

Fakultät: Medien

Projektarbeit

**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES



Akustische Bewertung BMW Mini

Autoren:

**Gerry Klafki, Florian Anger,
Duc Vuong Toni Nguyen,**

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:

MG17wC-B

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Mittweida, 28.02.202

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Formelverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Vorwort	1
1. Einleitung	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Ermittlung der Motordrehzahl	3
2.1.1. On Board Diagnose (OBD)	4
2.1.2. Laserrotationsvibrometrie.....	4
2.1.3. Elektrischer Abgriff der Zündung	6
2.2. Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie.....	8
2.2.1. Definition und Funktion	8
2.2.2. Geeignete Kalibrierung	8
2.2.3. Membrandurchmesser	9
2.2.4. Vorverstärker	9
2.3. Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie.....	9
2.4. Schwingungsmessung	11
2.4.2. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer	13
2.5. Bewertungsverfahren für Motorordnungen und Eigenfrequenzen im Fahrzeug.....	15
2.5.1. Zeitbasierte Frequenzanalyse	15
2.5.2. Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz.....	16
2.6. Frequenzanalysen & Campbell-Diagramm in MATLAB®	16
3. Angewandte Methodik	19
3.1. Durchführung der Drehzahlermittlung mit dem Laserrotationsvibrometer Polytec OFV 4000.....	19
3.1.1. Technische Daten	19
3.1.2. Inbetriebnahme	19
3.1.3. Messung am Fahrzeug	21

3.2.	Durchführung der Drehzahlmessung über den elektrischen Abgriff der Zündung.....	21
3.3.	Durchführung der Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie	23
3.4.	Durchführung der Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie	24
3.5.	Durchführung der Schwingungsmessung.....	24
3.6.	Datenverarbeitung in MATLAB®.....	26
3.6.1.	Aufbereitung und Erstellen des Drehzahlvektors.....	26
3.6.2.	Frequenzanalyse der Luftschall- und Schwingungsmessung und das Campbell-Diagramm.....	29
4.	Präsentation der Ergebnisse.....	31
4.1.	Auswertung der Luftschallmessung mittels Einzelmikrofonie.....	31
4.2.	Auswertung der Körperschallmessung.....	32
5.	Fazit.....	35
	Literaturverzeichnis	XIV
	Anlagen.....	XVI
	Eigenständigkeitserklärung	XXVI

Formelverzeichnis

Gl.(1) Drehzahl nach Umdrehungen

Gl.(2) Drehzahl nach Winkelgeschwindigkeit

Gl.(3) Dopplerfrequenz ermittelt durch Laservibrometrie

Gl.(4) Distanz der Laserstrahlen eines Laserrotationsvibrometers

Gl.(5) Summe der Dopplerfrequenzen beider Einstrahlensysteme im Laserrotationsvibrometer

Gl.(6) Winkelgeschwindigkeit ermittelt durch Laserrotationsvibrometrie

Gl.(7) Drehzahl ermittelt durch den elektrischen Abgriff der Zündimpulse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau Viertaktvierzylinderottoverbrennungsmotor [Teichmann/Merker 2019]	3
Abbildung 2 OBD- System mit angeschlossenem Scan Tool [Reif 2015]	4
Abbildung 3 Schematische Draufsicht eines ein-fallenden Laserstrahls auf eine rotierende zylindrische Bauteiloberfläche.	5
Abbildung 4 Schematische Draufsicht zweier einfallender Laserstrahlen auf eine rotierende zylindrische Bauteiloberfläche	6
Abbildung 5 Veranschaulichung der einzelnen Takte eines Viertakt- Ottomotors. [Reif 2015].....	7
Abbildung 6 Darstellung eines Zündimpulses [Reif 2015].....	7
Abbildung 7 Amplitudengang eines Kondensatormikrofons [Kollmann/Schösser/Angert 2006].....	9
Abbildung 8 Kunstkopfaufnahme zur gehörrichtigen Messung [Genuit 2010].....	10
Abbildung 9 Sonogrammdarstellung einer zeitbasierten Frequenzanalyse [Kollmann 2006].....	15
Abbildung 10 Drehwinkelbasierte Ordnungsanalyse in Sonogrammdarstellung [Kollmann 2006]	16
Abbildung 11 Verarbeitungseinheit Polytec OFV 4000 mit einer ermittelten Drehzahl von 2761 min^{-1}	20
Abbildung 12 Sensorkopf OFV 400 korrekt ausgerichtet mit grüner LED in der Mitte der Balanceanzeige.....	20
Abbildung 13 Position des verwendeten Zündspulensteckers am Motor und Pol des Spannungsabgriffs	22
Abbildung 14 Schaltplan der verwendeten Optokopplerschaltung zur elektischen Anpassung von Zündspule und Eingangskanal des AD- Wandlers National Instruments 9232 [MG13 2016]	22
Abbildung 15 Microtech Gefell M365.....	23
Abbildung 16 Kunstkopfmikrofonie im Fahrzeug.....	24

Abbildung 17	25
Abbildung 18 Campbell-Diagramm der Einzelmikrofonie über die Frequenz von 0 bis 8000 Hz	31
Abbildung 19 Campbell-Diagramm der Luftschallmessung über die Frequenz von 0 bis 500 Hz	31
Abbildung 20 ganzzahlige Ordnungen im Körperschalldiagramm über eine Frequenz von 0 bis 500 Hz	32
Abbildung 21 Darstellung der 6.-10. Motorordnung als gestrichelte Linien im Körperschalldiagramm	33
Abbildung 22 Werte der Drehzahlmessung mit Markierung des Drehzahlbereiches von 5000 bis 5500 rpm	34

Vorwort

Die Autoren dieser Projektarbeit, haben in enger Zusammenarbeit an der Durchführung des Projekts und der schriftlichen Ausarbeitung gewirkt. Die erzielten Resultate wären ohne das jeweilige Engagement jedes Einzelnen nicht in der dargelegten Form möglich gewesen. Sie kamen zu der Einigung, sich jeweils spezieller Inhalte zu widmen und diese eigenständig hierin zu verfassen. Die individuellen Anteile setzen sich wie folgt zusammen:

Gerry Klafki:	Vorwort 1. Einleitung 2.1 Ermittlung der Motordrehzahl 3.1 Durchführung der Drehzahlermittlung mit dem Laserrotationsvibrometer Polytec OFV 4000 3.2 Durchführung der Drehzahlmessung über den elektrischen Abgriff der Zündung
Florian Anger:	2.2 Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie 2.3 Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie 2.5 Bewertungsverfahren für Motorordnungen und Eigenfrequenzen im Fahrzeug 3.3 Durchführung der Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie 3.4 Durchführung der Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie 4. Präsentation der Ergebnisse
Toni Duc Vuong Nguyen:	2.4 Schwingungsmessung 2.5 Frequenzanalyse & Campbell- Diagramm in Matlab 3.5 Durchführung der Schwingungsmessung 3.6 Datenverarbeitung in MATLAB® 5. Fazit

1. Einleitung

Beim Studieren der Ingenieurakustik liegt einer der Herausforderungen darin, dass Problemstellungen in der Regel übergreifend zu anderen Ingenieursdisziplinen auftreten. Somit muss ein umfangreiches Verständnis für technische Zusammenhänge aufgebaut werden. Diesem Anspruch liegt auch die Fahrzeugakustik zu Grunde. In dieser Teildisziplin verschmelzen Wissen aus Messtechnik, Maschinenbau, technischer Akustik, Psychoakustik und natürlich dem Fahrzeugbau. Deshalb bietet sich in fortgeschrittenen Semestern ein praktisches Studienprojekt direkt am Fahrzeug an. Die gewonnenen Kompetenzen in den jeweiligen technischen Fächern können verknüpfend gefestigt und dabei auch die speziellen Eigenheiten der Fahrzeugakustik kennengelernt werden.

