärke verändert und anschließend die Lautheit sowie der CKI (Medianwert über die gesamte Aufnahme) ausgewertet. Dies wurde mehrfach wiederholt, um Datenpunkte über einen möglichst großen Lautheitsbereich zu erhalten. Dadurch ergaben sich für die Aufnahmen drei Regressionskurven, welche mit einem Bestimmtheitsmaß von jeweils über 99,7% einem logarithmischen Zusammenhang folgen. Dieser ist auch aus Formel 2.33 ersichtlich. Die Regressionskurven sind für kleine CKI-Werte relativ flach und werden für größere CKI-Werte deutlich steiler. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bei stark ausgeprägtem

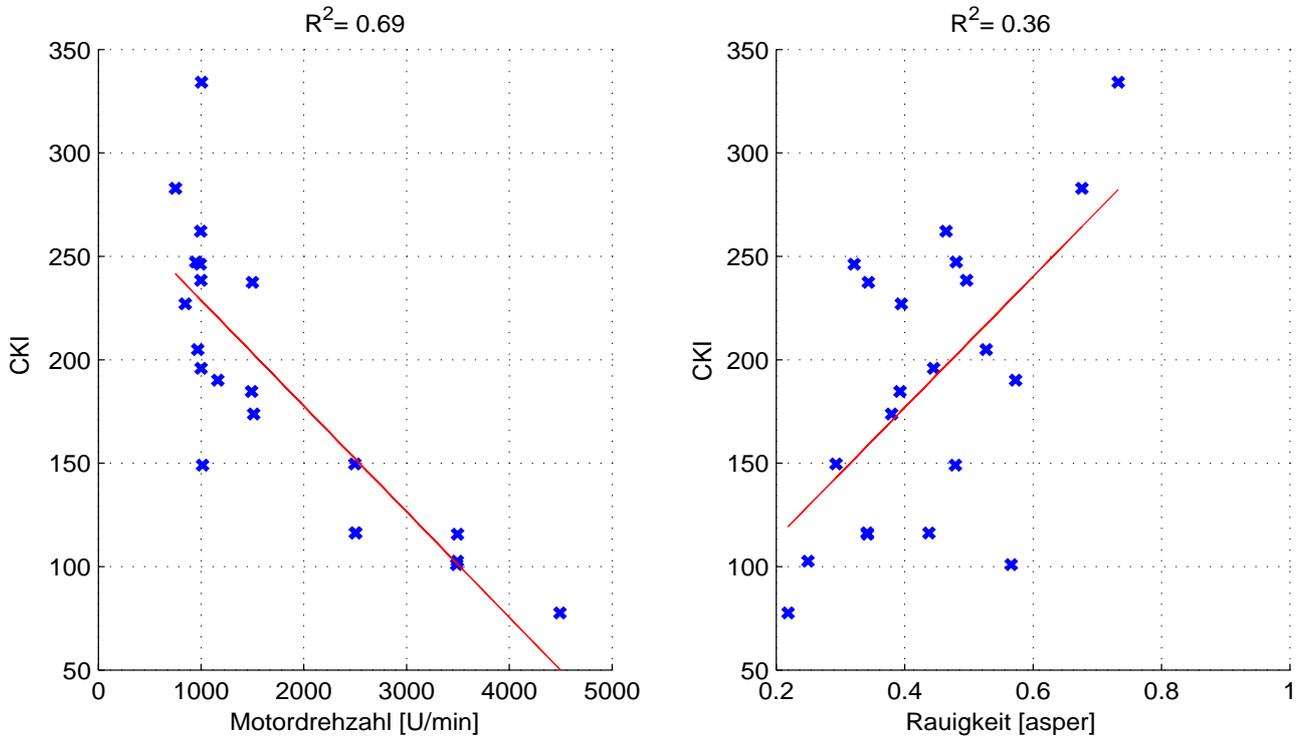


**Abbildung 4.2:** Mittelwertbefreiter Drehzahlverlauf der Audioaufnahmen aus Tabelle B.1. Innerhalb einer Aufnahme beträgt die maximale Drehzahländerung 200 U/min.

Nagelgeräusch der CKI empfindlicher auf Lautheitsunterschiede reagiert, bei geringem Nagelgeräusch ist der Einfluss auf den CKI gering. Für sehr hohe Lautstärken geht der Zusammenhang Lautheit - CKI in Sättigung, eine weitere Lautheitszunahme bewirkt ab einer gewissen Lautheitsausprägung keine weitere relevante Steigerung des CKI-Wertes. Dies deckt sich mit den Ergebnissen in [3]. Dort konnte mittels Versuchsreihen gezeigt werden, dass der Zusammenhang zwischen subjektiver Empfindung der Geräuschqualität und Lautheit annähernd einer Exponentialfunktion folgt.

## 4.2 Motordrehzahl

Da durch verschiedene Zustände und Drehzahlbereiche des Motors ein sehr breites Feld an unterschiedlichen Geräuschzuständen abgestrahlt wird, wurde der Zusammenhang der Drehzahl mit dem Nagelgeräusch untersucht. Abbildung 4.2 zeigt den mittelwertbefreiten Drehzahlverlauf der Aufnahmen aus Tabelle B.1. Die Drehzahl ist bei allen Aufnahmen über die Zeit nahezu konstant. Die maximale Änderung über die Zeit von 2 Sekunden findet sich mit 200 Umdrehungen pro Minute bei der Aufnahme '05\_0000\_N81.wav'. Die mittleren Drehzahlen der Aufnahmen umspannen dabei einen Bereich von 750 bis 4494 U/min. Der Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und CKI-Wert ist in Abbildung 4.3 links dargestellt. Die Regressionsgerade hat eine negative Steigung, das bedeutet: Bei höheren Drehzahlen ist der CKI-

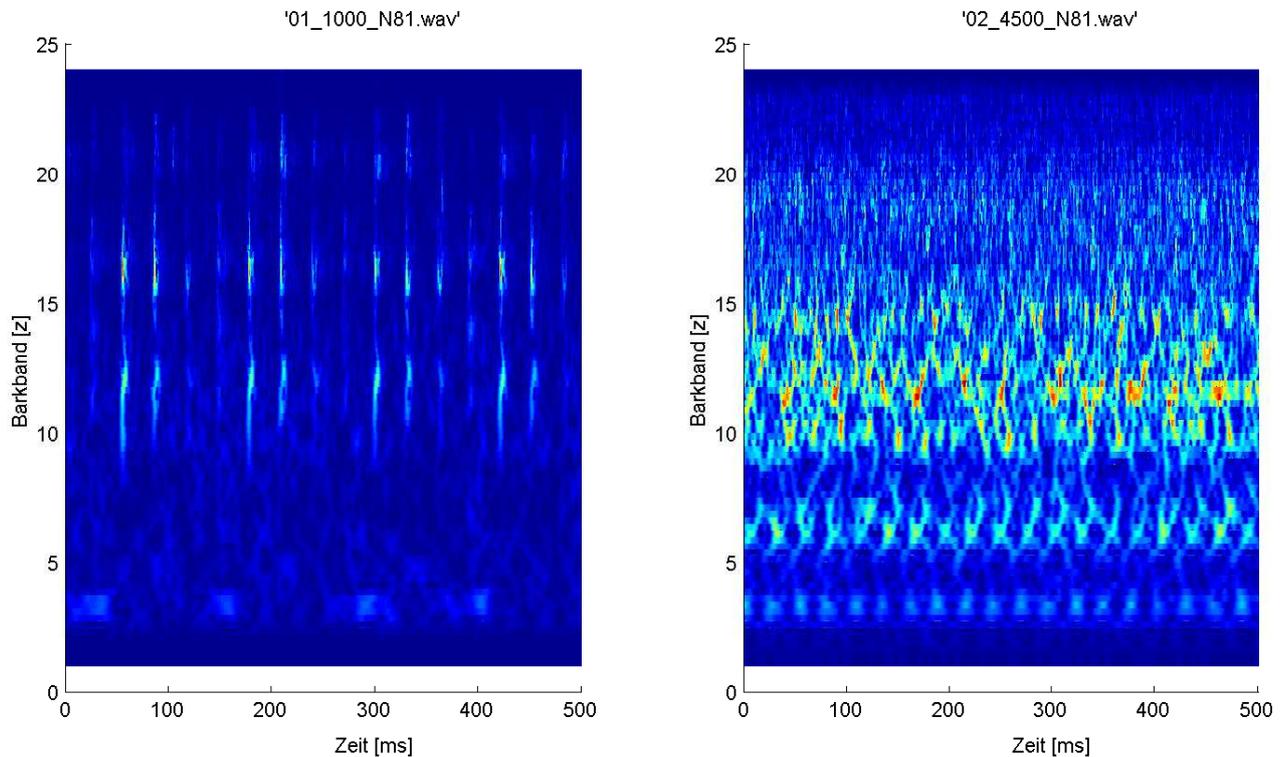


**Abbildung 4.3:** Lineare Regression der Drehzahl und der Rauigkeit mit dem CKI-Wert. Bei zunehmender Drehzahl ist der CKI tendenziell geringer, Rauigkeit und CKI stehen in einem - wenn auch schwachen - proportionalen Verhältnis zueinander.

Wert tendenziell geringer. Die Aussagekraft des linearen Regressionsmodells liegt hier bei 69%.

