

Inhalt

1. PROJEKTBESCHREIBUNG	2
2. KONZEPT	2
3. MESSUNG	3
3.1 Messaufbau	3
3.1.1 Messinstrumente	3
3.1.2 Messort	3
3.1.3 Äußere Bedingungen	3
3.2 Messverfahren	4
4. AUFNAHME	4
4.1 Aufnahmevorgang	4
4.2 Probleme bei der Aufzeichnung und Wiedergabe	5
4.2.1 Verkehrsbedingte Probleme	5
4.2.2 Geringfügige Steigung bzw. Gefälle der Teststrecke	5
4.2.3 Kompatibilität der Aufnahmegeräte	6
4.2.4 Windgeräusche bei der Wiedergabe	6
4.2.5 Unterschiedliche Analysequalität zwischen Otto und Diesel PKW	6
5. ANALYSE	7
5.1 Strukturplan des Analyseprogramms	7
5.2 Erläuterung des Analyseprogramms	8
5.3 Erörterung eines typischen Drehzahlverlaufes	11
5.4 Grenzen des Analyseprogramms	11
6. ANLAGEN	13

1. Projektbeschreibung

Es sollen für je 1 Otto- und 3 Diesel-PKW die Innengeräusche für den 2., 3. und 4. Gang für verschiedene Betriebszustände (Konstantfahrt, Vollast, mehrere Teillastbereich, Schubetrieb, Teilschubetrieb) sowohl mit einem Messmikrophon als auch in Binauraltechnik aufgenommen und dokumentiert werden.

Für alle Einzelaufnahmen soll der Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsverlauf analysiert, und gemeinsam mit dem jeweiligen Betriebszustand in einer Datenbank zusammen gestellt werden. Diese Datenbasis (Betriebszustände, Geschwindigkeitsverläufe und Geräuschaufnahmen) stellt die Grundlage für ein Klangmorphing auf Samplerbasis dar.

2. Konzept

Ausgegangen wird von folgendem Diagramm.

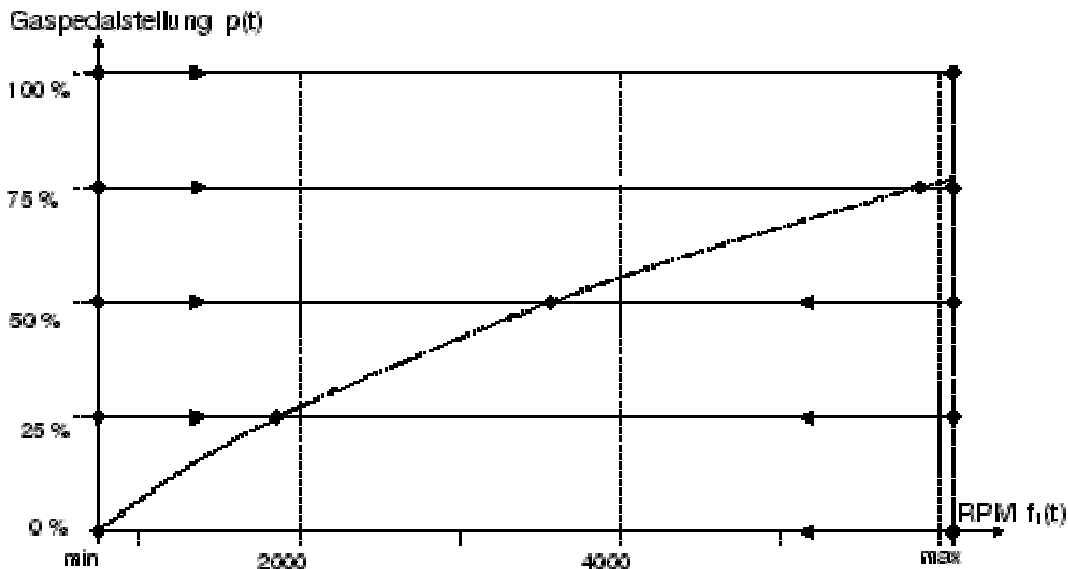


Diagramm 1: Lastzustandsmodell

Nutzbarer Drehzahlbereich wird in 4 Teilstücke geteilt.

- 1.) 0% (Leerlaufdrehzahl) - 25% des Gaspedalweges*
- 2.) 25% des Gaspedalweges - 50% des Gaspedalweges
- 3.) 50% des Gaspedalweges - 75% des Gaspedalweges
- 4.) 75% des Gaspedalweges - 100% des Gaspedalweges **

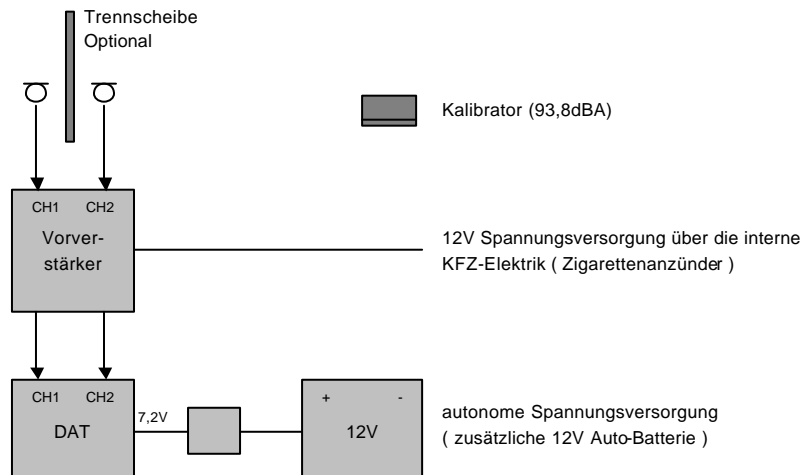
* Gaspedalweg mechanisch auf 25% begrenzt

** ohne Gaspedalweg-Fixierung (voller Gaspedalweg)

Um das obige Diagramm vollständig abzubilden sind die in Tabelle 1 (siehe Kapitel 4.) dargestellten Aufnahmen notwendig.

3. Messung

3.1 Messaufbau



Anmerkungen 1:

Um größtmögliche Betriebssicherheit der Mess- und Aufnahmegeräte zu gewährleisten, war es ursprünglich geplant, Vorverstärker und DAT-Gerät mit der autonomen Spannungsversorgung zu betreiben. Dies führte allerdings zu einer nicht lösbaren Potentialverschiebung, hervorgerufen durch die Masseverbindungen der beiden Stereo-Kanäle, welches sich in einem deutlich hörbaren Brumm auf der Aufnahme äußerte. Erst durch getrennte Spannungsversorgung konnte dieses Problem gelöst werden.

3.1.1 Messinstrumente

Geräteliste:

Stück	Gerät	Typ	bezogen von
1	Schallpegelmesser	L & D 2900A KI 0,7	Joanneum
2	Vorverstärker	L & D PRM 900B	Joanneum
2	Kugelkapsel	L & D 2541	Joanneum
1	Kalibrator	Rion NC-73/M91	Joanneum
1	DAT	Tascam PS – D1	IEM
1	Halterung		Joanneum
1	OSS Scheibe		Joanneum
1	Spannungsversorgung		
	div. Kleinmaterial		IEM
1	Gaspedalweg-Fixierung		Privat

3.1.2 Messort

Die Aufnahmen wurden im Autobahnteilstück zwischen Deutschfeistritz und Übelbach durchgeführt.