Im Modul „Project Acoustics 2“ wurde die akustische Bewertung des hochschuleigenen Versuchsfahrzeuges zum Ziel gesetzt. Dabei sollten Luft- und Körperschall im Fahrzeuginnenraum, in Abhängigkeit zur Motorendrehzahl, beim Motorhochlauf im Stand eigenständig ermittelt werden. Folglich sollten die gewonnenen Daten als Campbell- Diagramme in Matlab dargestellt werden. Dieser Bericht beschreibt die notwendigen Vorüberlegungen, ausgeführte Praxis und erreichten Ergebnisse zur angestrebten Zielstellung.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Ermittlung der Motordrehzahl

Das Prinzip des Verbrennungsmotors beruht auf dem Entzünden eines Luft-Kraftstoffgemischs in den Verbrennungskammern. Die Verbrennungskammern sind die Laufbuchsen der Hubkolben, welche durch die Ausbreitung der Verbrennungsexplosion angeschoben werden und über Pleulstangenverbindung die Kurbelwelle antreiben. Die Kurbelwelle wiederum erzeugt ein Drehmoment, welches die mechanische Arbeit in mehreren Schritten über Kupplung, Getriebe und Antriebswelle zu den Radantrieben überträgt und sich das Fahrzeug hierdurch fortbewegen kann. Neben der primären Aufgabe des Fahrantriebs überträgt die Kurbelwelle sekundär Arbeit zum Riementriebsystem. Es besteht aus einem, von der Kurbelwellendrehung parallel angetriebenen, Riemenband, welches wiederum verschiedene Nebenaggregate antreiben kann. Es handelt sich dabei um Hilfsmaschinen, wie zum Beispiel Klimakompressor, Wasserpumpe oder Lichtmaschine. [vgl. Schreiner 2015]

Unter der Drehzahl n eines solchen Motors versteht man die Anzahl ganzer Umdrehungen U der Kurbelwelle innerhalb des Zeitintervalls t von einer Minute:

$$n = \frac{U}{t \cdot 60} \text{ in min}^{-1} \quad \text{Gl.(1)}$$

Da die Kurbelwelle innerhalb des Motorblocks isoliert ist, können keine direkten Messungen an dieser stattfinden und man muss sich indirekter Methoden behelfen. Es bieten sich drei Verfahren an, welche folgend näher betrachtet werden.



Abbildung 1 Aufbau Viertaktvierzylinderottoverbrennungsmotor [Teichmann/Merker 2019]

2.1.1. On Board Diagnose (OBD)

Die Drehzahlanzeige gehört zur Grundausstattung von Überwachungsinstrumenten, welche dem Fahrer eines Kraftwagens zur Verfügung stehen. Es sind somit bereits Sensoren, auch für die Erfassung der Kurbelwellendrehzahl, im Motor integriert. „Zur Überwachung von abgasrelevanten Systemen wie z. B. Motorsteuergeräten, schreiben gesetzliche Vorschriften in USA und Europa die so genannte On-Board-Diagnose (OBD, EOBD) vor.“ [Zimmermann & Schmidgall 2014] Die Einhaltung der rechtlichen OBD- Vorgaben soll sich über die namensgleiche OBD- Schnittstelle überwachen lassen. Für die externe Kommunikation mit den Sensoren benötigt man ein sogenanntes Scan Tool oder eine der frei verfügbaren Softwarelösungen. Mit letzteren und einem Adapter von USB auf die OBD- Schnittstelle lassen sich sämtliche Diagnosedaten am Laptop auslesen. Die OBD- Buchse befindet sich meist gut zugänglich im Fahrzeuginnenraum. Dadurch lassen sich Messungen während des Fahrbetriebs auch abseits des Rollenprüfstands bequem in der Fahrgastzelle steuern. Dabei gibt die OBD- Schnittstelle die Motordrehzahl, im Bereich von 0 bis $16383,75 \text{ min}^{-1}$, mit einer Auflösung von 16 Bit aus.[vgl. Zimmermann/Schmidgall 2014]

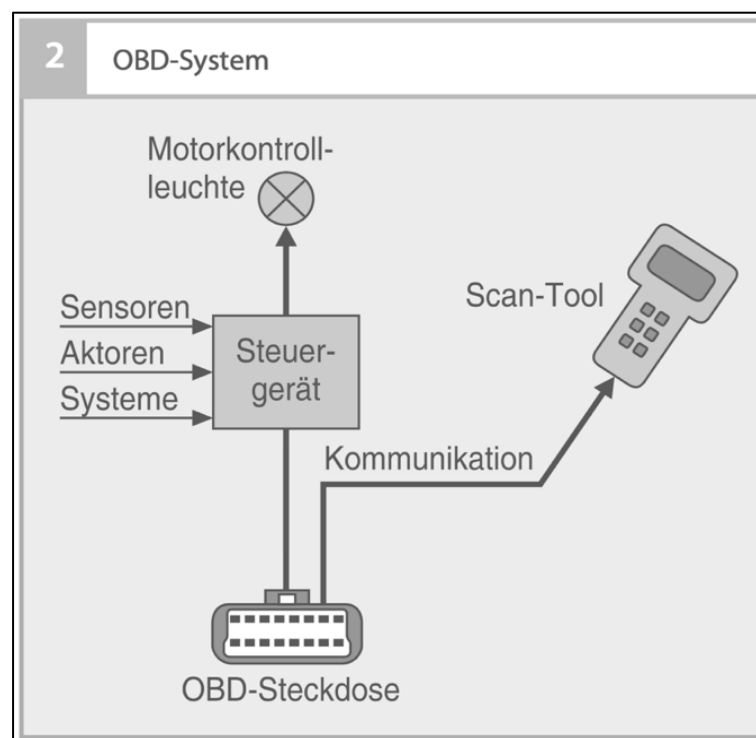


Abbildung 2 OBD- System mit angeschlossenem Scan Tool [Reif 2015]

2.1.2. Laserrotationsvibrometrie

Da sich die Geschwindigkeit des Riementriebs proportional zur Kurbelwellengeschwindigkeit verhält, besteht hier eine weitere Möglichkeit der Drehzahlermittlung.