### 4.3 Rauigkeit

Zur Auswertung der Rauigkeit wurde das Rauigkeitsmodell aus [18] herangezogen. Verwendet wurde der Medianwert der kalibrierten Rauigkeitswerte für das gruppenspezifische Modell der Gruppe "AVL". Abbildung 4.3 rechts zeigt die Regression der Rauigkeit mit dem CKI. Die Rauigkeit verläuft tendenziell proportional zum CKI, die Aussagekraft für den Datensatz liegt jedoch nur bei 36%, die Werte sind relativ weit um die Regressionsgerade gestreut. Da die Modellansätze des Rauigkeitsmodells und des CKI vom Aufbau ähnlich sind, ist ein proportionales Verhältnis plausibel, die schwache Korrelation deutet jedoch darauf hin, dass die Unterschiede zwischen den Modellen - beispielsweise die drehzahlabhängige Neuabtastung und die nicht frequenzabhängige Nachverdeckung beim CKI - durchaus relevante

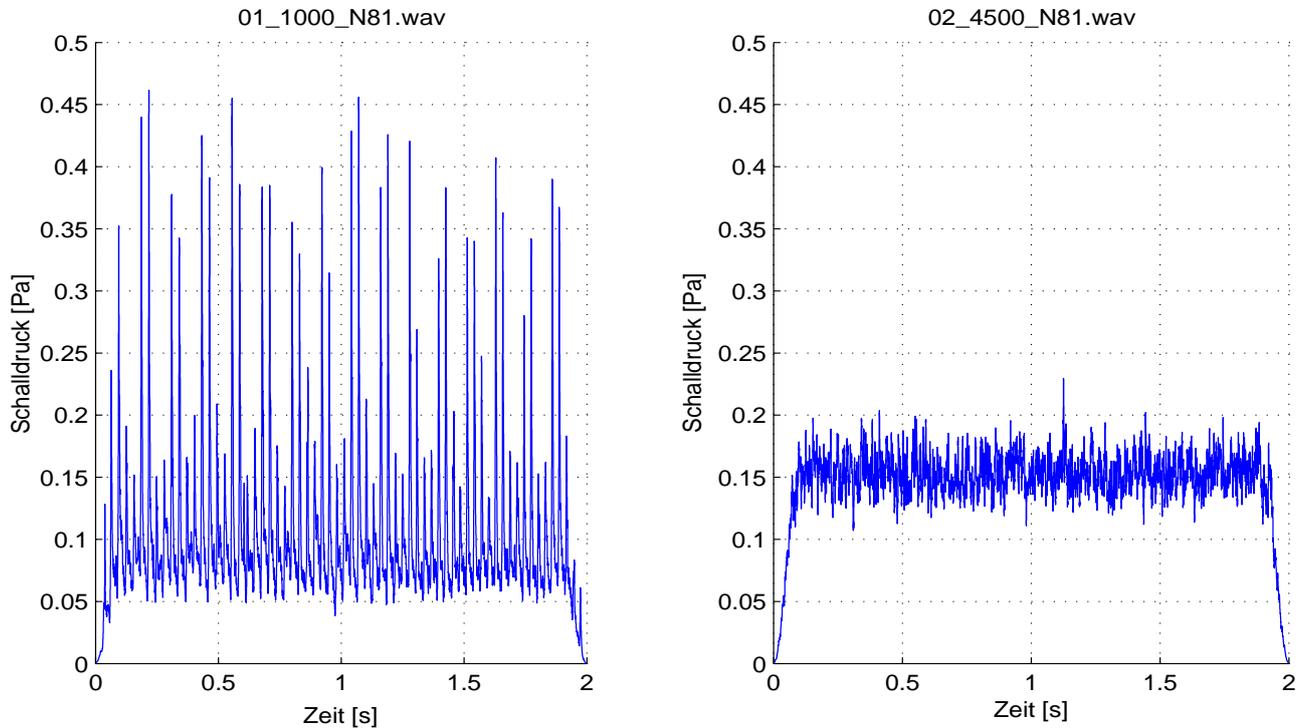


**Abbildung 4.4:** Zeitverlauf der Erregungszeitfunktionen aller Frequenzbänder - Vergleich schwaches und starkes Nagelgeräusch. Links ist eine starke Korrelation zwischen den Bändern erkennbar.

Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

#### 4.4 Impulshaltigkeit

Zur Untersuchung der Impulshaltigkeit wurde das Modell nach Sottek [19] herangezogen. Darin wurde vorgeschlagen, erst die Summe der Erregungszeitfunktionen auf Impulshaltigkeit zu untersuchen. Vergleicht man die Einhüllenden der kritischen Bänder von Aufnahmen mit einer geringen ('02\_4500\_N81.wav', CKI Medianwert 78) und starken ('01\_1000\_N81.wav', CKI Medianwert 334) Ausprägung des wahrgenommenen Nagelgeräusches, so wird bei der Aufnahme mit einem stark ausgeprägten Nagelgeräusch die vertikale Strukturausformung auffällig. Dies deutet auf eine Korrelation zwischen den Frequenzbändern hin, während beim geringen Nagelgeräusch eine Phasenverschiebung der Nagelimpulse zwischen den Frequenzbändern besteht (Abbildung 4.4). Wird nun über die Bänder gemittelt und das resultierende Zeitsignal  $env[n]$  betrachtet, sind beim korrelierten Signal deutliche



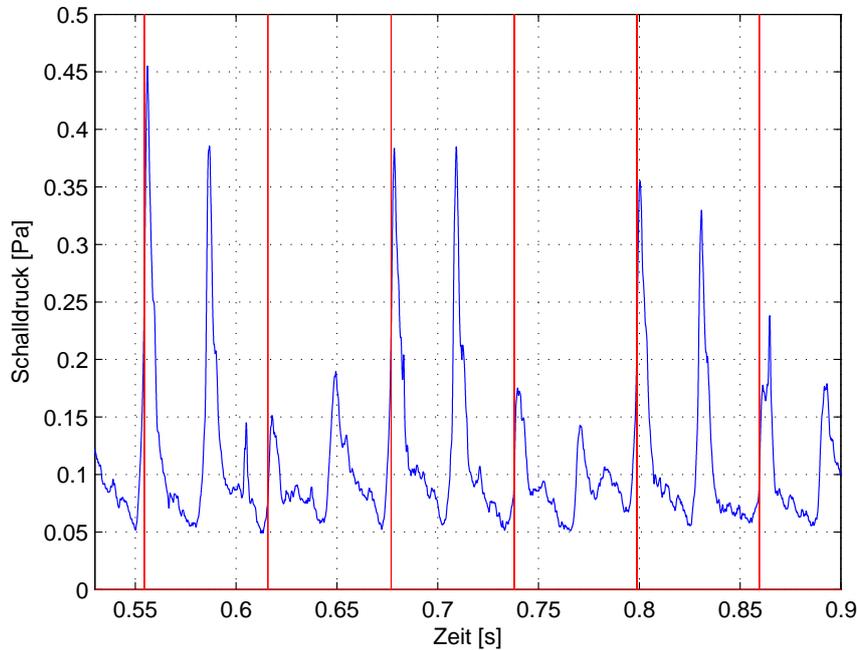
**Abbildung 4.5:** Vergleich zweier gemittelter Erregungszeitfunktionen. Links eine Aufnahme mit stark ausgeprägtem wahrgenommenen Nagelgeräusch, rechts ist das wahrgenommene Nagelgeräusch gering.

Impulsspitzen zu sehen, während beim Signal ohne Korrelation zwischen den Frequenzbändern die Impulse durch die Mittelungsfunktion verloren gehen (Abbildung 4.5).

Abbildung 4.6 zeigt einen kürzeren Zeitausschnitt der Aufnahme '01\_1000\_N81.wav' mit überlagertem Motorsignal. Es sind deutlich vier abklingende, periodische, ausgeprägte Impulse zu erkennen. Diese verteilen sich über jeweils zwei Motorumdrehungen. Betrachtet man nur den jeweils ersten dieser Impulse, so ergibt sich bei der in dieser Aufnahme konstanten Drehzahl von 1000 RPM eine Frequenz von  $0,5 * \frac{1000}{60} = 8,3$  Hz, was nahezu exakt der oberen Frequenz (8 Hz) des von Heldmann in [7] angegebenen Bereichs der maximalen empfundenen Impulshaltigkeit entspricht. Zur Auswertung wurde nun folgender einfacher Ansatz zur Berechnung eines Einzahlwertes gewählt: pro Motorumdrehung (Zeitabschnitt zwischen zwei roten Linien in Abbildung 4.5) wird die Teil-Impulshaltigkeit mit

$$I = \max(\overline{env}[n]) - \min(\overline{env}[n]) \quad (4.1)$$

berechnet und anschließend über den Zeitverlauf der Zentralwert gebildet.

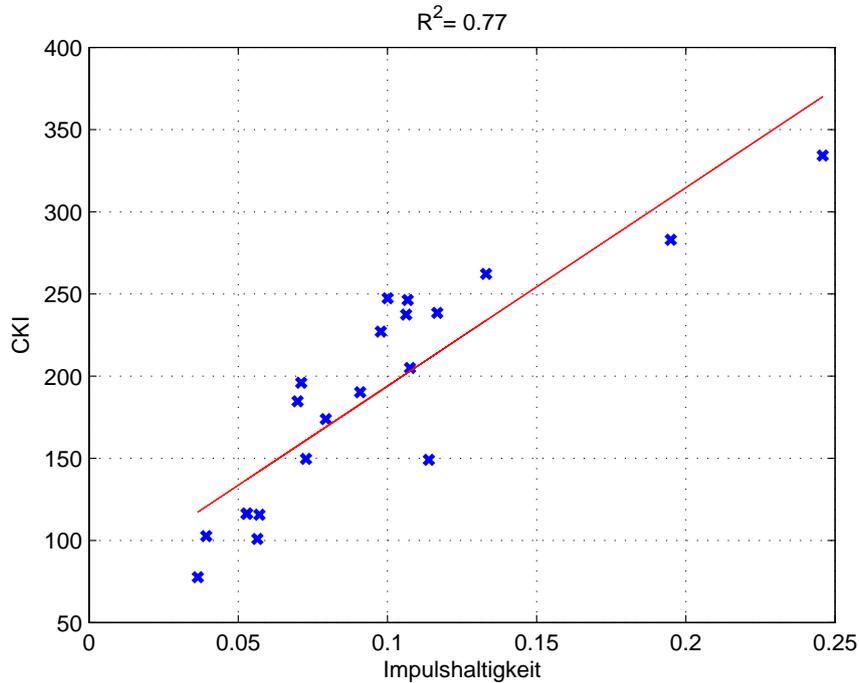


**Abbildung 4.6:** Zoom eines Zeitausschnittes der gemittelten Erregungszeitfunktionen aus Aufnahme '01\_1000\_N81.wav'. Es sind deutlich ausgeprägte Impulsspitzen zu sehen.

Bezieht man diesen Einzahlwert nun auf die Ergebnisse des CKI und die subjektiven Bewertungen des Dieselnagelns, so ergibt sich die Regressionskurve in Abbildung 4.7. Mit einem Bestimmtheitsmaß vom 77% ist damit ein sehr gutes und mit wenig Aufwand berechenbares Maß gefunden, welches durchaus in der Lage sein könnte, das Dieselnageln mit leistungsschwacher Hardware grob abzuschätzen.