3.1.3 Äußere Bedingungen

Voraussetzungen dafür waren trockene Fahrbahn, Windstille, und wenig Straßenverkehr, um die Aufnahmen möglichst störungsfrei zu realisieren.

3.2 Messverfahren

Zur Aufnahme in „normal Stereo“ wurden beide Messmikrofone im Abstand von 16 cm in Kopfhöhe mit Hilfe der Mikrofonhalterung am Beifahrersitz angebracht. (siehe Abb.12. und 13.)

Die gleiche Messanordnung mit dazwischen angebrachter Trennscheibe wurde verwendet, um die Aufnahme in Binauraltechnik (siehe Abb.11.a und 11.b) zu erhalten.

Um den Pegel später originalgetreu wiedergeben zu können, wurden alle Aufnahmen kalibriert. Der Kalibratermesston wurde bei jeder Messung aufgezeichnet. (z.B. audi_ref_li.wav, audi_ref_re.wav)
Kalibriert: 93,8dBA

4. Aufnahme

4.1 Aufnahmevorgang

Es wurden für jeden Gang (2., 3. und 4.Gang) sowohl Lastbetrieb, Konstantfahrt und Schubbetrieb aufgenommen.

Mit Hilfe der mechanischen Gaspedalweg-Fixierung (Drehzahlbereich - Fixierung) war es möglich, die 4 Teilbereiche zu realisieren (siehe Abb.9. und 10.).

Bei der Aufnahme machte man sich den Vorteil zu nutze, dass mehrere Betriebszustände in einer Aufnahme realisiert werden konnten. Aus Tabelle 1 geht hervor, wie sich die Einzelaufnahmen aus den Betriebszuständen zusammensetzen.

	Aufnahme	Betriebszustände		
		Lastbetrieb	Konstantfahrt	Schubbetrieb
1.	02525*	025	25	
2.	05050*	050	50	
3.	07575*	075	75	
4.	01000*	0100	100	1000
5.	10025*			10025
6.	10050*			10050
7.	10075*			10075

* aufgesprochener Index 025

Tabelle 1: Einzelaufnahmen pro Gang, Fileindex

Das heißt, pro Gang ergaben sich 7 Einzelaufnahmen bzw. 12 Soundfiles. Dabei ist zu erwähnen, dass die Soundfiles akustisch geschnitten wurden. Nach der Analyse ist es aber auch möglich die Konstantfahrten (z.B. 75) aus den ungeschnittenen Files (z.B. 07575) zu bestimmen, um durch die größere Datenmenge verlässliche rpm Daten zu erhalten. Weiters wurden zur besseren Analysemöglichkeit neben den Soundfiles auch noch die Einzelaufnahmen archiviert (z.B. 02525, 01000).

Aufgenommen wurden 1 PKW mit Ottomotor, bzw. 3 PKW mit Dieselmotor.

PKW mit Dieselmotor: Audi A3 TDI Bj. 2000
VW Polo SDI Bj. 2000
Mercedes A1 CDI Bj. 2000

PKW mit Ottomotor: VW Beetle Bj. 2000

Jede Aufnahme wurde zweimal durchgeführt, um mögliche Störungen später auszublenden. Die Dauer einer Aufnahme betrug je nach Betriebszustand (Gang) zwischen 2-150 sec.

Die Gesamtanzahl der Einzelaufnahmen berechnet sich wie folgt:

Gesamtanzahl der Aufnahmen = 7(Aufnahmen) x 2(Wiederholungen) x 2(Aufnahmeverfahren) x 3(Gänge) x 4(PKW) = 336 Einzelaufnahmen vor Ort

Vor jeder Aufnahme wurde zur späteren Identifikation ein Index aufgesprochen welcher durch ein „Start“ bzw. „Stop“ eingegrenzt wurde.(siehe Tabelle 1: Aufnahme)

z.B. „ VW, drei, Null-Hundert-Null, s, a “

d.h. es handelte sich hier um eine Aufzeichnung am PKW VW Polo, im 3. Gang von 0 auf 100% Gaspedalweg und zurück (Lastbetrieb, Konstantfahrt, Schubbetrieb), in der Stereoanordnung und um die erste Aufnahme.

Auch die spätere Filekennzeichnung wurde nach diesem Schema vorgenommen.

Für dieses obige Beispiel lautet die Fileidentifikation somit „VW_3_01000_s_a“

Die Bedienung des DAT-Recorders erfolgte durch eine zweite Person vom Rücksitz aus (siehe Abb. 13). Bei allen Aufnahmen wurde eine exakte Indexliste geführt (siehe Beilage).

4.2 Probleme bei der Aufzeichnung und Wiedergabe

4.2.1 Verkehrsbedingte Probleme

Obwohl die Aufnahmen zu verkehrsarmen Zeiten durchgeführt wurden, war es sehr schwierig diese möglichst störungsfrei zu realisieren. Vor allem das Problem, während der Aufnahme nicht überholt bzw. selbst zum Überholenden zu werden, gestaltete sich schwierig. So mussten immer wieder Löcher im Verkehr abgewartet werden, in denen man bei langen Beschleunigungsphasen (Lastbetrieb) und langen Ausrollphasen (Schubbetrieb) nicht durch vorbeifahrende Autos gestört wurde. Umgekehrt wurde man bei Konstantfahrten im 4.Gang (z.B. Audi bei 4600 rpm = 175km/h!) sehr häufig zum Überholenden.

Wegen dieser Problematik mussten manche Aufnahmen zum Teil 5-6 mal aufgenommen bzw. neu begonnen werden. Dabei wurde auch auf die Möglichkeit eingegangen, dass es später möglich sein sollte, die oben erwähnten Störfaktoren auszublenden.

Bei geringen Pegeln (z. B. langen Ausrollphasen) kam noch hinzu, dass auch Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn hörbar wurden.

4.2.2 Geringfügige Steigung bzw. Gefälle der Teststrecke

Bereits bei den ersten Aufnahmeversuchen auf der Teststrecke zwischen Deutschfeistritz und Übelbach wurde klar, dass die Messergebnisse aufgrund einer geringen Steigung der Teststrecke nur brauchbar sind, wenn sie stets in die gleiche Richtung aufgenommen werden.

Es zeigte sich nämlich, dass besonders bei höheren Gängen mit niedriger Drehzahl (z.B. 4.Gang 025) der Lastbetrieb sowie der Schubbetrieb völlig unterschiedlich verliefen, je nachdem ob sie in Richtung Übelbach oder in Richtung Deutschfeistritz aufgenommen wurden. Die stationären Enddrehzahlen bei solchen Belastungsfällen unterschieden sich um bis zu 1500 rpm.

Die Aufnahmen wurden daher immer nur in die leicht steigende Richtung aufgenommen (Audi, Beetle). Die Aufnahmedauer erstreckte sich für einen PKW über einen gesamten Tag, wobei pro PKW zwischen 500 und 600 Kilometer zurückgelegt wurden.

4.2.3 Kompatibilität der Aufnahmegeräte

Beim Abhören der Aufnahmen im Studio des IEM fiel auf, dass das Audiomaterial einen überraschend großen, akustisch störenden Rauschanteil aufwies. Wie sich herausstellte wurde dies durch den Vorverstärker („range 130“) hervorgerufen.