Mit einem Laserrotationsvibrometer kann die Winkelgeschwindigkeit ω , eines rotierenden Bauteils ermittelt werden und diese nach Gl.(2) anschließend in die Drehzahl n umgerechnet werden. Eine notwendige Bedingung für eine erfolgreiche Messung ist eine optisch ungestörte Bahn des Lasers, orthogonal zur Drehachse des Bauteils.

$$n = \frac{\omega}{2\pi \cdot 60} \text{ in min}^{-1} \quad \text{Gl.(2)}$$

Grundlage der zweistrahligem Laserrotationsvibrometrie sind zwei redundante einstrahlige Laservibrometer, welche sich den Dopplereffekt zunutze machen. Je Einstrahlsystem wird der Laserstrahl mit bekannter fester Wellenlänge λ in den sogenannten Mess- und Referenzstrahl geteilt. Dabei fällt der Messstrahl auf die Oberfläche des Messobjekts. Wird Licht an der bewegten Oberfläche des Messobjekts gestreut, ändert sich in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit seine Wellenlänge. Das vom Messobjekt reflektierte Licht wird dem unbeeinflusstem Referenzstrahl überlagert und der daraus resultierende Strahl auf einen Photodetektor gelenkt. Aus der bewegungsabhängigen Modulation des resultierenden Strahls kann nun dessen Schwebungsfrequenz (Dopplerfrequenz) f_D ermittelt werden. Die Dopplerfrequenz steht, mit Gl.(3) ausgedrückt, in Abhängigkeit zum Radius r und der Winkelgeschwindigkeit ω , im Fall einer zylindrischen Geometrie des Bauteils und dem Einfallswinkel α , sowie der Wellenlänge λ des Laserstrahls.

$$f_D = \frac{2 \cdot r \cdot \omega \cdot \cos \alpha}{\lambda} \text{ in Hz} \quad \text{Gl.(3)}$$

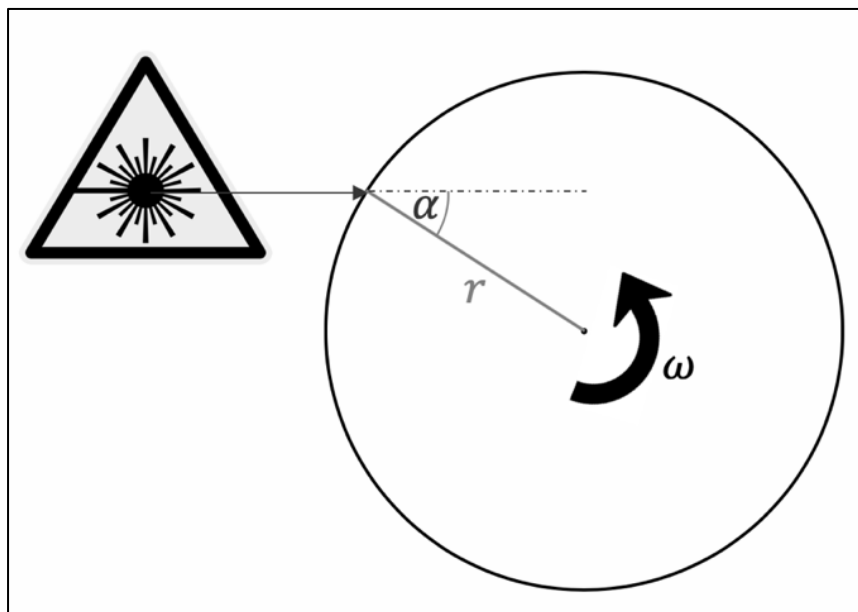


Abbildung 3 Schematische Draufsicht eines einfallenden Laserstrahls auf eine rotierende zylindrische Bauteiloberfläche.

Um die unbekanntenen Größen Radius und Einfallswinkel zu eliminieren, sodass die man die Winkelgeschwindigkeit erhält, bedient man sich eines zweiten Einstrahlsystems. Dabei treffen die beiden Laserstrahlen, parallel in einem Abstand d zueinander, symmetrisch zum Kreismittelpunkt auf das Bauteil ein, sodass sich in beiden Fällen gleiche Einfallswinkel ergeben. Über den geometrischen Zusammenhang nach Gl.(4) und der Summe der beiden Dopplerfrequenzen nach Gl.(5) lässt sich durch Ersetzen der unbekanntenen Größen Radius und Einfallswinkel durch den Laserabstand und durch Umformung die Winkelgeschwindigkeit ermitteln. Diese kann nach Gl.(6) für die Drehzahl herangezogen werden.

$$d = 2 \cdot r \cdot \cos \alpha \text{ in m} \quad \text{Gl.(4)}$$

$$f_{D1} + f_{D2} = \frac{2 \cdot r \cdot \omega \cdot \cos \alpha}{\lambda} + \frac{2 \cdot r \cdot \omega \cdot \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2 \cdot \omega \cdot (2 \cdot r \cdot \cos \alpha)}{\lambda} \text{ in Hz} \quad \text{Gl.(5)}$$

$$\omega = \frac{(f_{D1} + f_{D2}) \cdot \lambda}{2 \cdot d} \text{ in Hz} \quad \text{Gl.(6)}$$

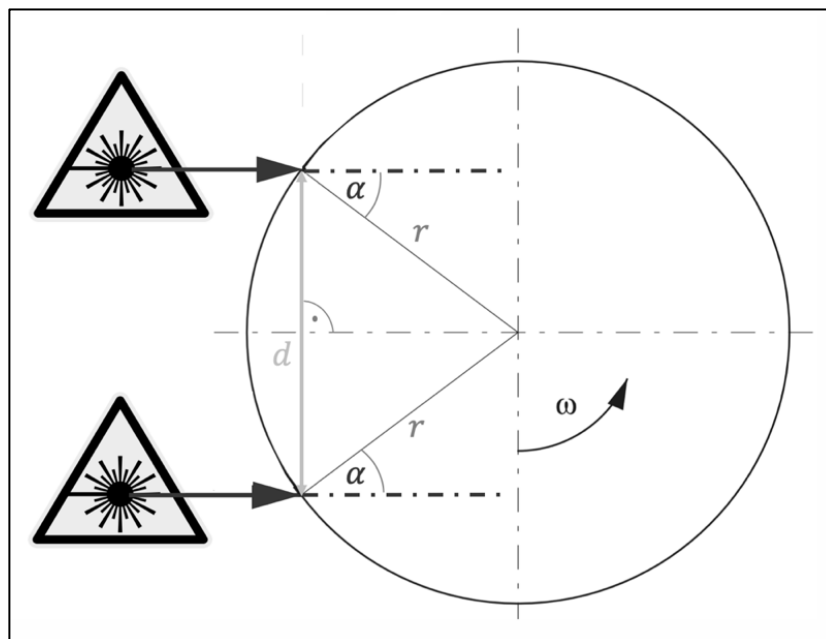


Abbildung 4 Schematische Draufsicht zweier einfallender Laserstrahlen auf eine rotierende zylindrische Bauteiloberfläche

2.1.3. Elektrischer Abgriff der Zündung

„Der Ottomotor ist ein Verbrennungsmotor mit Fremdzündung. Die Zündung hat die Aufgabe, das verdichtete Luft-Kraftstoff- Gemisch im richtigen Zeitpunkt zu entflammen.“ „Die meisten in Kraftfahrzeugen eingesetzten Verbrennungsmotoren

arbeiten nach dem Viertakt-Prinzip [...]“. [Reif 2015] Die vier Takte stellen dabei die Arbeitsabfolge in einem Zylinder dar, welche sich nach jedem Ablauf wiederholt. Im Verdichtungstakt (siehe Abbildung 5) kommt es dabei, infolge einer durch das Zündsystem an die Zündkerze abgegebenen Zündspannung U_z , zum Zündfunken. Die Zündspannung ist eine Folge Impulsspannung mit einer Amplitude von bis zu mehreren Kilovolt. [Abb. 6] Bei einem Viertaktverbrennungsmotor vollendet die Kurbelwelle mit jedem vierten Takt zwei ganze Umdrehung. Dies entspricht dem zeitlichen Abstand Δt_z zweier Zündimpulse. Somit kann man durch einen elektrischen Abgriff der Zündspannung an einem Zylinder, auf die Drehzahl schließen:

$$n = \frac{2 \cdot 60}{\Delta t_z} \text{ in } \text{min}^{-1} \qquad \text{Gl.(7)}$$