## 4.5 Alternativer Modellansatz zur Bestimmung des Nagelgeräusches

Durch die gewonnenen Erkenntnisse der vorherigen Abschnitte bietet sich der Versuch einer multiplen Regressionsanalyse an. Dabei werden die einzelnen Einflüsse zu einer linearen Gleichung kombiniert, welche den Ausgangswert CKI möglichst genau nachbildet. Die Rauigkeit wurde auf Grund des im Vergleich zu den anderen Werten deutlich größeren Berechnungsaufwandes von der multiplen Regressionsanalyse ausgeschlossen. Da die Lautheit bei der Berechnung der Impulshaltigkeit durch den größeren absoluten Abstand



**Abbildung 4.7:** Regression der Impulshaltigkeit mit dem CKI.

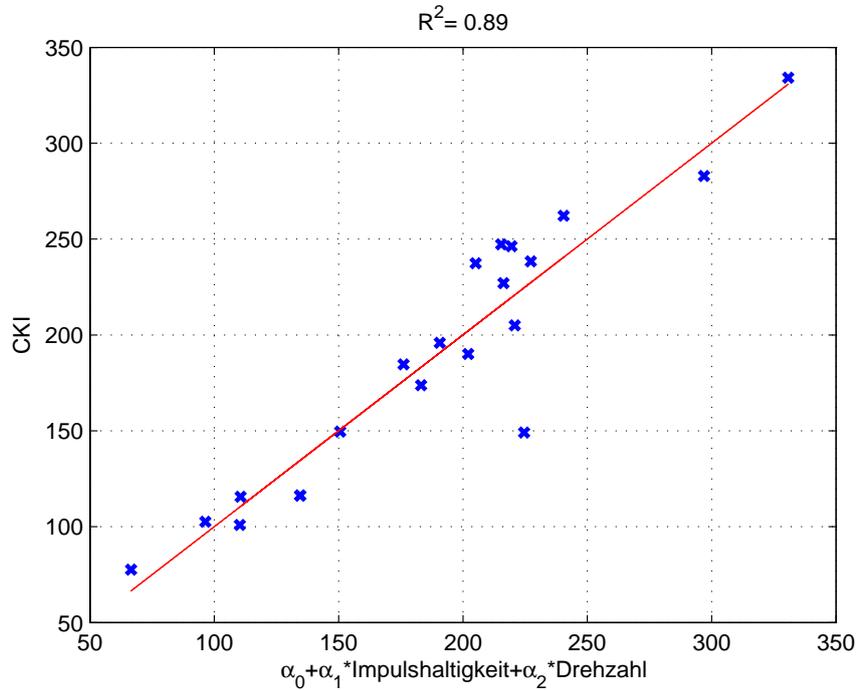
der Impulsspitzen vom Rauschen mit einfließt (bzw. die Impulshaltigkeit stark mit der Lautheit korreliert ist), wird im Regressionsmodell keine weitere Einbeziehung der Lautheit berücksichtigt. Demnach bleiben die zwei Parameter Drehzahl und Impulshaltigkeit für die lineare Regressionsgleichung:

$$C\tilde{K}I = \alpha_0 + \alpha_1 * \text{Impulshaltigkeit} + \alpha_2 * \text{Motordrehzahl} \quad (4.2)$$

Die Variablen  $\alpha_0$  und  $\alpha_1$  wurden mittels der MATLAB Funktion *regress.m* ermittelt. Damit ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0.94$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 89\%$ . Dies entspricht einer deutlichen Steigerung der Güte des Modells gegenüber den einzelnen 1-Parameter-Modellen. Die beiden Variablen der Gleichung 4.2 lauten:

$$\alpha_0 = 153,14, \alpha_1 = 750,89 \text{ und } \alpha_2 = -0,03 \quad (4.3)$$

Die erreichte Regressionsgerade ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es ergibt sich eine gute Korrelation des neuen Wertes  $C\tilde{K}I$  mit dem CKI, das Bestimmtheitsmaß beträgt 89%.



**Abbildung 4.8:** Multiple lineare Regression des aus der Impulshaltigkeit und der Drehzahl berechneten Wertes  $CKI$  mit dem Original-CKI.

Um den Anteil der einzelnen Parameter am Regressionsmodell zu prüfen, wurden die Werte für die Impulshaltigkeit und die Drehzahl studentisiert [21], um einen vergleichbaren Wertebereich zu erhalten. Für jeden Datenpunkt mit Index  $j$  gilt:

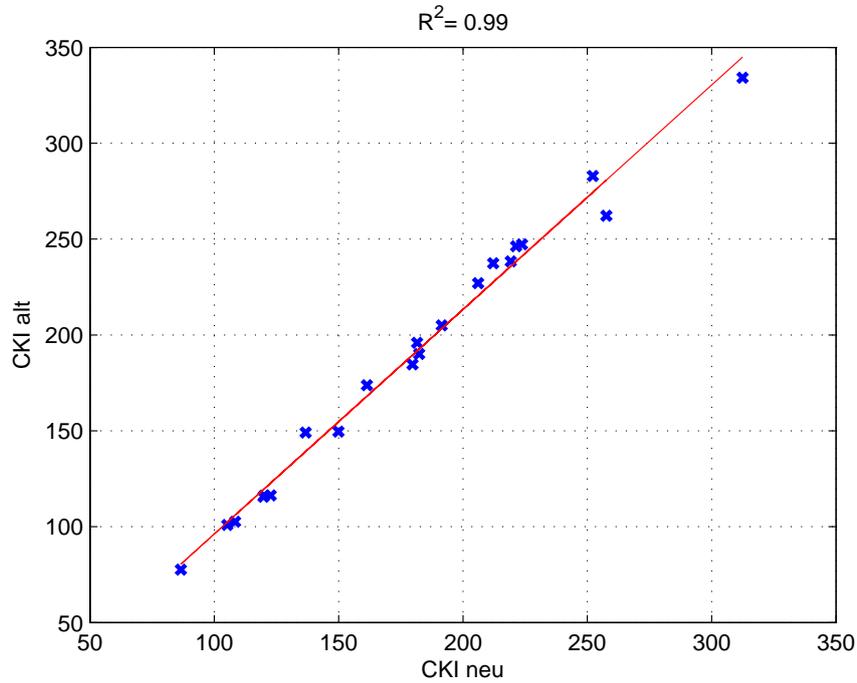
$$I_{j,stud} = \frac{I_j - \bar{I}}{\sqrt{\frac{1}{21} \sum_j (I_j - \bar{I})^2}} \quad (4.4)$$

$$RPM_{j,stud} = \frac{RPM_j - \bar{RPM}}{\sqrt{\frac{1}{21} \sum_j (RPM_j - \bar{RPM})^2}} \quad (4.5)$$

Dabei ist der Nennerterm jeweils die Stichprobenstandardabweichung der 21 Datenpunkte für die Impulshaltigkeit und die Drehzahl. Nun wurden die Koeffizienten des Regressionsmodells auf Basis des studentisierten Datensatzes neu berechnet. Daraus ergeben sich  $\alpha_0$  bis  $\alpha_2$  mit:

$$\alpha_0 = 188,23, \alpha_1 = 40,3 \text{ und } \alpha_2 = -31 \quad (4.6)$$

Umgerechnet betragen die Beiträge der Impulshaltigkeit und der Motordrehzahl zum linearen Regressionsmodell somit ca. 43% und 57%.



**Abbildung 4.9:** Regression des neuen, Rechenzeit optimierten CKI mit dem alten CKI.

## 4.6 Evaluierung des neuen CKI

Da alle Regressionsuntersuchungen in den vorherigen Abschnitten den alten CKI-Wert als Datengrundlage verwenden, soll an dieser Stelle noch gezeigt werden, wie genau die Ausgangswerte des neuen Algorithmus die alten CKI-Werte abbilden. Dazu zeigt Abbildung 4.9 die lineare Regression der beiden CKI-Datensätze, welche sämtliche Audioaufnahmen aus Tabelle B.1 umfassen. Es wurde dabei ein Bestimmtheitsmaß von 99% erreicht, mit dem das Ergebnis des alten Algorithmus durch die neue, Rechenzeit optimierte Version nachgebildet werden kann. Somit können die Erkenntnisse dieses Kapitels für den neuen CKI-Algorithmus als ebenso gültig angenommen werden.

## Kapitel 5

# Subjektive Evaluierung des Diesel-Nagelgeräusches

Da bisher keine aussagekräftigen Daten zur Korrelation des CKI-Wertes mit subjektiven Bewertungen des Dieselnagelns vorlagen, wurden im Rahmen der Masterarbeit informelle Hörtests durchgeführt, um anhand des daraus gewonnenen Datenmaterials den Zusammenhang zwischen Modellergebnissen und subjektiven Beurteilungen untersuchen zu können.

### 5.1 Versuchsaufbau und Datenaufbereitung

Zur subjektiven Evaluierung wurde der bereits in Kapitel 4 untersuchte Datensatz verwendet. Im Folgenden werden die einzelnen Stimuli mit einem Index versehen, um die Übersichtlichkeit in den einzelnen Darstellungen zu erhalten. Tabelle B.1 zeigt die verwendeten Stimuli und den zugehörigen Index. Zur Teilnahme am Hörversuch konnten 11 akustisch erfahrene Versuchspersonen gewonnen werden. In einer dem Test vorangestellten Trainingsphase wurden den Probanden jeweils 3 repräsentative Beispiele für "starkes" und für "schwaches Nageln" vorgeführt. Anschließend wurden den Probanden in fünf Beurteilungsrunden jeweils bis zu acht Aufnahmen präsentiert, welche auf einer Skala von 0 (schwaches Nagelgeräusch) bis 50 (starkes Nagelgeräusch) bewertet werden konnten (Abbildung 5.1). Dabei bestand jederzeit die Option zur Wiederholung einzelner Stimuli. In der letzten Runde wurden den Teilnehmern Stimuli mit veränderter Lautheit dargeboten, welche zuvor bereits vorgekommen waren. In Runde 1 bis 4 wurden jeweils zwei versteckte Ankerpunkte inkludiert (Stimulus Nr. 4 und Nr. 13), welche im untersuchten Datensatz die Ober- und Untergrenze der vorhandenen CKI-Werte repräsentieren. Dadurch kann zum Einen die Urteilsfähigkeit einzelner Teilnehmer überprüft werden und zum Anderen sollte die Werteskalierung zwischen den Stimuli gleichmäßiger ausfallen. Zur Feinabstimmung der Bewertung hatten die Versuchspersonen jederzeit die Möglichkeit, die Stimuli nach ihrer abge-