Dieses Rauschen war über die Kopfhörerabhörung vor Ort, trotz oftmaligen probenhörens, nicht erkennbar. Zwar konnte das Rauschen durch Wahl des nächst niedrigeren Bereiches „range 120“ behoben werden (umschalten der Ausgangsstufe), allerdings wurde dadurch die Aussteuerung des DAT-Recorders extrem schwierig (Audi, Beetle).

4.2.4 Windgeräusche bei der Wiedergabe

Als weiteres Problem beim Abhören im Studio stellten sich die extrem tieffrequenten Signale heraus. Sie verursachen beim Abhören mittels Monitor große hörbare Windgeräusche der Bassreflexöffnung. Dies sollte auch beim Abhören mittels Kopfhörern und zusätzlichen Subwoofern beachten werden.

4.2.5 Unterschiedliche Analysequalität zwischen Otto und Diesel PKW

Der Schallpegel eines Diesel Motors ist bekannter weise bei niedriger Drehzahl höher, als der eines Otto Motors, wodurch die Analyse erleichtert werden sollte. Beim Hochlauf erzeugt der Diesel Motor aber mehrere störende Resonanzen, die in der Analyse gut sichtbar werden (Abb. 1.a). Bei hohen Geschwindigkeiten hingegen macht sich die stärkere Schalldämmung des Motors bemerkbar, wodurch die diskrete Motordrehzahl immer stärker durch Windgeräusche verdeckt wird.

Der Otto Motor hat zwar einen wesentlich niedrigeren Pegel bei Leerlaufdrehzahl, lässt sich aber durch die geringeren Resonanzen beim Hochlauf gut analysieren. Die schlechte Dämmung des Motors zeigt sich hier vor allem bei hohen Geschwindigkeiten. Der Schallpegel des Motors verdeckt dabei den Windgeräuschpegel.

An diese Stelle ist noch zu erwähnen, dass der Otto Motor bei maximaler Drehzahl im 4 Gang den höchsten Pegel des gesamten Feldes verursachte. (Audi, Beetle)

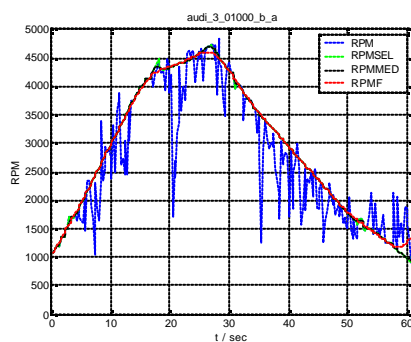


Abb. 1.a rpm Verlauf eines Dieselmotors

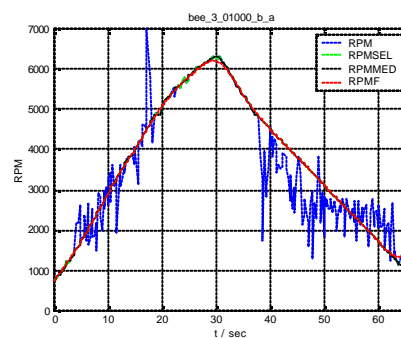


Abb. 1.b rpm Verlauf eines Ottomotors

5. Analyse

Zur Analyse der Einzelaufnahmen wurde der Drehzahl – bzw. Geschwindigkeitsverlauf mit Hilfe von Matlab analysiert.

Im Folgenden wird nun kurz auf das Analyseprogramm und die daraus bestimmten Drehzahlverläufe eingegangen.

5.1 Strukturplan des Analyseprogramms

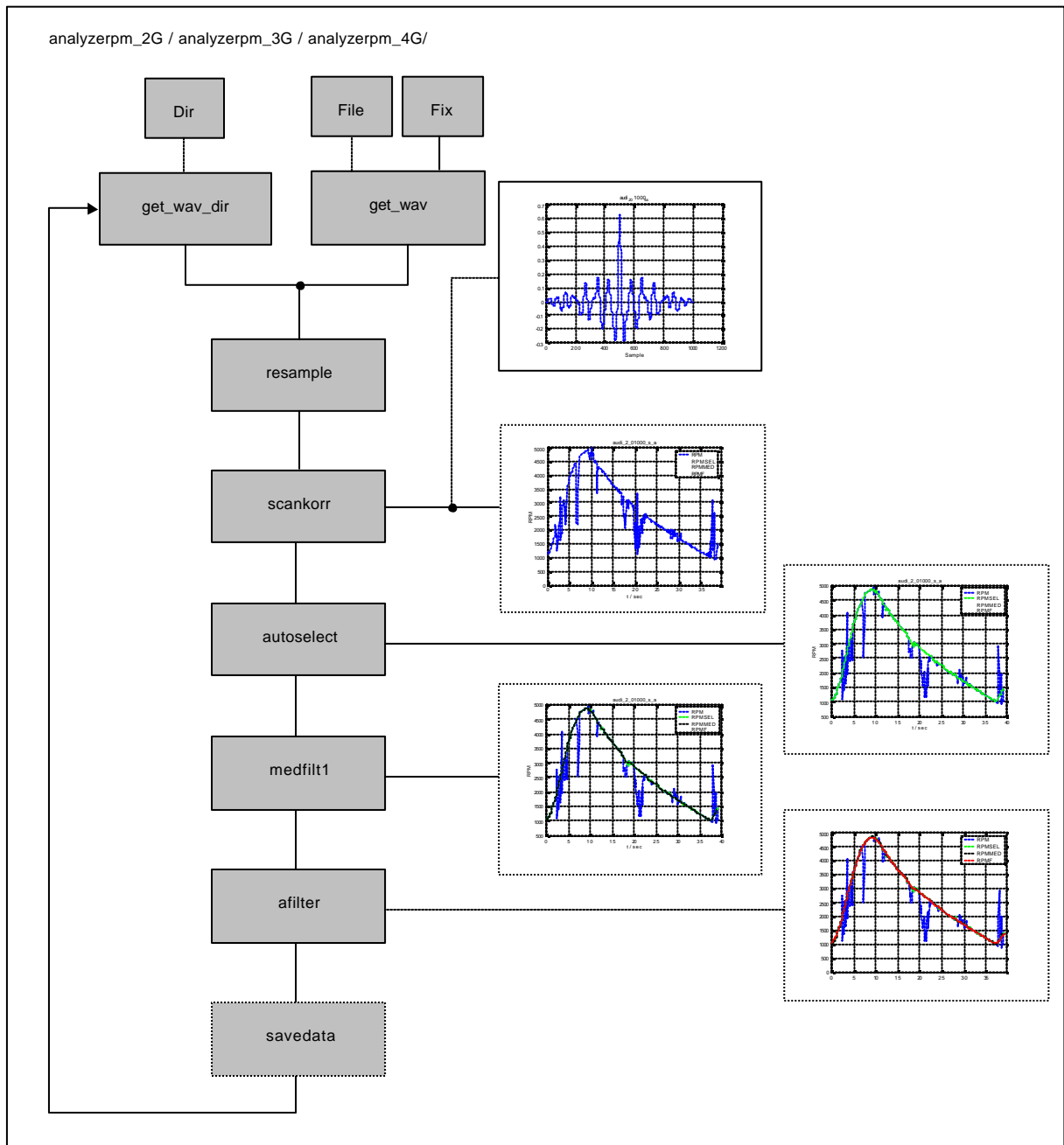


Abb.2. Strukturplan des Analyseprogramms

5.2 Erläuterung des Analyseprogramms

Es existiert für jeden Gang ein Hautprogramm, welches sich aber nur in den Parametern unterscheidet.

analyzer_2G:	analyzer_4G:	analyzer_4G:
ts = 8;	ts = 4;	ts = 4;
fs_dec = 2205;	fs_dec = 2205 ;	fs_dec = 2205 ;
drpm = 2500;	drpm = 2000;	drpm = 2000 ;
p = 10;	p = 15;	p = 20;
...