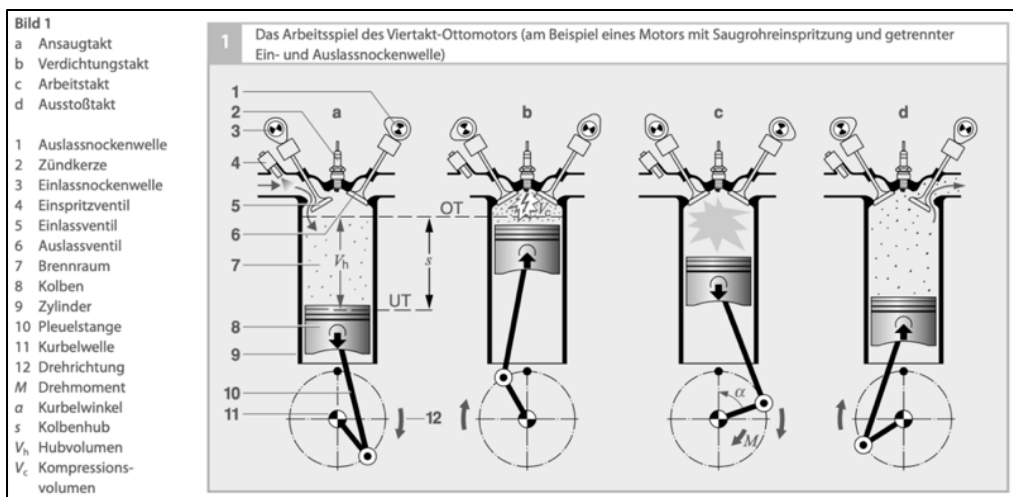


Abbildung 5 Veranschaulichung der einzelnen Takte eines Viertakt- Ottomotors. [Reif 2015]

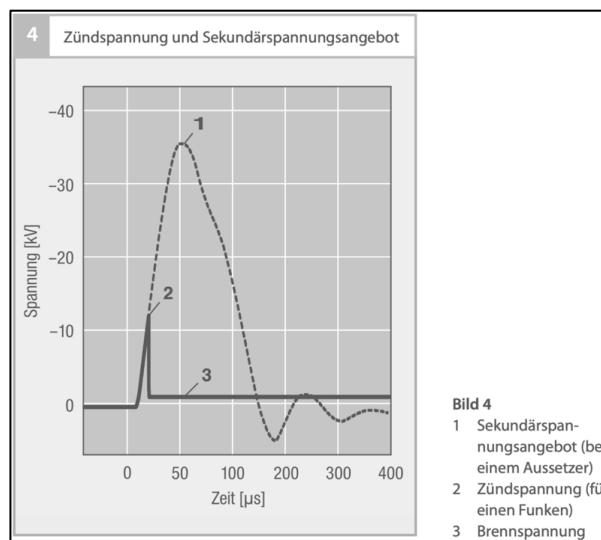


Bild 4
1 Sekundärspannungsangebot (bei einem Aussetzer)
2 Zündspannung (für einen Funken)
3 Brennspannung

Abbildung 6 Darstellung eines Zündimpulses [Reif 2015]

2.2. Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie

2.2.1. Definition und Funktion

Die erste Luftschallmessung sollte laut Aufgabenstellung mit einem Einzelmikrofon durchgeführt werden. Als Mikrofon werden grundlegend elektromechanische oder -akustische Schallempfänger bezeichnet. Für eine Luftschallmessung eignen sich Druckmikrofone mit Kugelcharakteristik [vgl. Kollmann/Schösser/Angert 2006] und leicht beweglicher Membran, welche durch Schalldruck in eine erzwungene Schwingung versetzt wird. Ein elektroakustischer Wandler transformiert diese in zum Schalldruck proportionale elektrische Schwingungen. Aufgrund ihres linearen Frequenzganges, geringen Eigenrauschens und großen Dynamikbereiches, eignen sich für Luftschallmessungen besonders Kondensatormikrofone. Deren Membran bildet mit einer im Abstand x_0 befindlichen festen Gegenelektrode einen Plattenkondensator. Wird die Membran in Schwingung versetzt, so verändert sich x_0 und damit die Kapazität c_0 des Kondensators. Es wird eine Spannungsänderung ausgelesen, aus der man Frequenz und Amplitude des Schallsignals errechnen kann. Für eine ständige Ladungsversorgung der Kondensatorplatten benötigt ein Kondensatormikrofon eine Vorspannung u_0 , auch als Phantomspeisung bezeichnet. Alternativ können auch Elektretmikrofone verwendet werden, die aufgrund ihrer vorgeladenen Dielektrikum Folie keine Phantomspeisung benötigen. [vgl. Genuit 2010]

2.2.2. Geeignete Kalibrierung

Messmikrofone beeinflussen selbst das Schallfeld, in welchem die Messungen durchgeführt werden. Je nach Schallfeld des Anwendungsgebietes können sie jedoch durch geeignete Kalibrierung ihre Wirkung kompensieren. Diffusfeldmikrofone sind demnach für Messungen im diffusen Schallfeld, also in geschlossenen, wenig absorbierenden Räumen geeignet und werden besonders in der Raum- und Bauakustik eingesetzt. Freifeldmikrofone kompensieren ihre Wirkung auf das freie Schallfeld. Sie werden unter anderem zur Schalleistungsmessung mittels Schallpegelmesser herangezogen. Dabei muss das Mikrofon auf die Quelle gerichtet sein. Eine Ausnahme bildet das Druckmikrofon, welches den Schalldruckpegel direkt an der schwingenden Membran ohne Kompensation misst. Es findet Anwendung bei Messungen in Rohren oder Kanälen, in denen das Mikrofon das Schallfeld nicht beeinflusst. Für eine Messung im Fahrzeuginnenraum eignet sich aufgrund der Analogie zu geschlossenen Räumen besonders ein Diffusfeldmikrofon.

2.2.3. Membrandurchmesser

Zusätzlich ist darauf zu achten, dass der Arbeitsbereich eines Messmikrofons unterhalb seiner Resonanzfrequenz liegt. Mit abnehmendem Membrandurchmesser steigt folglich die maximal messbare Frequenz. Gleichzeitig sinkt jedoch die Empfindlichkeit des Messmikrofons. [vgl. Kollmann/Schösser/Angert 2006]

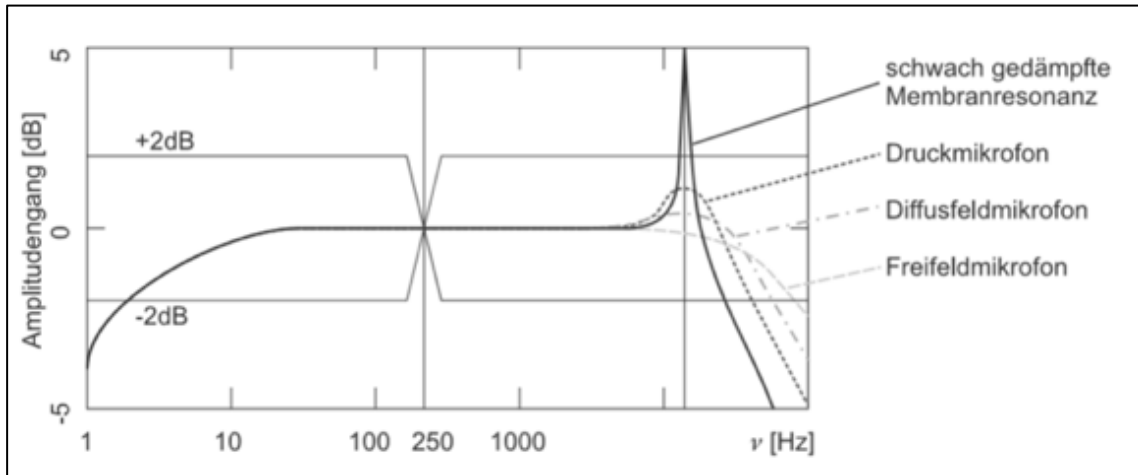


Abbildung 7 Amplitudengang eines Kondensatormikrofons [Kollmann/Schösser/Angert 2006]