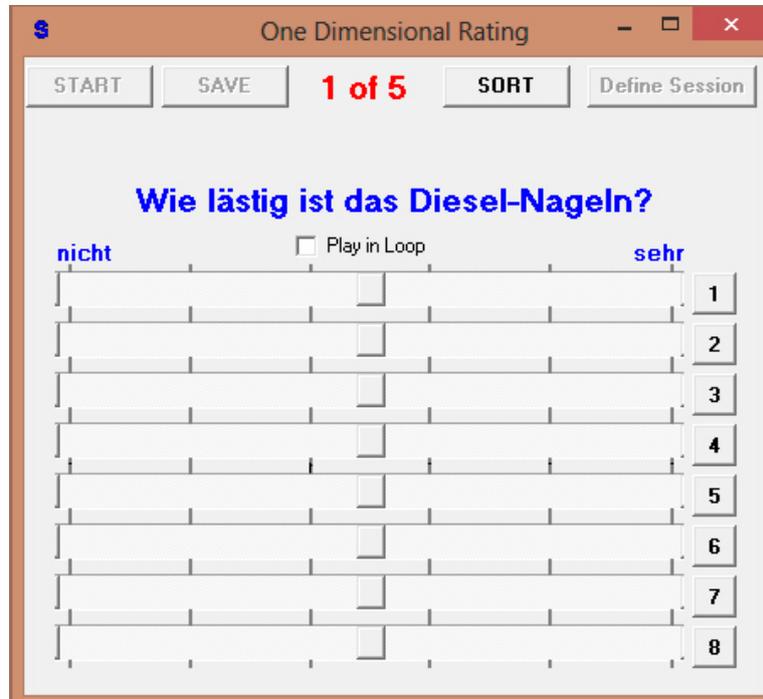


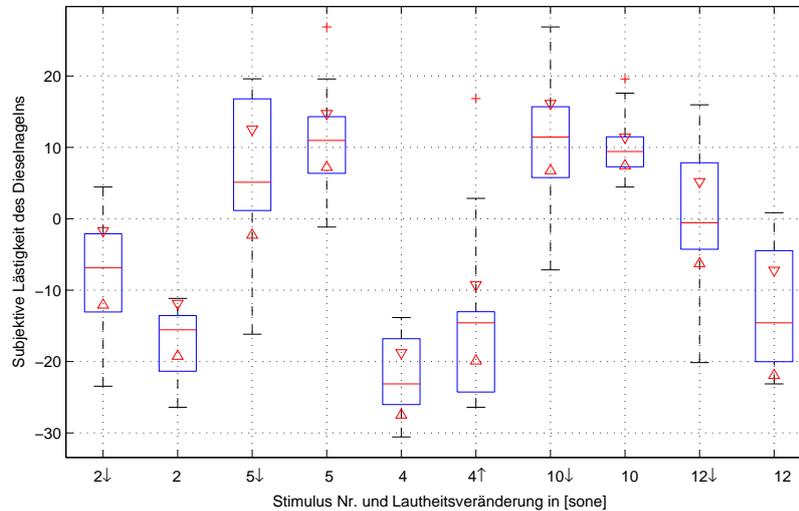
Abbildung 5.1: Software für den Hörversuch.

gebenen Bewertung zu sortieren. Die Wiedergabe der Klangdateien erfolgte in einem ruhigen Raum mit einem geschlossenem AKG K270 Studio Kopfhörer.

Um die Unterschiede der Sensibilität einzelner Versuchspersonen auf das Nagelgeräusch auszugleichen, wurden die subjektiven Daten auf Null zentriert. Dazu wurde der arithmetische Mittelwert aller Beurteilungen jeder einzelnen Versuchsperson von den Einzelbewertungen subtrahiert. Eine Bewertung von 25 (mittlere Lästigkeit des Nagelgeräusches) entspricht somit nach der Datenaufbereitung bei gleichmäßiger Skalenausnutzung der Versuchsperson einem Wert von 0.

## 5.2 Lautheitseinfluss

Abbildung 5.2 zeigt zunächst die Ergebnisse der fünften Runde des Hörversuchs. Darin ist jeder der vier Stimuli jeweils einmal ohne und einmal mit Lautheitsänderung (inkl. Richtung) zu sehen. Da bei drei von fünf Stimuli die jeweils leisere Version als lästiger bewertet wurde, ist davon auszugehen, dass die Versuchspersonen von den unterschiedlichen Lautstärken irritiert waren und bewusst gegen eine Manipulation gesteuert haben. Die Auswer-



**Abbildung 5.2:** Boxplot der subjektiven Daten aus Beurteilungsrunde 5 des informellen Hörtests. Die Beschriftung der x-Achse kennzeichnet den Index des jeweiligen Stimulus sowie die Veränderung der Lautheit gegenüber der Originalaufnahme mit 81 Sone.

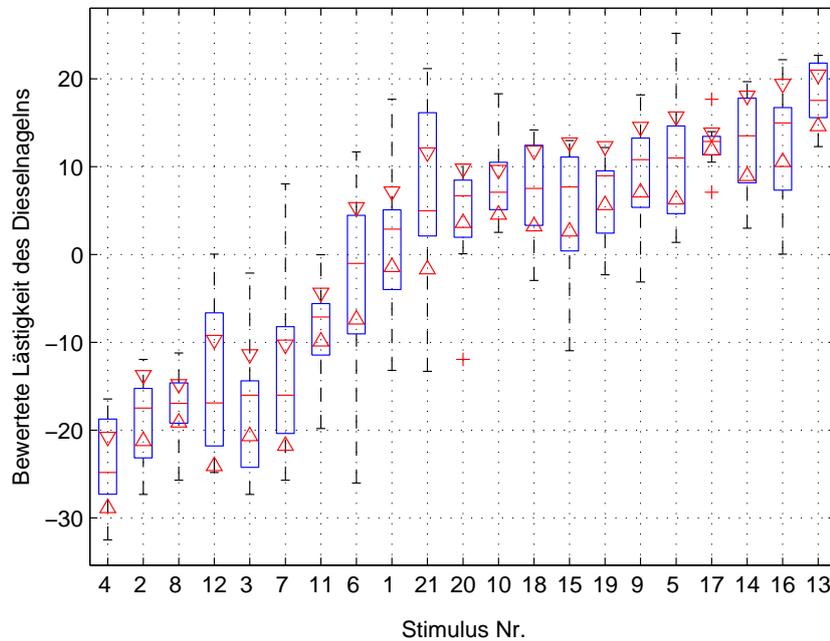
zung der Lautheit ist anhand der Versuchsergebnisse somit nicht möglich und es werden im Folgenden nur noch Runde 1 bis 4 des Hörversuchs betrachtet.

### 5.3 Verteilung der subjektiven Daten

Um Aufschluss über die geeigneten statistischen Methoden zur Auswertung der Daten zu gewinnen, wurden diese zunächst auf Normalverteilung überprüft. Dazu wurde der zweiseitige Shapiro-Wilk-Test herangezogen, da dieser bereits bei kleinen Stichproben ab drei Beobachtungen eingesetzt werden kann [34]. Die Nullhypothese  $H_0$ , welche besagt, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt, wurde dabei für den Stimulus Nr. 20 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % abgelehnt. Somit wurden für die weiteren Untersuchungen die Zentralwerte und Interquartilsbereiche der subjektiven Daten ausgewertet.

### 5.4 Ausschluss von Versuchspersonen

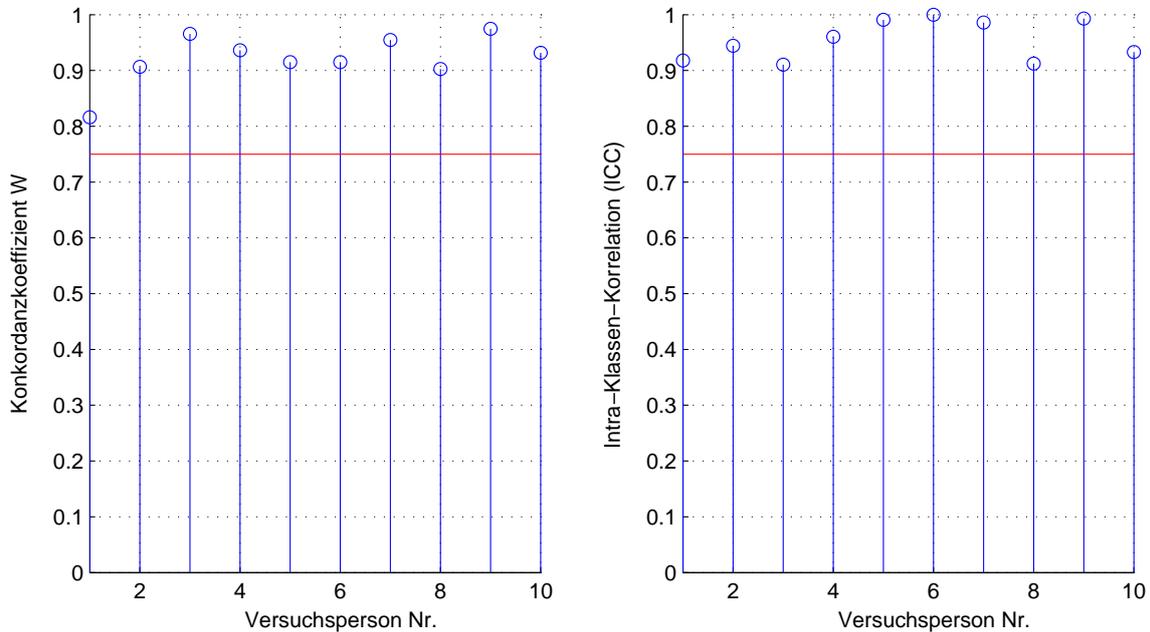
Des Weiteren wurde die Urteilsfähigkeit der Versuchspersonen anhand der Gruppenkonsistenz untersucht. Dazu wurde aus den Medianwerten der ge-



**Abbildung 5.3:** Boxplot der subjektiven Daten, geordnet nach dem Zentralwert der abgegebenen Bewertungen.

samtigen Ergebnisse eine Gruppenreihung ermittelt. Abbildung 5.3 zeigt die subjektiven Daten als Boxplot nach Gruppenreihung geordnet. Für jeden Stimulus ist der Medianwert als rote Linie eingezeichnet. Der Bereich, in dem 50% aller abgegebenen Bewertungen liegen, wird Interquartilsbereich genannt und ist im Diagramm mit einer blauen Box gekennzeichnet. Die äußeren "Whisker" (Antennen) kennzeichnen den letzten Wert, welcher noch innerhalb des Bereichs  $1.5 * \text{Interquartilsbereich}$  liegt. Weiterhin sind Ausreißer als rotes "+" eingezeichnet. Die roten Dreiecke markieren die 95% Konfidenzintervalle. Stimuli, bei denen sich die Konfidenzintervalle nicht überlappen, können als statistisch signifikant unterschiedlich gewertet werden. Insgesamt können drei Ausreißer erkannt werden, welche alle von unterschiedlichen Versuchspersonen abgegeben wurden - Versuchsperson 1 ist für den groben Ausreißer bei Stimulus Nr. 20 verantwortlich, Versuchsperson 5 und 6 jeweils für den oberen und unteren Ausreißer bei Stimulus Nr. 17.