- **get_wav**

Zum Einlesen der Rohdaten. Es ist ein fixes Einlesen (Parametersuche), oder ein Einlesen per Mouse möglich.

- **get_wav_dir**

Hier ist ein Einlesen eines gesamten Verzeichnisses mittels Mouse möglich. Die in dem selektierten Verzeichnis beinhalteten Files, werden dabei automatisch abgearbeitet.

- **resample**

Die Rohdaten (fs = 44100Hz) werden auf fs = 2205Hz resampled.

- **scankorr**

Dabei werden laut Welch-Periodogramm Kurzzeitkorrelogramme mittels AKF berechnet und daraus die Fundamentale bestimmt. Die hop size beträgt dabei die Hälfte der window size.

D. h. mit einer hop size von z.B. $t = 125\text{ms}$ ($n = 8$) wird die Anzahl der Maxima in einem Kurzzeitkorrelogramm berechnet. Mit Hilfe der Anzahl der Maxima und der Position der 1. und N-ten Maxima ist es nun möglich, t und in weiterer Folge die Frequenz f bzw. die Drehzahl rpm zu bestimmen.

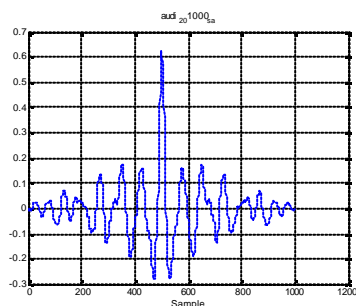


Abb. 3.a Korrelogramm bei 1400 rpm

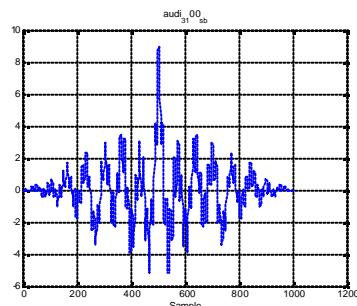


Abb. 3.b Korrelogramm bei 4600 rpm

Danach wird der zeitliche Drehzahlverlauf dargestellt.

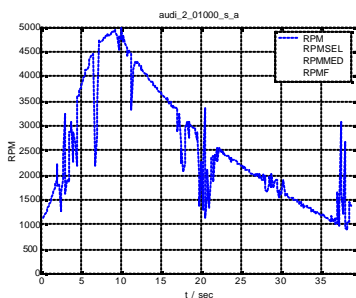


Abb. 4.a rpm; audi_2_01000_s_a

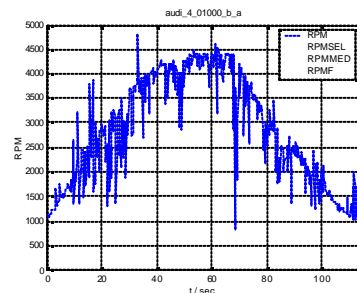


Abb. 4.b rpm; audi_4_01000_b_a

Hier kommt es zu Abweichungen von der typischen Drehzahl, welche in Kapitel 5.3 näher erörtert werden.

- autoselect

Ausgehend vom obigen Drehzahlverlauf, welcher sich nur aus den Rohdaten ergibt, muss nun der tatsächliche Drehzahlverlauf bestimmt werden. Dabei werden die realistischen Segmente im Drehzahlverlauf ausgefiltert und die dazwischen liegenden Segmente durch Linearisierung interpoliert. Der Algorithmus selektiert dabei Punkte, in deren Nähe weitere Punkte innerhalb eines definierten Bereiches liegen müssen (analyzer_2G: drpm = 2500).

Es ist aber zu erwähnen, dass vor allem beim Diesel Motor und bei hohen Geschwindigkeiten bzw. hohen Gängen die Rauschkomponente stark zunimmt und die diskrete Drehzahl immer stärker durch Windgeräusche verdeckt wird. Hierbei sind dem Algorithmus Grenzen gesetzt (siehe auch 4.2.5 und 5.4).

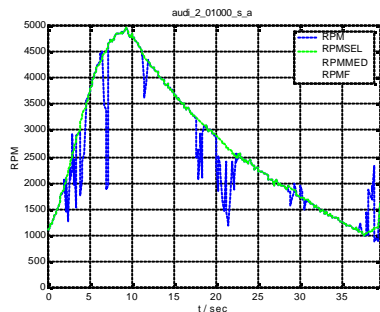


Abb. 5.a rpmsel; audi_2_01000_s_a

- medfilt1

Die erforderliche Glättung wird mittels Medianfilter vorgenommen, da er am Besten in der Lage ist die verbliebenen peaks auszufiltern.

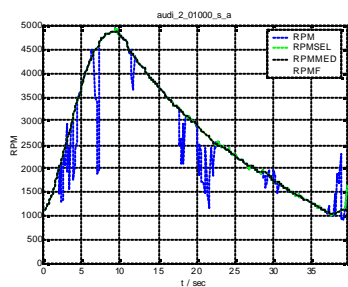


Abb. 6.a rpmmmed; audi_2_01000_s_a

- afilter

Die verbliebenen Rauigkeiten werden mit Hilfe eines moving average Filters geglättet. (p = 10 bei analyzer_2G)

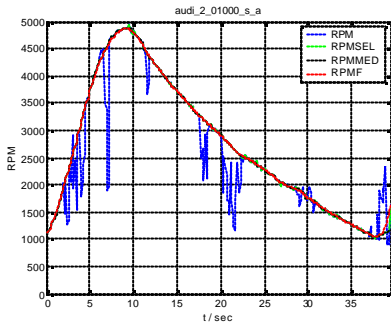


Abb. 7.a rpmf, audi_2_01000_s_a

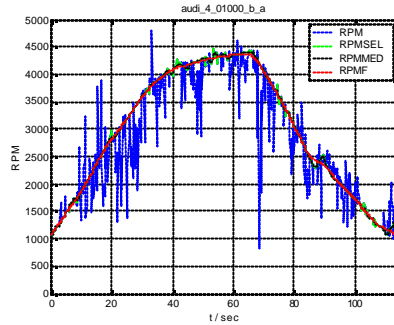


Abb. 7.b rpmf, audi_4_01000_s_a

- savedata

Die Daten werden als gleichnamige Textdatei im ASCII Format abgelegt. Um eine möglichst hohe Kompatibilität zu erzielen, wurde in der Textdatei auf einen header verzichtet.

Auszug der Textdatei (audi_2_01000_s_a.txt):

```

1.2267787e-001 1.1002079e+003 1.1002079e+003 1.1002079e+003 1.1002079e+003
2.4535574e-001 1.1025000e+003 1.1025000e+003 1.1025000e+003 1.1256780e+003
3.6803361e-001 1.1048017e+003 1.1048017e+003 1.1048017e+003 1.1520618e+003
4.9071148e-001 1.1188161e+003 1.1188161e+003 1.1188161e+003 1.1806379e+003
6.1338935e-001 1.1630769e+003 1.1630769e+003 1.1630769e+003 1.2123326e+003
7.3606722e-001 1.2174847e+003 1.2174847e+003 1.2174847e+003 1.2470596e+003
8.5874509e-001 1.2351660e+003 1.2351660e+003 1.2351660e+003 1.2846752e+003
. . . .