2.2.4. Vorverstärker

Eine weitere wichtige Komponente in der Signalkette der Luftschallmessung ist der Vorverstärker des Messmikrofons. Dieser ist für die Versorgung des Mikrofons zuständig und wandelt die dessen Ausgangsimpedanz herunter, um die Datenerfassung zu ermöglichen. Der Vorverstärker kann in die Datenerfassungskomponente oder, wie im Fall des Elektretmikrofons, in der Kapsel integriert sein. [vgl. Kollmann/Schösser/Angert 2006] Vorteilhaft ist zudem eine Kombination eines Elektretmikrofon mit einem ICP® (Integrated Circuit Piezoelectric) - Vorverstärker. Bei dessen Einsatz kann auf eine aufwändige Spannungsversorgung verzichtet werden, es reicht hier eine geringe Konstantstromversorgung aus. Außerdem kann die Datenübertragung auch über längere Strecken per Koaxialkabel ohne Qualitätseinbußen erfolgen. [vgl. PCB Synotech 2016]

2.3. Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie

Um Rückschlüsse auf das binaurale Hörempfinden der Insassen sowie auf das Geräuschniveau zu ziehen, ist die Methode der Einzelmikrofonie unzulänglich. Hierfür ist eine sogenannte gehörgerechte Messung notwendig. Sie berücksichtigt, dass der Mensch in der Regel eintreffenden Schalldruck mit zwei Ohren, also binaural, wahr-

nimmt und verarbeitet. Dieses Phänomen ist die Grundlage für die Ortung akustischer Eindrücke in Richtung und Entfernung sowie den räumlichen Höreindruck. Auch eine Störgeräusunterdrückung ist nur durch binaurales Hören möglich. Somit erfordert eine gehörgerechte Messung eine zweikanalige Schallaufnahme am Ort der Trommelfelle des Menschen unter Berücksichtigung der Außenohrübertragungsfunktion sowie der gehörrichtigen Reproduktion der Signale. [vgl. Genuit 2010]

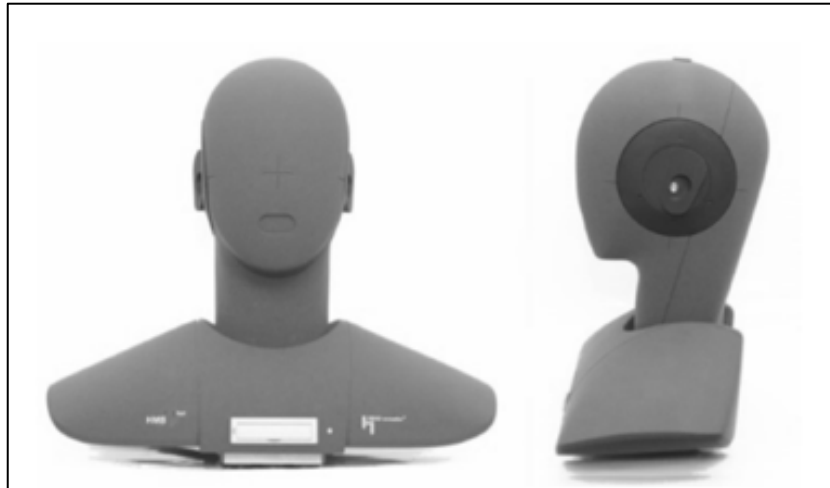


Abbildung 8 Kunstkopfaufnahme zur gehörrichtigen Messung [Genuit 2010]

Die Kunstkopfmessstechnik ist eine für diesen Zweck verbreitete Methode. Eine solche Messvorrichtung in Form eines Menschenkopfes berücksichtigt verschiedene Aspekte zur gehörgerechten Messung. Der Kunstkopf muss zum einen der Richtcharakteristik des durchschnittlichen Menschenkopfes entsprechen. Zum anderen muss dessen Dynamikbereich so groß sein, dass sowohl Versuche an der Hörschwelle nicht durch Eigenrauschen beeinträchtigt werden als auch Pegelspitzen bis zur Schmerzgrenze verzerrungsfrei messbar sind. Außerdem muss dieses Messsystem kalibrierfähig und kompatibel zu herkömmlichen Messmethoden sein. Eine Entzerrung richtungsabhängiger und richtungsunabhängiger Größen des jeweiligen Schallfeldes kann diese Kompatibilität herstellen.

Eine Freifeldentzerrung wird bei frontalem Schalleinfall auf dem Kunstkopf und einen Abstand von 3 m zur Quelle eingesetzt. Sie ist exakt reproduzierbar und weist eine Kompatibilität zu konventioneller Messtechnik auf. Allerdings ist sie ungeeignet für sich bewegende oder mehrere Quellen. Außerdem ist sie technisch nur sehr aufwändig realisierbar.

Die Diffusfeldentzerrung ist für Messungen im diffusen Schallfeld geeignet. Sie ist ebenso wie die Freifeldentzerrung reproduzierbar. Beide Entzerrungsmöglichkeiten korrigieren richtungsabhängige und -unabhängige Resonanzen. Allerdings existiert in der Praxis kein reines diffuses Schallfeld, wodurch es zu Fehlern kommt.

Weiterhin kann die „Independent of Direction“ – Entzerrung (kurz: ID-Entzerrung) verwendet werden. Sie korrigiert in Schallfeldern zwischen diffus und frei lediglich alle richtungsunabhängigen Resonanzen, die zum Beispiel durch den Gehörgang und durch das Außenohr entstehen können. Damit bewirkt sie, dass sich der Hörer mit Kopfhörern akustisch im Schallfeld des Kunstkopfes befindet. Eine Entzerrung der Übertragungsfunktion der Kopfhörer ist dabei ebenso essenziell. [vgl. Schulz 2019]

Die Signalauswertung mittels Filterung muss der Impedanzanpassung durch die Gehörknöchelchen im Zusammenhang mit der Frequenz-Orts-Codierung im Innenohr des Menschen entsprechen. Aufgrund dieser vielfältigen und komplexen Anforderungen ist der Aufbau eines Kunstkopfes in den Normen ISO TR 60959 und ITU S. 58 festgelegt.

Die Platzierung des Kunstkopfes im Fahrzeuginnenraum muss vergleichbar mit der Position der Insassen erfolgen, um repräsentative Messungen durchführen zu können. Es empfiehlt sich der Fahrersitz. Um die Werte der Einzelmikrofonie und der Kunstkopfmikrofonie vergleichen zu können, sollte die Position des Messmikrofons möglichst an der gleichen Stelle wie der Kunstkopf angebracht werden.