Zur Untersuchung der Interrater-Reliabilität wurde die Reihenübereinstimmung anhand des Konkordanzkoeffizienten nach Kendall [31] ausgewertet (Abbildung 5.4). Zur Überprüfung der Intrarater-Reliabilität wurde die Intra-Klassen-Korrelation (engl. Intra-Class-Correlation ICC [30]) berech-



**Abbildung 5.4:** Intra-Klassen-Koeffizient (ICC) und Konkordanzkoeffizient nach Kendall [31].

net. Dazu wurde die Varianz der auf Null zentrierten Beurteilungen der mehrfach dargebotenen Ankerpunkte zur Gesamtvarianz aller Beurteilungen ins Verhältnis gesetzt:

$$ICC = 1 - \frac{\sigma_{Anker}^2}{\sigma_{Total}^2} \quad (5.1)$$

Abbildung 5.4 zeigt den Konkordanzkoeffizienten W und den Intra-Klassen-Koeffizienten ICC über den einzelnen Versuchspersonen. W liegt bei allen Versuchspersonen über 0,8, die ICC ist bei allen Versuchspersonen zwischen 0,9 und 1. Da zudem keine Versuchsperson mehr als einen Ausreißer zu verzeichnen hat, ergibt sich keine Notwendigkeit, einzelne Versuchspersonen auszuschließen.

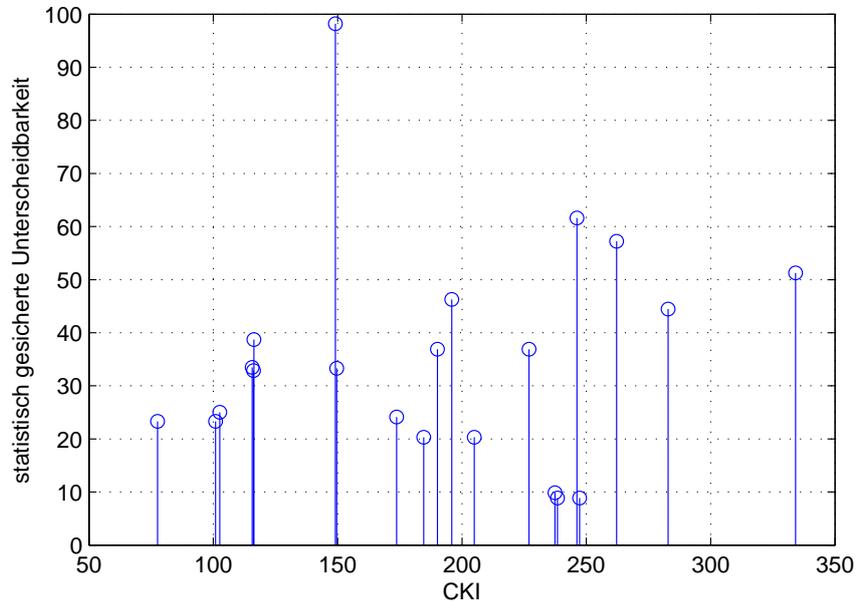
## 5.5 Reihungsübereinstimmung mit dem CKI

Um die Reihungsübereinstimmung mit den objektiven CKI-Werten zu untersuchen, wurde die Rangfolge der CKI-Werte ebenfalls mittels Kendalls Konkordanzkoeffizienten mit den subjektiven Ergebnissen verglichen. Dabei ergab sich ein Konkordanzkoeffizient von  $W=0.96$ , was als sehr gute

Übereinstimmung der subjektiven Ergebnisse mit dem CKI auf Ordinalskalenniveau zu bewerten ist. Um grobe Reihungsfehler des CKI im Vergleich zu den statistisch signifikanten Reihungsunterschieden bei den subjektiven Ergebnissen ausfindig zu machen, wurden alle Stimuli paarweise auf Überlappung der nach [10] berechneten Konfidenzintervalle überprüft. Die objektiven CKI-Werte wurden entsprechend Abbildung 5.3 in die subjektive Gruppenreihenfolge gebracht. Sucht man nun Stimuli, welche beim Hörversuch signifikant unterschiedlich bewertet wurden und deren CKI-Werte eine andere Reihung aufweisen oder weniger als 5% auseinander liegen, ergibt sich genau ein Stimuli-Paar: '07\_2500\_N81.wav' (Stimulus Nr. 11) und '05\_0000\_N81.wav' (Stimulus Nr. 15). Anhand dieser beiden Beispiele kann durch erneute Sichtung der Daten die Hypothese bekräftigt werden, dass bei höherer Drehzahl das Nagelgeräusch des Dieselmotors zunehmend in eine Rauigkeitsempfindung übergeht. Die Rauigkeitswerte zeigen mit  $R=0.48$  und  $R=0.29$  eine geringere Rauigkeit des Stimulus Nr. 15. Die in Abschnitt 4.4 vorgestellte Impulshaltigkeit zeigt dagegen mit  $I=0.07$  und  $I=0.11$  eine höhere Impulshaltigkeit beim Stimulus Nr. 15. Da die Versuchspersonen explizit nach der "Lästigkeit des Nagelgeräusches" gefragt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Konzentration eher bei der Bewertung der einzeln erkennbaren Impulse lag. An dieser Stelle kann hinterfragt werden, inwieweit eine Trennung der einzelnen Lästigkeitsparameter in einzelne Werte Sinn macht. In Bezug auf zukünftige Weiterentwicklungen des CKI könnten zwei Richtungen eingeschlagen werden: entweder man entfernt sich bewusst weiter vom Rauigkeitsmodell, um beide Parameter getrennt voneinander bewerten zu können (eine stärkere Einbeziehung der Impulshaltigkeit wäre die logische Konsequenz), oder man versucht, die Gesamt-Lästigkeit zu bewerten, was eine genaue Abstimmung der beiden Parameter Rauigkeit und Impulshaltigkeit bei verschiedenen Betriebszustände, Drehzahlen und Lautheiten erfordert.

## 5.6 Differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle

Die Auswertung der differentiellen Wahrnehmbarkeitsschwelle (engl. Just Noticeable Difference JND) des CKI ist anhand des verfügbaren Datensatzes nur begrenzt möglich, da die Unterschiede des mittleren CKI-Wertes zwischen den Aufnahmen nicht in einer beliebig kleinen Schrittweite vorliegen und zudem zu hohen CKI-Werten größer werden. Um den perzeptiven Verlauf der JND zu erfassen, wäre ein in Bezug auf die mittleren CKI-Werte wesentlich feiner und gleichmäßiger abgestufter Datensatz notwendig. Um zumindest zu diskreten CKI-Werten eine statistisch gesicherte Unterscheidbarkeit zu ermitteln, wurde zunächst für alle Stimulipaare der Zweistichproben-t-Test mit einem Signifikanzniveau von  $p=0.05$  durchgeführt. Anschließend wurde zu jedem Stimulus der CKI-Wert und die jeweils

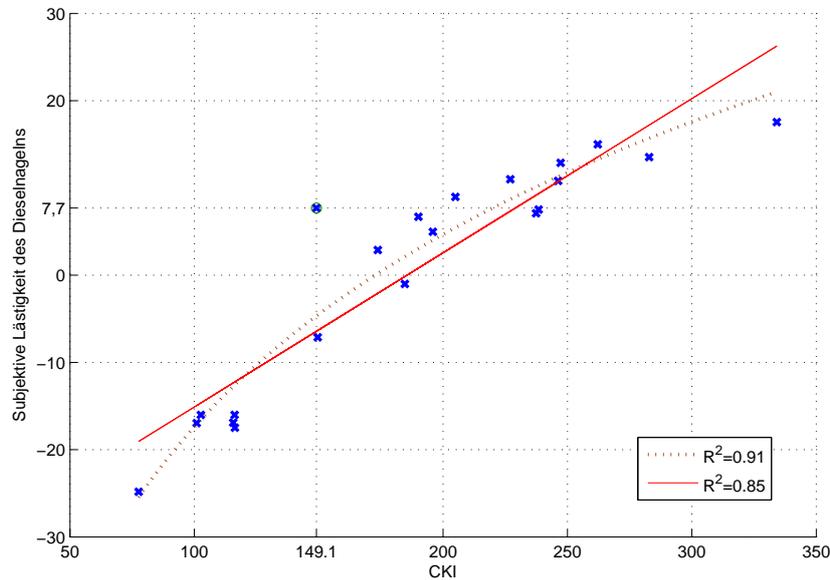


**Abbildung 5.5:** Statistisch gesicherte Unterscheidbarkeit des CKI-Wertes anhand der subjektiv beurteilten Stimuli.

kleinste CKI-Differenz zu einem nach den t-Test-Ergebnissen signifikant unterschiedlich bewerteten Stimulus gesucht. Das Ergebnis ist in [Abbildung 5.5](#) zu sehen. Abgesehen vom Ausreißer Stimulus Nr. 15 liegen die berechneten Werte zwischen 8,9 und 61,6. Der Medianwert liegt bei 33,3. Der Anstieg der statistisch gesicherten Unterscheidbarkeit zu hohen CKI-Werten ist der bereits erwähnten begrenzten Auswahl an Stimuli geschuldet und sollte anhand der vorliegenden Daten nicht als Anstieg der differentiellen Wahrnehmungsschwelle bei starker Nagelgeräuschausprägung fehlinterpretiert werden. Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen dieser Untersuchung festgehalten werden, dass CKI-Unterschiede von bis zu 8,9 durchaus wahrnehmbar sind. Eine Tendenz des perceptiven Verlaufes der differentiellen Wahrnehmungsschwelle kann aus den vorliegenden Daten nicht ermittelt werden.

## 5.7 Regressionsanalyse

[Abbildung 5.6](#) zeigt die Regression des CKI-Algorithmus mit den subjektiven Beurteilungen des Dieselnagelns. Bei der Annahme des einfachen linearen Regressionsmodells wird ein Bestimmtheitsmaß von 85% erreicht, welches sich durch die Annahme eines logarithmischen Zusammenhangs auf 91% erhöht. Demnach liefert der CKI bei Geräuschen mit geringer oder sehr starker



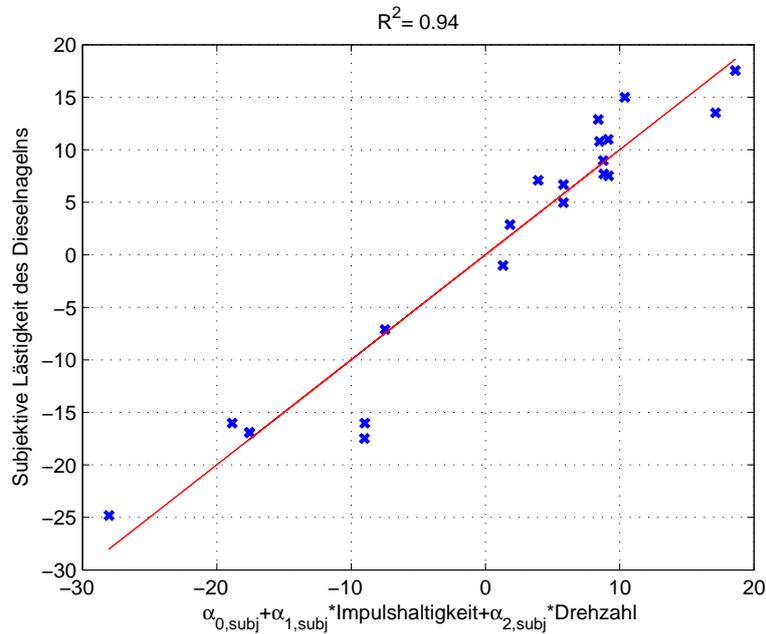
**Abbildung 5.6:** Vergleich lineare und logarithmische Regression der subjektiven Beurteilungen mit dem CKI. Ausreißer bei 150/35 umrandet.