```

Zugehöriger header der obigen Textdatei:

```

          x          rpm          rpmsel          rpmmed          rpmf
1.2267787e-001 1.1002079e+003 1.1002079e+003 1.1002079e+003 1.1002079e+003
2.4535574e-001 1.1025000e+003 1.1025000e+003 1.1025000e+003 1.1256780e+003
3.6803361e-001 1.1048017e+003 1.1048017e+003 1.1048017e+003 1.1520618e+003
4.9071148e-001 1.1188161e+003 1.1188161e+003 1.1188161e+003 1.1806379e+003
6.1338935e-001 1.1630769e+003 1.1630769e+003 1.1630769e+003 1.2123326e+003
7.3606722e-001 1.2174847e+003 1.2174847e+003 1.2174847e+003 1.2470596e+003
8.5874509e-001 1.2351660e+003 1.2351660e+003 1.2351660e+003 1.2846752e+003
. . . .

```

```

x..... Zeitbasis
rpm..... Drehzahlverlauf nach der Berechnung mit Hilfe der AKF
rpmsel..... Drehzahlverlauf nach der Selektion bzw. Linearisierung
rpmmed..... Drehzahlverlauf nach der Medianfilterung
rpmf..... Drehzahlverlauf nach moving average Filterung

```

5.3 Erörterung eines typischen Drehzahlverlaufes

In Abb. 7. ist ein typischer Drehzahlverlauf dargestellt. In diesem Kapitel sollen Abweichungen von der typischen Drehzahl erörtert werden.

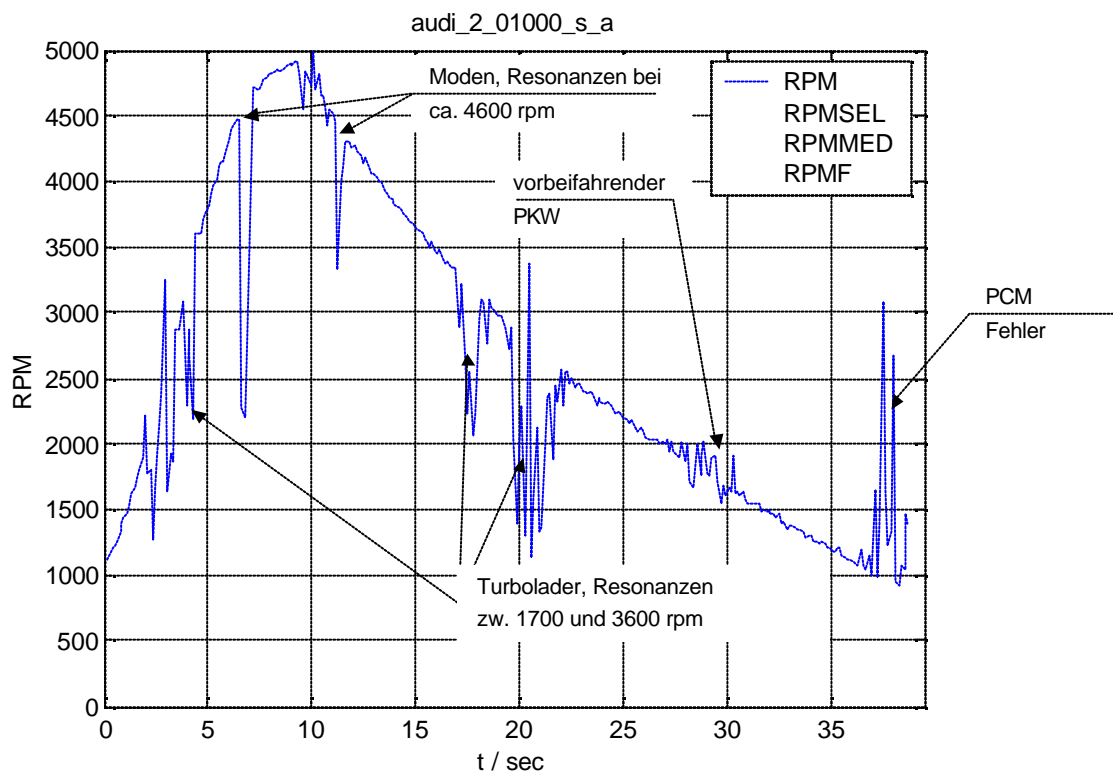


Abb. 8. Abweichungen vom typischen Drehzahl

Es ist in Abb. 7 zu erkennen, dass es zu unrealistischen Drehzahlveränderungen kommt, welche aber nicht durch den Algorithmus verursacht werden, sondern sich aus dem aktuellen Luftschall ergeben. Die Ursache liegt in der nicht störungsfreien Aufnahme bzw. im Auftreten von Resonanz- bzw. Rauschbändern. Diese Tatsache wurde auch mit anderen Analysemöglichkeiten (Cool, pd, Algorithmus von Christian Feldbauer) bestätigt.

Dafür sind u.a. 3 Gründe zu nennen:

- Motormoden bzw. Moden der Fahrgastinnenzelle (z.B. Diesel ca. 4.600rpm bzw. bei 2.500rpm)
- Vorbeifahrende PKW's (bei niedrigem Pegel auch vorbeifahrende PKW auf der Nebenfahrbahn detektiert)
- Bodenunebenheiten der Fahrbahn (u.a. Pannestreifen, Querrillen der Fahrbahn)

Eine Gegenüberstellung zwischen Matlab und pd Algorithmus ist in Abbildung 19 bzw. 20 zu sehen. Der unter pd programmierte Algorithmus liefert vor allem bei hohen Rauschanteilen gute Ergebnisse.

5.4 Grenzen des Analyseprogramms

Durch die in 5.3 beschriebenen Störungen des Luftschalles sind der Bestimmung der Drehzahl, Grenzen gesetzt. Insbesondere bei files in welchen die Drehzahl innerhalb er oben beschriebenen

Resonanz- bzw. Rauschbändern endet, ist die Drehzahlbestimmung schwierig. In solchen Fällen ist es dann nur möglich, durch das geschulte Auge die Drehzahl aus dem RPM Plot herauszulesen. Als weiterer Ansatzpunkt für eine verbesserte Analyse wäre sicherlich eine Kombination aus pd und Matlab erstrebenswert.

In der Industrie wird daher die Drehzahl mittels geeigneter Sensoren aufgezeichnet. Dafür werden meist Mehrkanalsysteme verwendet (z.B. Si++). Eine Ausnahme stellt hierbei die Firma Cortex dar, welche die Drehzahl mit einem Zweikanalsystem aufzeichnet. Dabei wird die Drehzahlinformation in das LSB geschrieben, wodurch sich natürlich der SNR verschlechtert, aber auch inkompatible Dateiformate erzeugt werden.