Für die Messung ist eine 12 V DC Spannungsversorgung sowie der Abgriff des Signals per BNC erforderlich. [vgl. Genuit 2010]

2.4. Schwingungsmessung

2.4.1 Arten von Beschleunigungsaufnehmern

Eine weitere Möglichkeit der Gewinnung einer Spektralanalyse des Schallfeldes im Fahrzeuginnenraum bietet die Schwingungsmessung an Fahrzeugteilen. In diesem Teil wird das Hauptaugenmerk auf der Schwingungsmessung mithilfe von Beschleunigungsaufnehmern liegen. Um jedoch einen Überblick über die Schwingungsmessung zu schaffen, wird ein kleiner Exkurs nötig sein. Eine erste Unterscheidung erfolgt in die Messung mit Relativ- und Absolutaufnehmer. Bei ersterem wird die Differenz der Bewegung des Messobjekts und des Aufnehmers gemessen. Relativ beschreibt hier den Bezug der Messgröße auf einen festen Punkt, der sich nicht am Messobjekt befindet. Da dieses Messprinzip kein schwingungsfähiges System im Aufnehmer benötigt, kann eine frequenzunabhängige lineare Übertragungsfunktion ohne Phasenverschiebung realisiert werden. Schwierigkeiten treten jedoch darin auf, dass der Aufnehmer selbst, aufgrund seiner Masse und Steifigkeit, ein schwingungsfähiges System darstellt, das es korrekt zu dimensionieren gilt. Im Allgemeinen soll eine weiche Ankopplung des Aufnehmers an das Messobjekt gewählt werden, damit der

gemessene Differenzweg der zu untersuchenden Messgröße entspricht. Der Aufnehmer kann hingegen mit einer hohen Steifigkeit und geringer Masse, um ihn unter seiner Eigenfrequenz zu betreiben, oder mit hoher Masse und geringer Steifigkeit, um ihn über seiner Eigenfrequenz zu betreiben, dimensioniert werden. Letztere Variante findet in der Praxis wenig Anwendung, ist jedoch zum Beispiel in handgehaltenen Aufnehmern realisiert. Weiterhin muss auf die Art der Ankopplung des Aufnehmers an das Messobjekt geachtet werden. Mögliche Ankopplungsarten für Relativaufnehmer sind die formschlüssige, kraftschlüssige oder berührungslose Ankopplung. Vor allem die berührungslose Ankopplung, wie bei Verwendung eines Laservibrometers, hat den Vorteil, dass der Aufnehmer keine Rückwirkung auf das Messobjekt aufweist. Es existieren aber auch Nachteile, wie die Einschränkung der Bewegung des Messobjekts quer zur Messrichtung oder die Anbringung von Befestigungsteilen an ihr bei festen beziehungsweise gelenkigen Verbindungen bei der formschlüssigen Ankopplung, oder ein eingeschränkter Frequenzbereich durch Kontaktverlust der Taster Spitze mit dem Messobjekt bei hohen Frequenzen und das Benötigen von hohen Anpresskräften bei kraftschlüssigen Ankopplungen.

Absolutaufnehmer „erfassen die Messgröße gegenüber einem ortsfesten oder gleichförmig bewegten Bezugssystem [...]“ [Kuttner/Rohnen 2019] Sie werden durch Massen, Federn und gegebenenfalls Dämpfung als schwingungsfähiges System gebaut und machen sich die Trägheitseigenschaften der Masse zunutze. Der Aufnehmer wird auf dem Messobjekt angebracht und misst dort anhand der Bewegung der Ankopplungsstelle gegenüber der seismischen Masse die gewollte Messgröße. Im Gegensatz zu Relativaufnehmern werden die Messeigenschaften wesentlich durch das schwingungsfähige System des Aufnehmers bestimmt. So ist der nutzbare Messbereich eines Absolutaufnehmers von seiner Eigenfrequenz begrenzt, die ebenfalls eine Phasenverschiebung mit sich bringt. Ein frequenzunabhängiges Übertragungsverhalten kann dennoch zum Beispiel mithilfe großer seismischer Massen und geringer Federsteifigkeiten erreicht werden, wonach man diese Aufnehmer oberhalb ihrer Eigenfrequenz betreibt. Durch die weiche Aufhängung der seismischen Masse, bleibt sie bei einer Anregung mit einer hohen Frequenz in Ruhe und der Schwingweg des Aufnehmers entspricht dem des Messobjekts. Dies ermöglicht hohe Empfindlichkeiten und findet in elektrodynamischen Aufnehmern Anwendung. Weiterhin besteht die Möglichkeit das angestrebte Übertragungsverhalten mithilfe kleiner seismischer Massen und großen Federsteifigkeiten zu erreichen. Das führt zu einer hohen Eigenfrequenz des Feder-Masse-Systems, wodurch sich die Möglichkeit bietet den Aufnehmer bis zu einem Bereich von maximal 20 % bis 30 % dieser Frequenz zu betreiben, da in diesem Bereich die Abweichung vom idealen Amplitudenfrequenzgang nur 5 % bis 10 % beträgt. Durch zusätzliche Dämpfung des Aufnehmers verringert sich das Maximum im Amplitudenfrequenzgang, womit man den Aufnehmer vor Überlast schützt und den Messbereich nochmals erweitern kann. Mit

diesem Messprinzip ist es möglich kleine, leichte und robuste Aufnehmer zu realisieren, zu denen Beschleunigungsaufnehmer zählen, mit denen sich der nächste Absatz näher beschäftigen wird.

Eine gesonderte Klasse bilden die deformatrischen Aufnehmer, die nur an Strukturen angewendet werden können, die sich verformen, da sie diese Deformation messen und daraus die Wegänderung aus der Änderung des Widerstandes des Dehnungsmessstreifens errechnen.

2.4.2. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer liegen, wie der Name bereits andeutet, dem piezoelektrischen Effekt zugrunde. Dieser ist die „Entstehung einer nach außen ableitbaren elektrischen Ladungsverschiebung an den Oberflächen von piezoelektrischen Materialien durch einwirkende Kräfte.“ [Kuttner/Rohnen 2019] Die Art wie das piezoelektrische Element beansprucht wird, zum Beispiel auf Druck oder Scherung, hängt von der Bauart des Aufnehmers ab. Die an der Oberfläche des Piezoelements, aufgrund von Krafteinwirkung, entstandene Ladung, aus der sich nach dem Coulombschen Gesetz die Spannung U_q ergibt, wird über Elektroden abgegriffen. Diese Spannung ist abhängig von der Gesamtkapazität des Systems, in der sich das piezoelektrische Element befindet, der einwirkenden Kraft und der piezoelektrischen Konstante, die von der Eigenschaft des Materials, der Richtung der Belastung und der Bauform des Aufnehmers beeinflusst wird. Natürliche piezoelektrische Materialien sind einkristalline Mineralien, wie zum Beispiel Quarz, Lithiumniobat und Turmalin. Synthetisch, durch Pressen und Sintern hergestellte Piezokeramiken, wie Bleizirkonat-Bleititanat-Mischkeramiken, erlangen ihre piezoelektrischen Eigenschaften durch Polarisation in einem starken elektrischen Feld und weisen bis zu zwei Zehnerpotenzen größere piezoelektrische Konstanten auf als die natürlichen Materialien, weswegen sie bevorzugt für Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden. Im konkreten Fall des Beschleunigungssensors wirkt die Beschleunigung des Messobjekts zusammen mit der seismischen Masse eine Kraft auf das Piezoelement aus, die zu einer zur Beschleunigung proportionale Ausgangsspannung U_q führt.