Nagelausprägung tendenziell zu hohe Werte, bei Geräuschen mit mittlerer Nagelausprägung ist der CKI-Wert tendenziell zu niedrig im Vergleich zur Hörwahrnehmung.

Auf Grund der guten Regression des in Abschnitt 4.5 vorgestellten kombinierten Wertes aus Impulshaltigkeit und Motordrehzahl mit dem CKI wurde dieser Wert  $\tilde{CKI}$  ebenfalls auf seine Korrelation mit den subjektiven Bewertungen untersucht. In Kapitel 4 wurden die Koeffizienten des Wertes basierend auf der Annahme ermittelt, dass der CKI die subjektiven Ergebnisse optimal vorhersagt. Da jedoch mit einem Bestimmtheitsmaß von 85% keine perfekte Linearität zwischen CKI und subjektiven Daten vorliegt, wurden die Variablen  $\alpha_0$  bis  $\alpha_2$  auf der Basis der subjektiven Daten neu berechnet. Daraus ergaben sich folgende Koeffizienten für die Rohdaten (nicht studentisiert):

$$\alpha_{0,subj} = 38,56, \alpha_{1,subj} = 75,22 \text{ und } \alpha_{2,subj} = -0,01 \quad (5.2)$$

Setzt man diese neuen Werte in Formel 4.2 ein, ergibt sich die neue Berechnungsvorschrift für  $\tilde{CKI}$ . Die resultierende Regressionsgerade ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Die subjektiven Beurteilungen werden durch das neue Berechnungsmodell mit einem Bestimmtheitsmaß von 94% linear abgebildet. Somit kann aus den gewonnenen Daten zumindest bei der verwendeten Fra-



**Abbildung 5.7:** Regression von  $\tilde{CKI}$  mit auf Basis der subjektiven Daten ermittelten Koeffizienten.

gestellung nach der "Lästigkeit des Dieselnagelns" festgestellt werden, dass der jenseits des primären Forschungsziels gefundene Wert  $\tilde{CKI}$  eine bessere Korrelation mit den subjektiven Ergebnissen bietet als der  $CKI$ . Insbesondere fällt dabei in Abbildung 5.6 der Ausreißer bei (149,1/7,7) ins Auge, welcher genau dem im vorherigen Abschnitt bereits besprochenen Stimulus Nr. 15 entspricht. Dieser Ausreißer ist in Abbildung 5.7 verschwunden, was plausibel ist, da der Wert  $\tilde{CKI}$  deutlich näher am Modell der Impulshaltigkeit als am Modell der Rauigkeit ist.

Der Anteil der einzelnen Parameter Impulshaltigkeit und Motordrehzahl wurde nach dem in Abschnitt 4.5 beschriebenen Verfahren - Studentisierung des Datensatzes und Neuberechnung der Koeffizienten - mit 27% für die Impulshaltigkeit und 73% für die Motordrehzahl berechnet. Demnach kann festgehalten werden, dass nach den Erkenntnissen der vorliegenden Daten der Abstand der Impulse entscheidender für die Wahrnehmung der Lästigkeit des Nagelns ist als die Intensität der Impulse.

## Kapitel 6

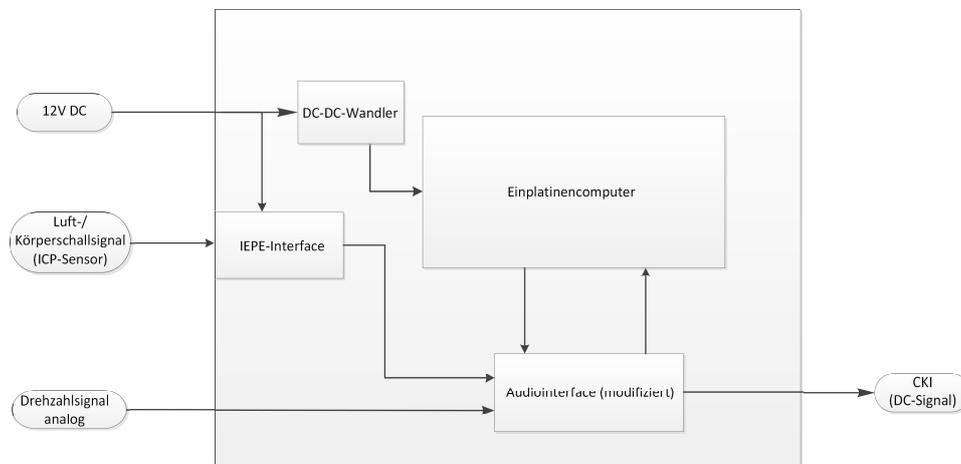
# Hardwareumsetzung einer CKI-Messbox

Bei akustischen Messungen am Fahrzeug besteht auch bei Verwendung modernster Hardware häufig das Problem, dass sehr große Datenmengen nicht rechtzeitig bearbeitet werden können. Um bei einer Echtzeit-Umsetzung des CKI den Messcomputer zu entlasten, war es bei der vorliegenden Arbeit gewünscht, bei der Optimierung des Algorithmus auch die nachfolgende Realisierung einer Hardware-Messbox zu berücksichtigen, welche als Eingangssignal das Luft- bzw. Körperschallsignal von bestehenden ICP-Sensoren sowie das Drehzahlsignal von Induktionsgebern entgegennimmt und den CKI am Ausgang in einer von der Software INCA (Firma ETAS) lesbaren Form ausgibt. Dazu wäre zum Einen ein Gleichspannungssignal geeignet, alternativ wäre auch eine Wertausgabe über das XCP<sup>1</sup>-Protokoll (CAN<sup>2</sup>, USB oder LAN) möglich. Da mit der grafischen Programmierumgebung „pure data“ (pd) ein sehr praktikables Interface zwischen C-basierten Berechnungen und Audio-Hardware existiert, wurde im Rahmen der Masterarbeit ein pd-Objekt geschrieben, welches in zwei Eingangskanälen das Audio- und das Drehzahlsignal sowie den Kalibrierwert entgegennimmt und am Ausgang den CKI ausgibt. Dieser kann anschließend beliebig weiterverarbeitet werden, im Rahmen der Masterarbeit wurde dies jedoch auf die Anzeige am Computerbildschirm mit Hilfe der Grafik-Erweiterung „gem“ beschränkt. Durch das Vorliegen eines C-Codes und die Integration in pd wurde ein hohes Maß an Flexibilität erreicht, welches erlaubt, den Algorithmus plattformunabhängig in einer Vielzahl von Anwendungen einzusetzen. Denkbar wäre eine Umsetzung auf einem Einplatinencomputer mit einem USB-Audiointerface oder eine Implementierung auf einem geeigneten Mikroprozessor. Probleme bei

---

<sup>1</sup>Das XCP-Protokoll ist ein Netzwerk-Protokoll zur Übertragung von Mess- und Kalibrierdaten und kann auf den Transportschichten CAN, Sxi, Ethernet USB oder FlexRay übertragen werden.[36]

<sup>2</sup>Der CAN-Bus (Controller Area Network) ist ein serielles Bussystem, welches vor Allem in der Automobilindustrie zur Datenübertragung sehr verbreitet ist.[27]



**Abbildung 6.1:** Blockschaltbild eines möglichen Hardware-Prototyps zur Berechnung des CKI.

der ersten Variante ergeben sich im Hinblick auf die Messhardware, da sowohl Eingangskanäle per ICP, als auch Gleichspannungssignale am Ausgang nicht die Domäne von gängigen Audiointerfaces sind. Es wäre somit eine Zusatzplatine erforderlich, welche die Spannungsversorgung für den ICP-Sensor zur Verfügung stellt und das Audiosignal als Line-Pegel ausgibt. Um Gleichspannung ausgeben zu können, müssen zumeist die Koppelkondensatoren am Ausgang des verwendeten Audiointerfaces entfernt werden. Zusätzlich ergibt sich bei Einplatinen-Computern, welche fast immer auf der ARM-Prozessor-Architektur basieren, eine zwingende Notwendigkeit der Linux-Kompatibilität. In dieser Hinsicht sind eher günstige Interfaces meist besser geeignet als hochwertigere Geräte, da bei ersteren meist unmodifizierte Standardchips zum Einsatz kommen, die von Linux problemlos erkannt werden. Sollte die Ausgabe über das XCP-Protokoll gewählt werden, so sollte dies bereits bei der Auswahl des Einplatinen-Computers berücksichtigt werden, da die Schnittstellenauswahl hier sehr unterschiedlich ist und es beispielsweise auch Boards mit integriertem CAN-Controller am Markt gibt. Abbildung 6.1 zeigt das Blockschaltbild eines möglichen Hardware-Prototyps zur Echtzeit-Berechnung des CKI mit Hilfe eines Einplatinen-Computers.