6. Anlagen



Abb. 9. Mechanische Gaspedalfixierung bei Audi A3



Abb. 10. Mechanische Gaspedalfixierung bei Mercedes A1



Abb. 11.a und Abb. 11.b Mikrofonaufbau zur Aufnahme in Binauraltechnik (mit Trennscheibe)



Abb. 12. Mikrofonaufbau zur Aufnahme in Stereotechnik. (ohne Trennscheibe)

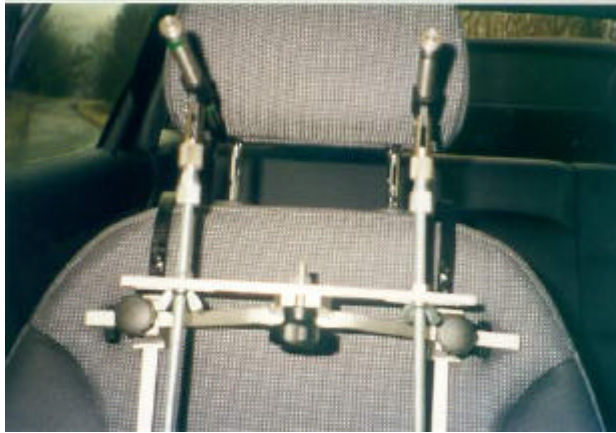


Abb. 13. Aufbau- und Halterung der Mikrofone zur Aufnahme in Stereotechnik