Vom Piezoelektrischen Beschleunigungssensor gibt es verschiedene Bauformen, bei denen das Piezoelement unterschiedlich beansprucht wird. Der Kompressionstyp ist hierbei der älteste, bei dem das Piezoelement als Federelement eine Druckbeanspruchung erfährt. Sensoren dieser Bauform weisen eine hohe Empfindlichkeit und Robustheit auf, sind dagegen aber anfällig für Störungen durch Temperaturgradienten im Piezoelement und sich über das Gehäuse einkoppelnde Schallfelder. Biegeschwinger, die, wie ihr Name schon sagt, auf Biegung beansprucht werden, benötigen eine

geringere seismische Masse als Kompressionstypen und ermöglichen dadurch einen größeren Messbereich und eine geringere Gesamtmasse, während sie eine hohe Empfindlichkeit beibehalten. Eine Schwachstelle dieses Bautyps bleibt jedoch die Temperaturempfindlichkeit, aber auch fehlende Robustheit des Piezoelements aufgrund der Beanspruchungsart. Die heutzutage verbreitetste Bauform ist der Scherschwinger, die bei Scherung ihre Ausgangsspannung erzeugt. Dieser Typ ermöglicht eine „geringe Störanfälligkeit gegenüber Basisdehnung, Schalleinwirkung und Temperaturgradienten.“ [Kuttner 2019] Dafür sind sie im Vergleich zu Kompressionstypen und Biegeschwingern nicht so empfindlich. Auch die Möglichkeit Schwingungen in mehrere Richtungen zu vermessen existiert mit multiaxialen Konstruktionen von mehreren uniaxialen Einzelementen oder mehreren gesamten Beschleunigungssensoren.

Eine weitere Unterscheidung von Beschleunigungssensoren kann man in ihre Art der Signalaufbereitung vornehmen. Die zwei heute gebräuchlichen Arten sind die Ladungsverstärkung und die integrierte Vorverstärkung, als IEPE-Aufnehmer (Integrated Electronics Piezo-Electric Transducer) bekannt. Für die erstere Variante betreibt man den Sensor an einem Operationsverstärker mit kapazitiver Rückkopplung, wodurch die Ausgangsspannung vom Rückkopplungsweig und nicht von der Kapazität des Piezoelements und des verwendeten Kabels abhängt. Zusammen mit dem Widerstand und der Kapazität des Rückkopplungsweiges entsteht ein Hochpass, den es in Abhängigkeit vom benötigten Frequenzmessbereich passend zu dimensionieren gilt. Handelsübliche Ladungsverstärker bieten dies in Form von Bereichsumschaltungen des Rückkopplungswiderstandes an. Auch bringen die genutzten Bauteile eine Begrenzung im Frequenzbereich hoher Mittenfrequenzen von ca. 50 kHz bis 100 kHz mit sich. Die Anwendung von Ladungsverstärkern erfordert jedoch ein gewisses Maß an Achtsamkeit, da zum Beispiel Kabel mit zu hoher Kapazität zwischen Sensor und Verstärker zu einem niedrigen Signal-Rausch-Abstand führen. Auch ist darauf zu achten, dass Steckverbindungen sauber und trocken sind, da sich sonst Kapazitäten und Übergangswiderstände ändern können, die das Messsignal verfälschen. IEPE-Aufnehmer besitzen hingegen Impedanzwandler und Vorverstärker bereits im Gehäuse, was einen niederohmigen Sensorausgang für eine problemlose Übertragung und Weiterverarbeitung ermöglicht. Derartige Sensoren müssen mit einem Gleichstrom im Bereich von 2 mA bis 20 mA versorgt werden, der mithilfe eines Kondensators vom Messsignal entkoppelt wird. Die untere Begrenzung des Messbereiches ist auch wie beim Ladungsverstärker vom RC-Hochpass, hier vom Hochpass der Konstantstromquelle, abhängig, wobei der Anwender bei dieser Aufbereitungsart keinen Einfluss darauf hat. Die obere Begrenzung ist jedoch allein vom genutzten Kabel abhängig. Insgesamt übertragen die Aufbereitungsarten einen größeren Frequenzbereich als die Sensoren messtechnisch erfassen können, weshalb überwiegend nur die Länge und Art der Kabel berücksichtigt werden muss.

2.5. Bewertungsverfahren für Motorordnungen und Eigenfrequenzen im Fahrzeug

Zur Auswertung von Messungen mit veränderlicher Maschinendrehzahl wird vorrangig eine Ordnungsanalyse herangezogen. Diese ermöglicht die Unterscheidung drehzahlabhängiger sowie drehzahlunabhängiger Anteile des Signals. Dabei wird zwischen zeitbasierter Frequenzanalyse, drehwinkelbasierter Frequenzanalyse mit variabler Abtastfrequenz und drehwinkelbasierter Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz unterschieden.

2.5.1. Zeitbasierte Frequenzanalyse

Bei Anwendung der zeitbasierten Frequenzanalyse wird das Signal mit einer konstanten Frequenz abgetastet. Es ist ein in Stufen stationäres Signal erforderlich, sodass bei einem gestuften Drehzahlhochlauf für jede Stufe eine FFT- Analyse erfolgen kann. Durch stochastische Mittelung ist bei diesem Verfahren die Anfälligkeit für Fehler gering. Die Darstellung der drehzahlspezifischen Frequenzanteile kann in einem dreidimensionalen Wasserfall- oder Campbell-Diagramm oder in einer Sonogrammdarstellung (Draufsicht mit farblicher Abstufung) erfolgen. Bei einer Darstellung der Frequenzspektren über die Drehzahlachse sind schräge Linien als drehzahlabhängige Anteile (Ordnungen) und gerade Linien als drehzahlunabhängige Signalanteile zu interpretieren [Abb. 3]. Als erste Ordnung wird die Grunddrehfrequenz bezeichnet. Jedes n -te Vielfache ist dementsprechend die n -te Ordnung. Instationäre Drehzahlstufen bzw. nicht gestufte Hochläufe führen zu einem „Verschmieren“ der Frequenzanteile.

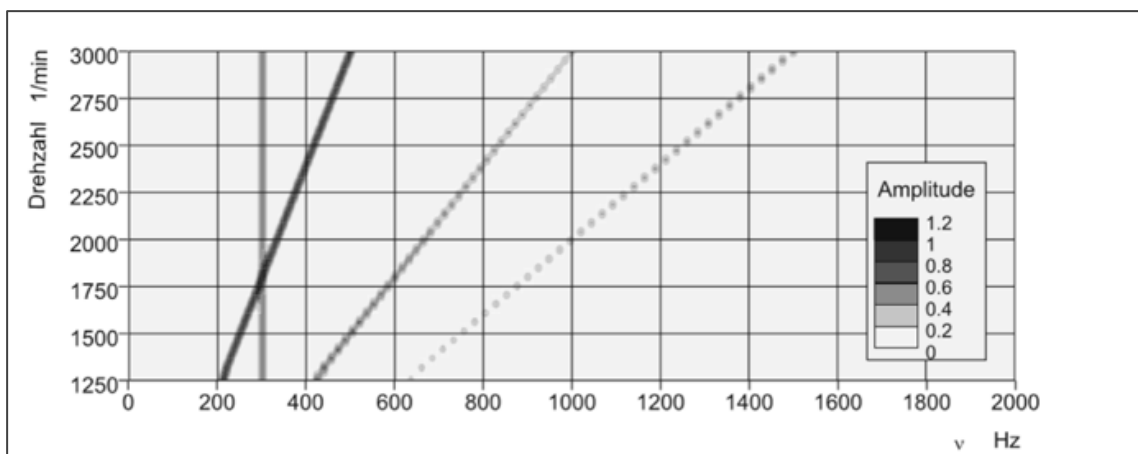


Abbildung 9 Sonogrammdarstellung einer zeitbasierten Frequenzanalyse [Kollmann 2006]