## Kapitel 7

# Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Reduzierung des Berechnungsaufwandes des bestehenden CKI-Algorithmus auf Echtzeitfähigkeit. Dabei war eine grobe Zielvorgabe von Faktor 10 vorgegeben, welche mit dem erreichten Faktor 12 erreicht und übertroffen wurde. Die zweite Zielvorgabe einer "annähernd gleichbleibenden Genauigkeit" konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 99\%$  bei der linearen Regression des alten mit dem neuen CKI sowie einem oberen Quartil von 2,3% der relativen Messabweichung ebenfalls sehr gut eingehalten werden. Über die Zielvorgabe hinaus wurde der CKI-Algorithmus detailliert auf seine Einflussparameter untersucht. Dabei wurden die Haupteinflüsse Impulshaltigkeit und Motordrehzahl ermittelt und mittels des multiplen linearen Regressionsmodells zu einem neuen Einzahlwert  $\check{C}KI$  kombiniert. Zur subjektiven Evaluierung der Werte  $CKI_{alt}$ ,  $CKI_{neu}$  und  $\check{C}KI$  wurden informelle Hörtests durchgeführt und anhand statistischer Auswertungen gezeigt, dass der neue Wert  $\check{C}KI$  von den drei Werten die beste Korrelation mit den subjektiven Bewertungen aufweist. Die Art der Fragestellung wurde dabei kritisch beleuchtet und auf die Beziehung des Impulsgeräusches zur Rauigkeitsempfindung hingewiesen. Bei der Gesamtlästigkeit wäre demnach in weiteren Studien zu untersuchen, inwieweit diese bei welchen Motorzuständen mehr von der Rauigkeitsempfindung oder mehr von der Impulshaltigkeitsempfindung dominiert wird. Eine Umsetzung des Algorithmus in Echtzeit wurde in der Programmierumgebung pure data (pd) auf einem gewöhnlichen Windows-Notebook implementiert. Dabei wurde auf die Unterschiede zwischen Mess-Hardware des Automotive-Bereichs und Audio-Hardware hingewiesen und Möglichkeiten vorgeschlagen, die Echtzeit-Umsetzung in einer kostengünstigen "Black-Box"-Lösung zu realisieren. Sollte die Übereinstimmung mit dem bereits vermarkteten CKI-Wert nicht oberste Priorität haben, wäre jedoch auch eine Umsetzung des neu vorgeschlagenen Wertes  $\check{C}KI$  eine Alternative zum bisherigen Algo-

rithmus, da dieser nach den Erkenntnissen dieser Arbeit besser zur subjektiven Empfindung des "Dieselnagelns" passt und zudem deutlich recheneffizienter ist. Hier wäre bei einer Umsetzung noch zu prüfen, inwieweit die beim CKI durchgeführte Reduzierung der Frequenzbänder den Ausgabewert beeinflusst.

# Anhang A

## Bedienung der neu entwickelten CKI-Software

### A.1 MATLAB-Script

Grundsätzlich ist aus Performance-Gründen die Verwendung der .MEX-Funktionen zur Berechnung des CKI vorzuziehen. Dazu wird in MATLAB die Datei *CKI\_2014.m* gestartet. Es öffnet sich eine Dialogbox zur Auswahl der Audiodateien, welche ausgewertet werden sollen (Abbildung A.1). Dabei sollte das Motorsignal auf dem LSB der Audiodatei als Pulssignal vorhanden sein. Soll der Kalibrierwert gegenüber dem Standardwert (3663.57) verän-

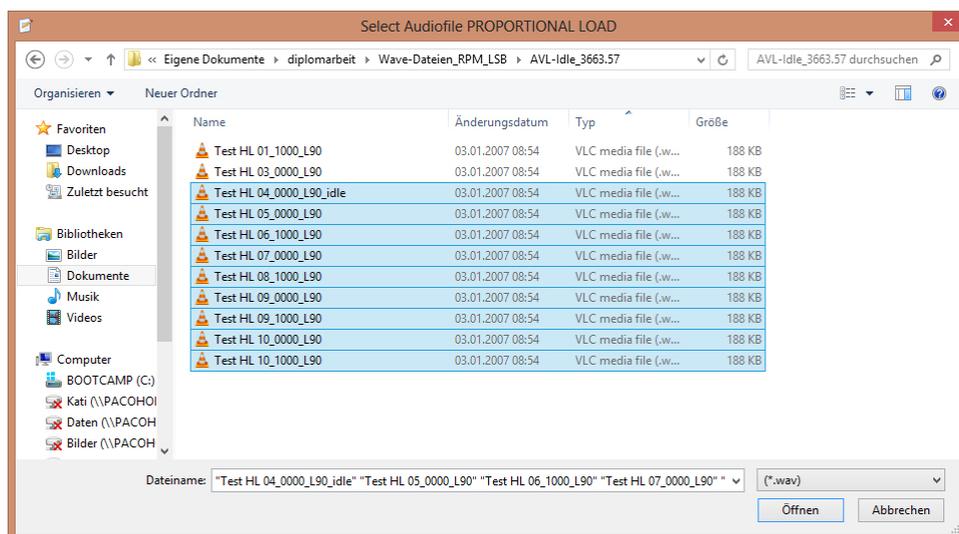


Abbildung A.1: Dialogbox zur Auswahl der Audiodateien

```
>> CKI_2014
fx Define Calibration Factor [Digits/Pa]:
```

Abbildung A.2: Eingabe des Kalibrierfaktors

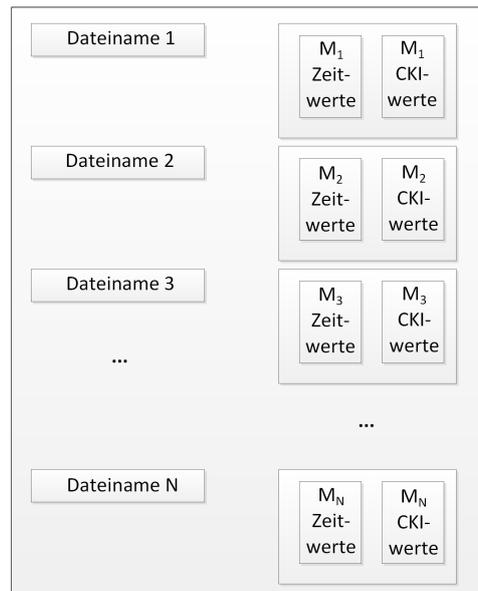


Abbildung A.3: Struktur der Ausgangsmatrix

dert werden, kann er im Folgenden eingegeben werden (Abbildung A.2). Der Kalibrierwert sollte für alle auszuwertenden Dateien identisch sein. Soll der Standardwert verwendet werden, kann hier einfach mit Enter bestätigt werden. In einer zweiten Dialogbox wird die *.mat*-Datei zur Speicherung der Ergebnisse ausgewählt. Anschließend wird der CKI-Verlauf über alle ausgewählten Dateien berechnet und als  $N \times 2$  Zelle in der *.mat*-Datei gespeichert.  $N$  entspricht dabei der Anzahl der ausgewählten Audiodateien. In der linken Spalte stehen die Dateinamen, in der rechten Spalte steht das  $M \times 2$  Array der jeweiligen Audiodatei.  $M$  ist dabei die Anzahl der CKI-Werte, die zwei Spalten sind für die Zeitachse und die CKI-Werte. Abbildung A.3 verdeutlicht die Struktur der Ausgangsmatrix. Wenn das Betriebssystem keine 64 Bit Architektur aufweist oder Fehlermeldungen auftreten sollten, gibt es die Möglichkeit, anstatt der *.MEX*-Funktionen die nativen *MATLAB*-Funktionen einzusetzen. Dazu müssen zwei Zeilen im Skript *CKI\_2014.m* geändert werden:

Zeile 47:

```
MAINVAR=includevariables_mex(fs);
```

wird zu

```
MAINVAR=includevariables(fs);
```

Zeile 63:

```
[meany(ij),MAINVAR]=CKIfunction_mex(y_b(:,ij),motor_b(:,ij),calibFactor,
    MAINVAR);
```

wird zu

```
[meany(ij),MAINVAR]=CKIfunction(y_b(:,ij),motor_b(:,ij),calibFactor,
    MAINVAR);
```

## A.2 Pure Data (pd)-Objekt

Das pd-Objekt wurde unter pd-vanilla getestet. Dementsprechend wird die Installation der vanilla-Distribution empfohlen (<http://puredata.info/downloads/pure-data>). Zusätzlich muss zur grafischen Anzeige die Erweiterung gem installiert werden (<http://puredata.info/downloads/gem>). Gestartet wird das CKI-Tool anschließend mit der Batch-Datei *runckitool.bat*. Wurde pd nicht im Standardverzeichnis "C:\pd" installiert, muss der Dateipfad entsprechend angepasst werden. Wurde pd beispielsweise in "C:\myfolder\pure data" installiert, ändert sich die Datei *runckitool.bat* von

```
"c:\pd\bin\pd.com" -nosound -lib Gem -stderr ckipatch.pd > log 2>&1
```

zu

```
"c:\myfolder\pure data\bin\pd.com" -nosound -lib Gem -stderr ckipatch.pd
> log 2>&1
```

Wurde pd ordnungsgemäß gestartet, müssen noch die Audioeinstellungen unter "Media - Audio Settings" konfiguriert werden. Es sollten die zwei Eingangskanäle so gewählt werden, dass am linken Kanal das Audiosignal und am rechten Kanal das Motorpulssignal anliegt. Es wird eine Samplingrate von 48 kHz empfohlen. Die CKI-Werte werden während der Messung in einer log-Datei mitgeschrieben. Diese wird jedoch mit jedem Start von pd überschrieben. Abbildung A.4 und A.5 zeigen die innere Struktur des pd-Objektes und die CKI-Anzeige in gem.

## A.3 Sonstige Verwendung des C-Codes

Bei anderweitiger Verwendung des C-Codes müssen folgende Header-Dateien mit eingebunden werden, da diese beispielsweise die Strukturdefinition der Hauptvariable *MAINVAR* liefern:

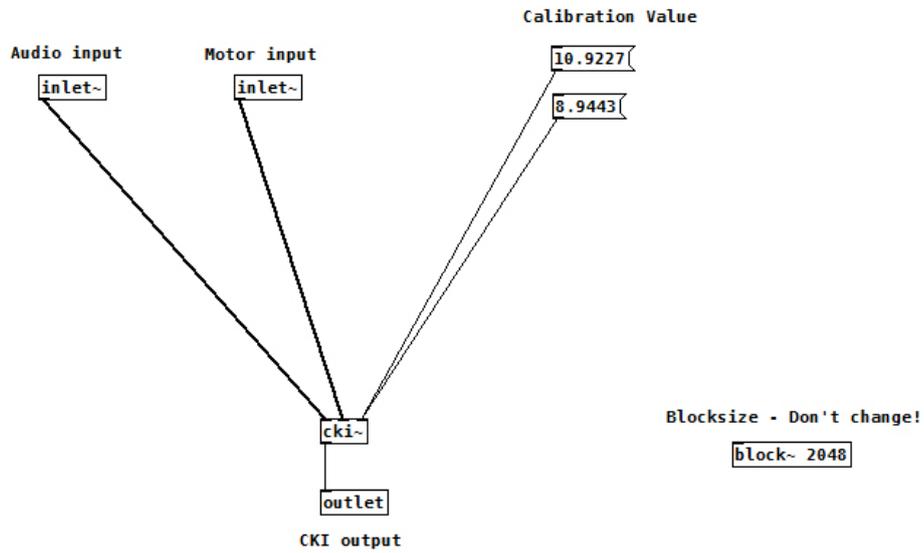


Abbildung A.4: pd-patch zum CKI-Objekt. Der Kalibrierwert kann über die Message-Box unter "Calibration Value" geändert werden.