Abb. 14. Messgeräteaufbau auf dem Rücksitz

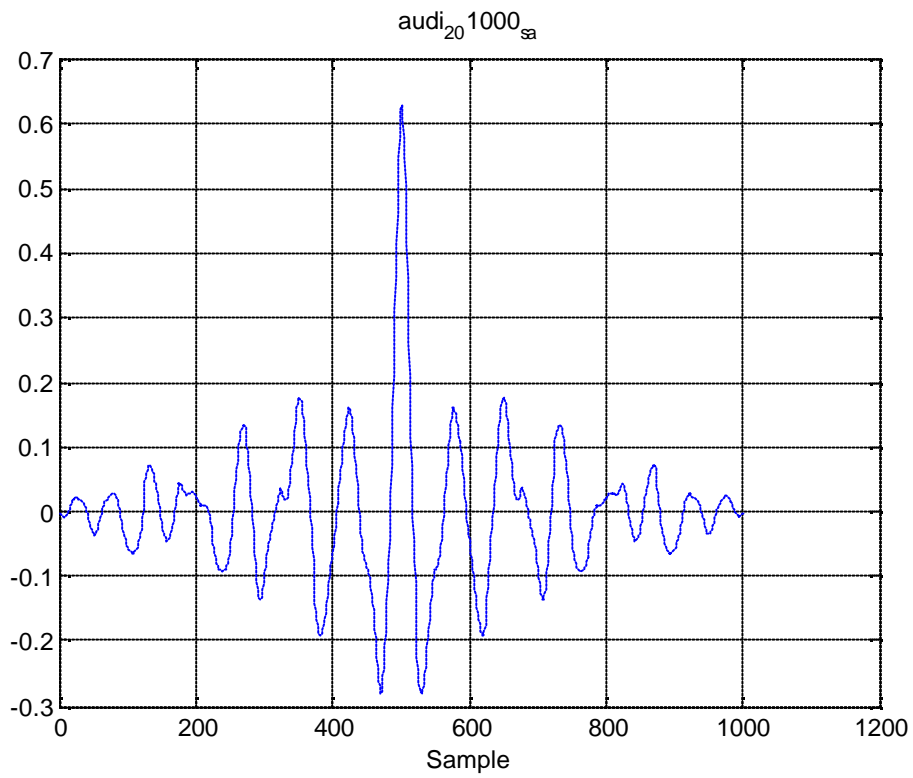


Abb. 15. Korrelogramm bei 1400 rpm

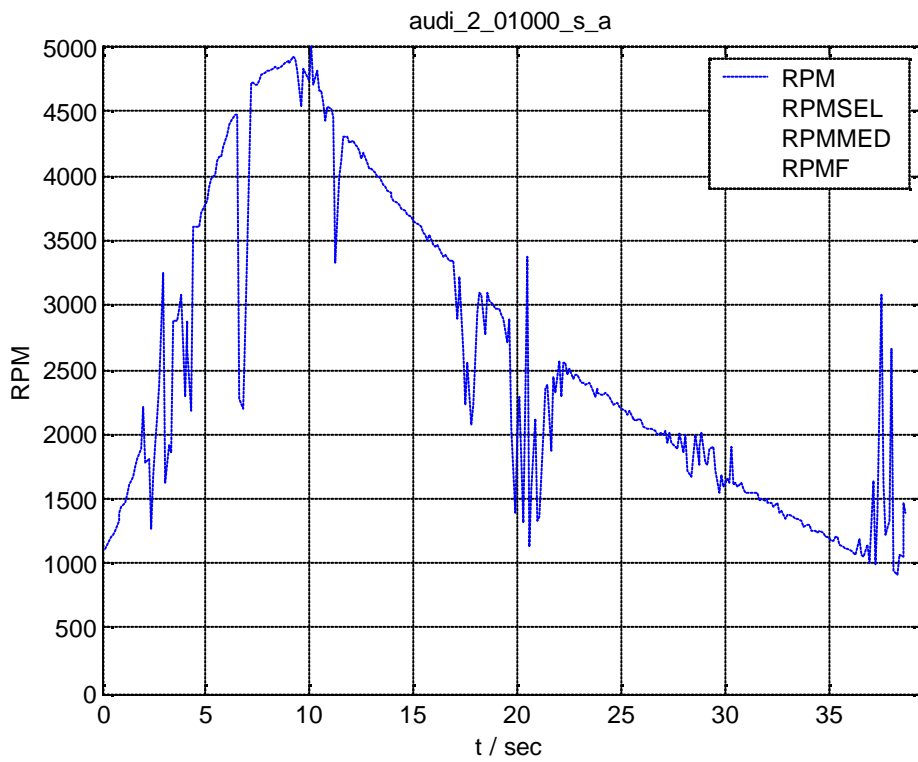


Abb. 16. rpm

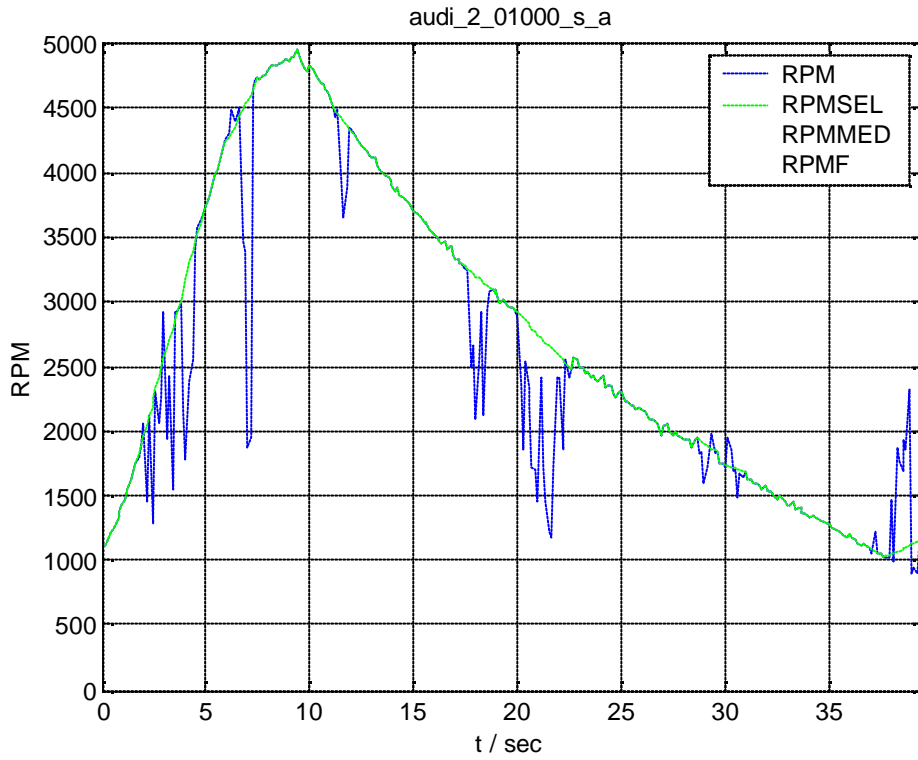


Abb. 17. rpmsel

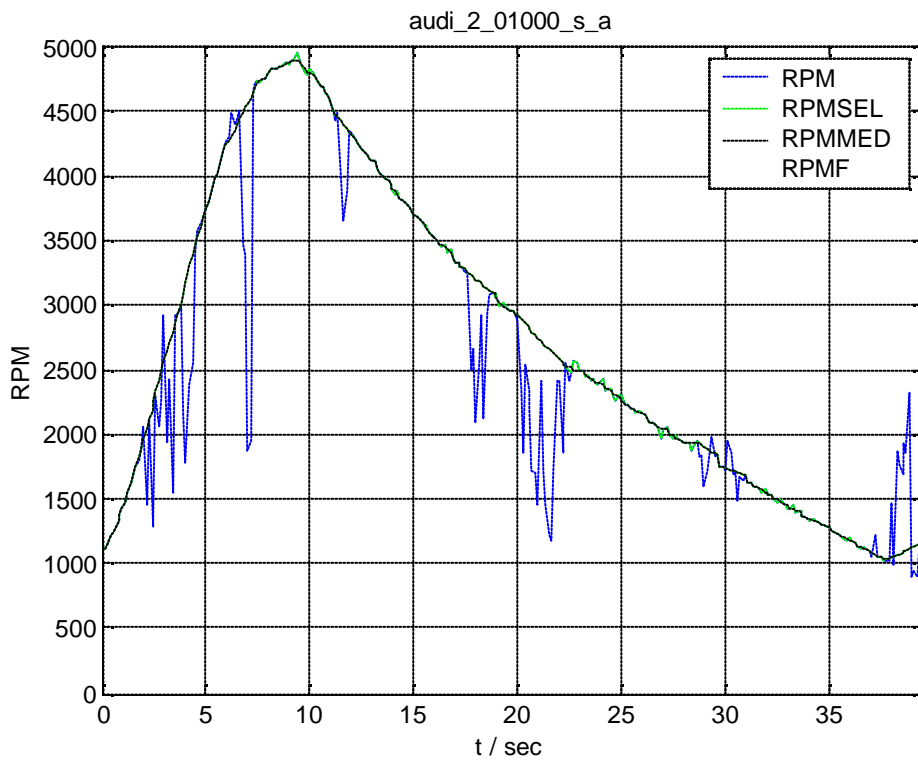


Abb. 18. rpmmmed

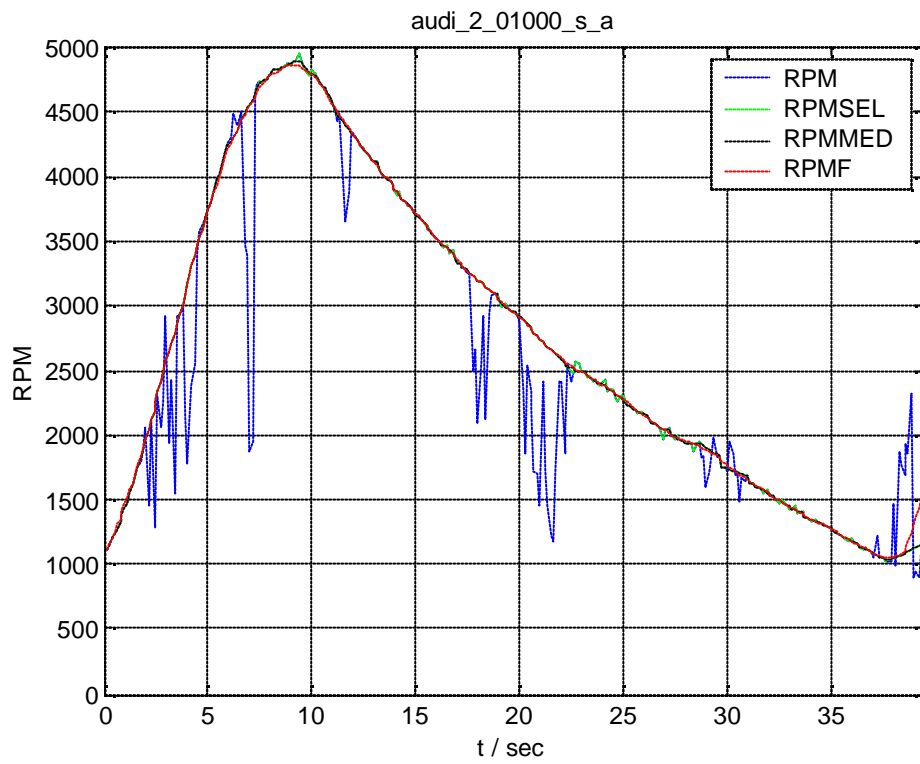


Abb. 19. rpmf

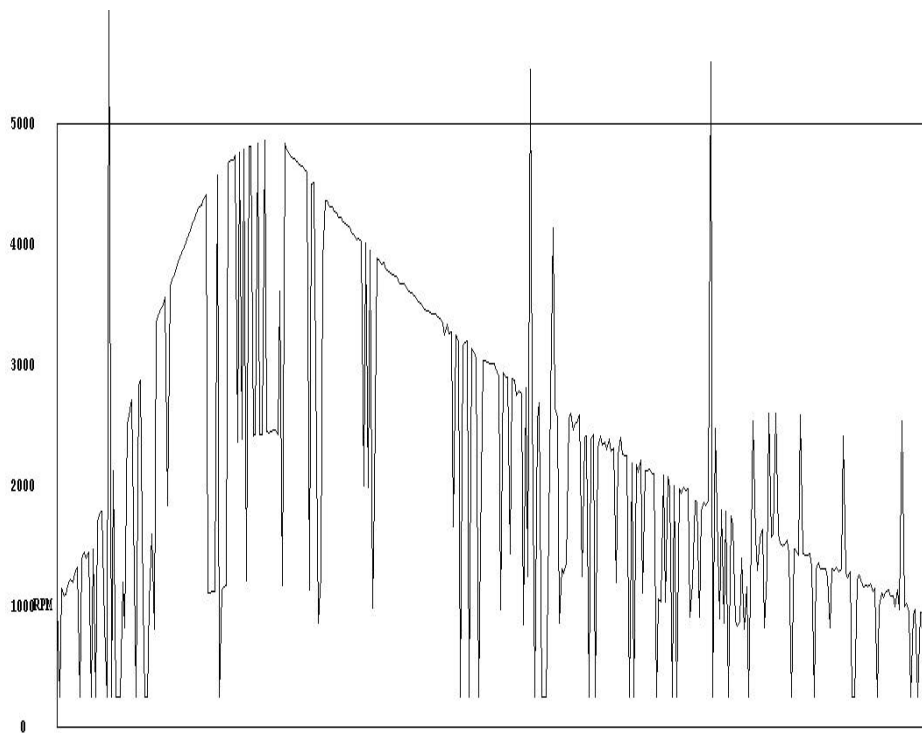


Abb. 20. rpm: audi_2_01000_s_a (pd)