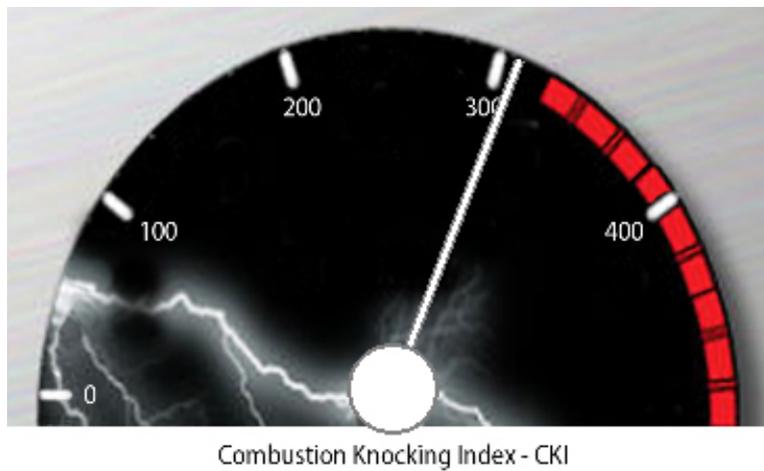


Abbildung A.5: CKI-Anzeige in gem.

```
#include testccode_emxutil.h
#include includevariables.h
#include CKIfunction.h
#include rt_nonfinite.h
```

Zu Beginn sollte außerdem einmal die Funktion *includevariables.c* ausgeführt werden:

```
includevariables(fs,&MAINVAR)
```

Diese legt die meisten zur Laufzeit benötigte Variablen in der Struktur *MAINVAR* an und benötigt als Eingangsargument die Samplingrate *fs*. Die eigentliche Berechnung des CKI erfolgt dann durch die Funktion *CKIfunction.c*. Als Übergabeargumente werden hier der Kalibrierfaktor *calibFactor*, die Struktur *MAINVAR* sowie das Audio- und Motorsignal erwartet. Diese sollten in Blöcken von 2048 Samples vorliegen. Als Rückgabeargument wird der CKI für den jeweiligen Audioblock geliefert. Da durch die in Abschnitt 3.4 erklärte Struktur immer 7 mal der selbe Wert geliefert und eine gewisse Zeit (genau 15 Blöcke) zum Einschwingen des Systems benötigt wird, sollte durch einen äußeren Programmcode nur jeder siebte Wert verwendet werden. Der erste zu verwendende Wert ist der 15. Ausgangswert. Dies kann durch folgenden Programmcode gelöst werden:

```
cki=CKIfunction(inAudio,inMotor,calibFactor, &MAINVAR);
k++;
if (k==15){
    ckiout=cki;
    k=8;
};
```

Die Latenz *L* des Algorithmus berechnet sich zu:

$$L = \frac{15 * 2048 - 7168}{f_s} \quad (\text{A.1})$$

Werden genaue Zeitwerte benötigt, so sollte dieser Latenzwert von den Zeitwerten abgezogen werden. Die Zeitachse der CKI-Werte berechnet sich demnach zu:

$$x[n] = \frac{1024 + 2048 * n}{f_s} - L \quad (\text{A.2})$$

## Anhang B

# Liste der verwendeten Audioaufnahmen

Tabelle B.1 beinhaltet alle in Kapitel 4 und 5 verwendeten Audioaufnahmen. Die Nomenklatur der Dateien setzt sich aus Fahrzeugnummer, mittlerer Drehzahl und mittlerer Lautheit in Sone zusammen (Beispiel: '07\_2500\_N81.wav' ist eine Motoraufnahme von Fahrzeug Nr. 7, mittlere Drehzahl 2500 U/min, mittlere Lautheit 81 Sone). Weiterhin wurde in Kapitel 2 und 3 ein Motorhochlauf ('MT1012\_V1\_CoDriver\_TA20\_20mg\_TW25\_1\_pp.wav') verwendet.

**Tabelle B.1:** Für den Hörversuch verwendete Stimuli.

Index	Dateiname	Dateiname der lautheitsveränderten Aufnahme
1	'02_1500_N81.wav'	
2	'02_2500_N81.wav'	'02_2500_N44.wav'
3	'02_3500_N81.wav'	
4	'02_4500_N81.wav'	'02_4500_N92.wav'
5	'04_0000_N81.wav'	'04_0000_N24.wav'
6	'04_1500_N81.wav'	
7	'04_2500_N81.wav'	
8	'04_3500_N81.wav'	
9	'07_1000_N81.wav'	
10	'07_1500_N81.wav'	'07_1500_N31.wav'
11	'07_2500_N81.wav'	
12	'07_3500_N81.wav'	'07_3500_N63.wav'
13	'01_1000_N81.wav'	
14	'03_0000_N81.wav'	
15	'05_0000_N81.wav'	
16	'06_1000_N81.wav'	
17	'07_0000_N81.wav'	
18	'08_1000_N81.wav'	
19	'09_0000_N81.wav'	
20	'09_1000_N81.wav'	
21	'10_1000_N81.wav'	

# Quellenverzeichnis

## Literatur

- [1] W. Aures. „Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse“. Doktorarbeit. München: Technische Universität, 1984.
- [2] G. Cerrato. „Automotive Sound Quality - Powertrain, Road and Wind Noise“. In: *Sound & Vibration* (2009).
- [3] P. Ch. u. a. *Berechnung der Geräuschqualität des Außenstandgeräusches Diesel angetriebener Fahrzeuge*. AG Technische Akustik, 2003.
- [4] H. Fastl und E. Zwicker. *Psychoacoustics*. 2007.
- [5] B. Graf u. a. „Objektive Parameter zur Bewertung der Motorgeräuschqualität“. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* (2013).
- [6] R. Heinrichs. „Verfahren und Vorrichtung zur quantitativen Analyse von Motorgeräuschen“. 03100787.5 (Köln). I. Ford Global Technologies. 26. März 2003.
- [7] K. Heldmann. *Wahrnehmung, gehörgerechte Analyse und Merkmalsextraktion technischer Schalle*. Düsseldorf: VDI, 1994.
- [8] R. Höldrich und M. Pflüger. *A Generalized Psychoacoustical Model of Modulation Parameters (Roughness) for Objective Vehicle Noise Quality Evaluation*. Graz: Society of Automotive Engineers, 1999.
- [9] M. Hussain u. a. *Statistical Evaluation of an Annoyance Index for Engine Noise Recordings*. Technical Paper. SAE, 1991.
- [10] R. McGill, J. W. Tukey und W. A. Larsen. „Variations of Box Plots“. In: *The American Statistician* (1978).
- [11] Normenausschuss Akustik. *Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen. DIN 45681*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Akustik, 1992.
- [12] A. Oppenheim und R. Schaffer. *Discrete-Time Signal Processing*. 1998.

- [13] W. Pannert, W. Kleppmann und B. Ziegler. *Untersuchungen zur Lästigkeit von Getriebegeräuschen*. HTW Aalen.
- [14] C. Patsouras u. a. *How far is the Sound Quality of a Diesel powered car away from that of a Gasoline powered one?* AG Technische Akustik, 2001.
- [15] C. Patsouras u. a. *Psychoacoustic sensation magnitudes and sound quality ratings of upper middle class cars' idling noise*. Institute for Human-Machine Communication, 2002.
- [16] M. Russel, S. Worley und C. Young. *Towards an Objective Estimate of the Subjective Reaction to Diesel Engine Noise*. Technical Paper. SAE, 1987.
- [17] P. Sellerbeck und C. Nettelbeck. *Improving Diesel Sound Quality on Engine Level and Vehicle Level - a Holistic Approach*. Technical Paper. SAE International, 2007.
- [18] A. Sontacchi und R. Höldrich. *CO<sub>2</sub>\_T02 Arbeitsbericht 6*. Graz: KUG-IEM, 2012.
- [19] R. Sottek, P. Vranken und G. Busch. *Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit*. Application Note. Köln: HEAD Acoustics, 1995.
- [20] S. Stevens, J. Volkmann und E. Newman. „A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch“. In: *Journal of the Acoustical Society of America* (1937).
- [21] *Studentisierung*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Studentisierung> (besucht am 05.06.2014).
- [22] E. Terhardt, G. Stoll und M. Seewann. „Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals“. In: *Journal of the Acoustical Society of America* (1982).
- [23] T. Thiede u. a. „PEAQ - The ITU Standard for Objective Measurements of Perceived Audio Quality“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 48 (), S. 3–29.
- [24] F. Zotter. „Unterdrückung hörbarer Störgeräusche in Echtzeit“. Diplomarbeit. KUG/IEM, 2004.
- [25] E. Zwicker, G. Flottorp und S. Stevens. „Critical Band Width in Loudness Summation“. In: *Journal of the Acoustical Society of America* (1957).

## Online-Quellen

- [26] *Analytisches Signal*. URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Analytisches\\_Signal](http://de.wikipedia.org/wiki/Analytisches_Signal) (besucht am 22.05.2014).

- [27] *Controller Area Network*. URL: [de.wikipedia.org/wiki/Controller\\_Area\\_Network](http://de.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network) (besucht am 14.05.2014).
- [28] *Diesel knock and combustion problems in diesel engines*. URL: <http://www.engineaustralia.com.au/~engine/sites/default/files/SB003.pdf> (besucht am 05.04.2014).
- [29] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. *Verordnung (EG) Nr. 715/2007*. 20. Juni 2007. URL: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2007.171.01.0001.01.DEU](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2007.171.01.0001.01.DEU) (besucht am 20.05.2014).
- [30] *Intra-Klassen-Korrelation*. URL: [www.de.wikipedia.org/wiki/Intra-Klassen-Korrelation](http://www.de.wikipedia.org/wiki/Intra-Klassen-Korrelation) (besucht am 04.06.2014).
- [31] *Kendalls Konkordanzkoeffizient*. URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Kendalls\\_Konkordanzkoeffizient](http://de.wikipedia.org/wiki/Kendalls_Konkordanzkoeffizient) (besucht am 03.05.2014).
- [32] *Lineare Regression*. URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Lineare\\_Regression](http://de.wikipedia.org/wiki/Lineare_Regression) (besucht am 29.04.2014).
- [33] *Messabweichung*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Messabweichung> (besucht am 11.05.2014).
- [34] *Shapiro-Wilk-Test*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Shapiro-Wilk-Test> (besucht am 03.05.2014).
- [35] *Time Domain Weighting, Dynamic Systems Laboratory Course Notes*. URL: <http://www.me.mtu.edu/courses/meem4701/course%20notes/time%20domain%20weighting.pdf>.
- [36] *XCP (Protocol)*. URL: [en.wikipedia.org/wiki/XCP\\_\(Protocol\)](http://en.wikipedia.org/wiki/XCP_(Protocol)) (besucht am 14.05.2014).