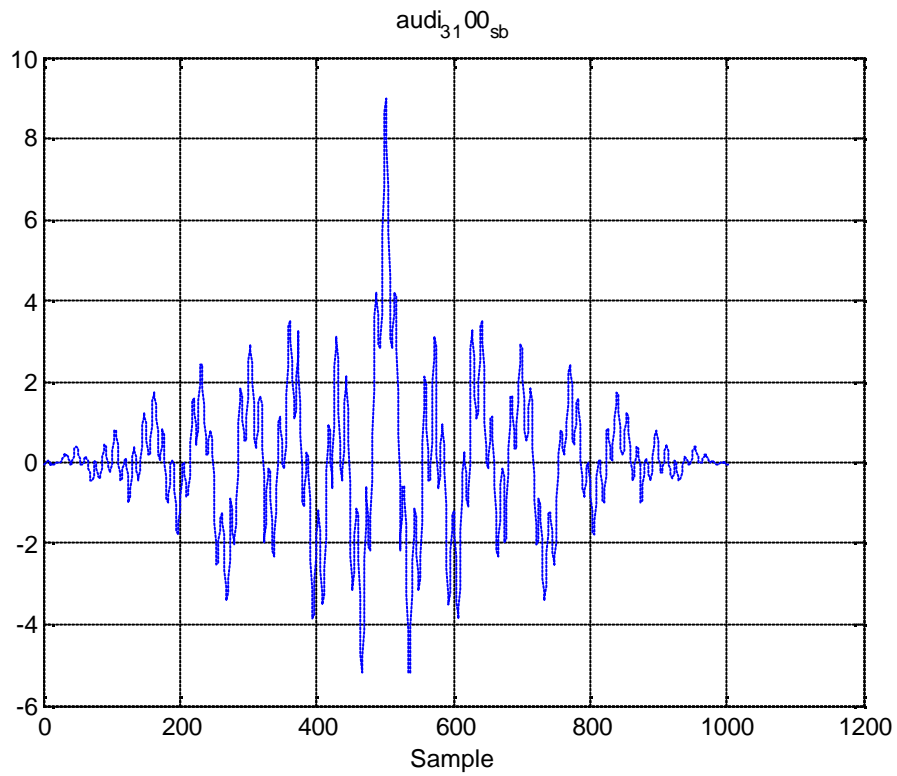


Abb. 21. Korrelogramm bei 4500 rpm

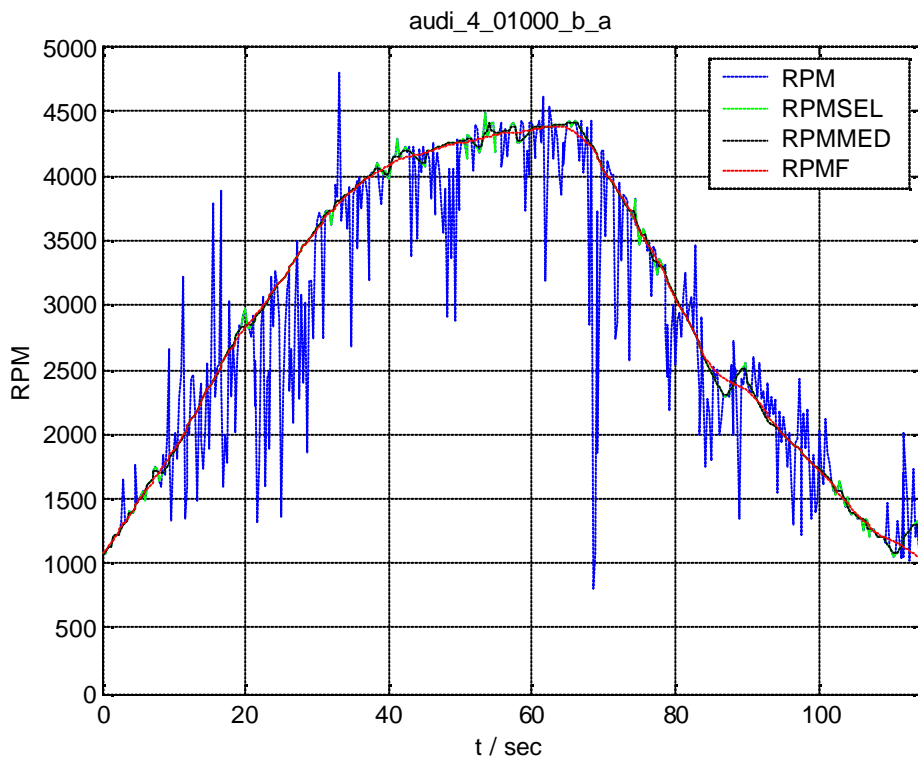


Abb. 22. rpm, rpmsel, rpmmmed, rpmmf

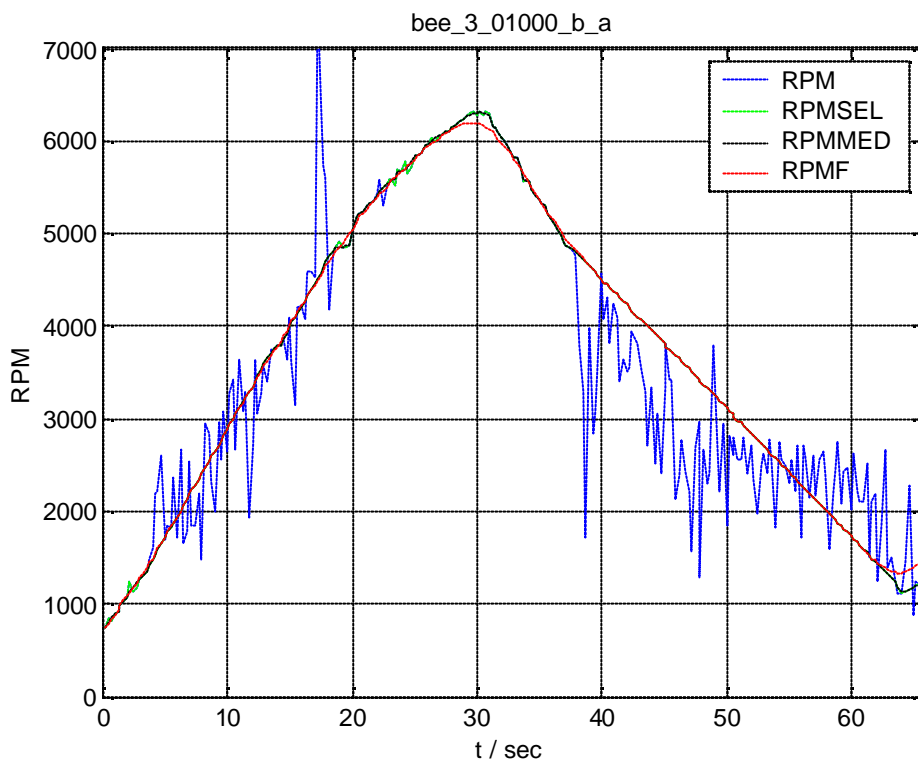


Abb. 23. rpm, rpmsel, rpmmmed, rpmpf (Ottomotor)