2.5.2. Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz

Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse ist auch mit konstanter Abtastrate möglich. Dabei sollte die Abtastfrequenz deutlich über der maximal auslesbaren Drehzahlfrequenz liegen. Es erfolgen eine Aufzeichnung von Drehwinkelinkrementen sowie eine zeitbasierte Datenerfassung parallel. Die Messdaten liegen also äquidistant auf der Zeitachse. Bei veränderlicher Drehzahl sind die zeitlichen Abstände der Drehwinkelinkremente allerdings veränderlich. Die Anpassung auf eine drehwinkelbasierte Darstellung erfordert somit ein sogenanntes Resampling, also eine Anpassung der Messdaten auf die den Zeitwerten entsprechenden Drehzahlen. Nachfolgend ändert sich auch hier die Abtastfrequenz mit der Drehzahl, sodass als Anti-Aliasing-Filter digitale Tiefpassfilter verwendet werden. Hier ist erneut eine Wasserfalldarstellung mit konstanten Drehzahlstufen möglich. Die Frequenzachse wurde jedoch durch eine Ordnungssachse ersetzt. Hier entsprechen gerade Linien den drehzahlabhängigen und gekrümmte Linien drehzahlunabhängigen Größen [Abb. 4]. Bei drehzahlunabhängigen Größen ist ein Verschmieren zu erkennen. Die Ordnungen bleiben klar sichtbar. [vgl. Kollmann 2006]

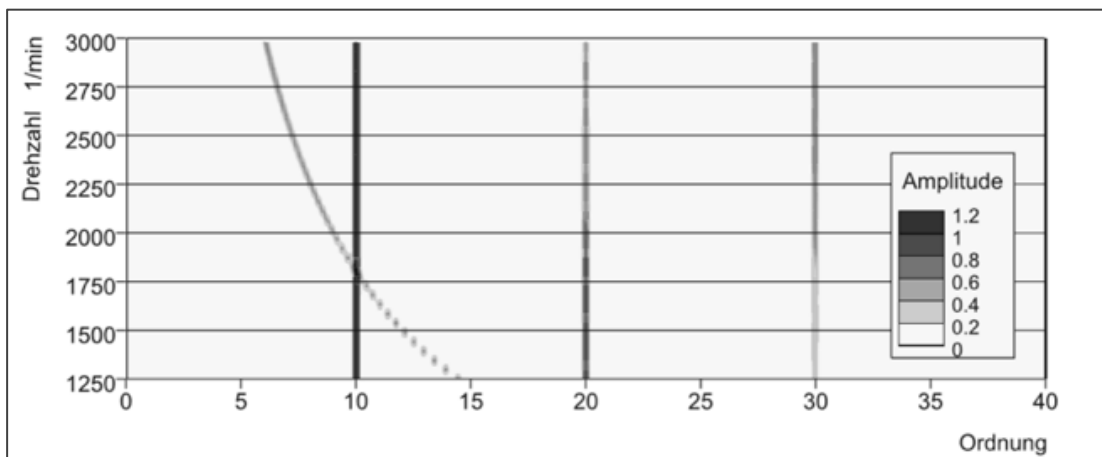


Abbildung 10 Drehwinkelbasierte Ordnungsanalyse in Sonogrammdarstellung [Kollmann 2006]

2.6. Frequenzanalysen & Campbell-Diagramm in MATLAB®

Das Campbell-Diagramm ist eine Art des Spektrogramms, also eine Möglichkeit ein Frequenzspektrum in Abhängigkeit einer weiteren Größe und somit dreidimensional darzustellen. Bei Frequenzanalysen von Systemen mit sich rotierenden Bauteilen ist diese unabhängige Größe die Drehzahl. Wie die Erzeugung dieses Diagramms in MATLAB® theoretisch funktioniert wird dieses Kapitel näher beleuchten.

Es sollte geklärt werden, was man für diese Art der Darstellung von Spektren mithilfe von MATLAB® benötigt. Zu erwähnen ist, dass Rechnungen in dieser Anwendung auf Matrizen basieren und somit zeitdiskret gearbeitet wird. Für eine Analyse ist es logischerweise notwendig ein Messsignal bereitzustellen, das analysiert werden kann. Dieses kann, wenn es extern aufgezeichnet wurde, importiert oder gleich in MATLAB® aufgenommen werden. Für die Aufzeichnung im Programm selbst, kann die integrierte Soundkarte des verwendeten Rechners oder ein extern angeschlossenes Audio-Interface genutzt werden, das mit dem Programm verknüpft werden muss. Gleiches gilt für die zweite unabhängige Variable, die für eine dreidimensionale Darstellung nötig ist. Beide diese Messsignale müssen zeitlich synchronisiert sein, um eine spätere Zuordnung der Spektren zu ermöglichen. In beiden Fällen der Aufnahme von Signalen innerhalb des Programms muss für die Datenerfassung eine Konfiguration erfolgen, die beinhaltet (1) von welchen Kanälen der Soundkarte aufgenommen wird, (2) wie lange das Eingangssignal aufgenommen werden soll und (3) mit welcher zeitlichen Auflösung MATLAB® dieses Signal aufnehmen soll. Letzteres bedeutet wie viele Werte innerhalb einer Sekunde aufgenommen werden, was zusammen mit der Aufnahmedauer bestimmt, wie groß die Matrix sein wird, mit der weitergearbeitet wird. Betrachten wir nun den nächsten Schritt in der Erstellung dieser Spektralanalyse. Besitzt MATLAB® das zu analysierende Messsignal in Form einer Matrix oder eines Vektors, gibt es verschiedene in Matlab integrierte Funktionen, mit denen man sich ein Spektrum berechnen lassen kann. Bei stationären, also sich zeitlich nicht verändernden Signalen, bietet es sich an eine über das ganze Messsignal mittelnde Fouriertransformation mit dem Befehl „ $Y = \text{fft}(X)$ “ zu berechnen, wobei X das Messsignal, also die Eingangsgröße und Y die Fouriertransformation als zweiseitiges Spektrum und somit die Ausgangsgröße ist. Eine Beispielanleitung zur Berechnung des einseitigen Frequenzspektrums daraus befindet sich in der Dokumentation des Befehls „fft“. Für instationäre Geräusche jedoch ist es ratsam die Funktion „ $s = \text{spectrogram}(x)$ “ zu nutzen, die eine Kurzzeit-Fourier-Transformation berechnet, bei der das Signal in kurze zeitliche Abschnitte, so genannte Fenster, unterteilt und von diesen Fenstern eine Spektralanalyse gemacht wird. Die erweiterte Syntax dieses Befehls erlaubt es die Fensterung und den Überschneidungsbereich zweier nebeneinander liegender Fenster individuell zu bestimmen. Zum einen um ein, für das Vorhaben, passendes Verhältnis zwischen Zeit- und Frequenzauflösung einzustellen, zum anderen um Verfälschungen der Werte des Zeitsignals zu vermeiden, die sich am Rande der Fensterfunktion befinden. Im Gegensatz zum „fft“-Befehl liefert der „spectrogram“-Befehl direkt einseitige Frequenzspektren für die Anzahl an Fensterungen, die das Messsignal erfährt. Damit MATLAB® die Frequenzskale als erste unabhängige Größe automatisch berechnet, muss die Abtastfrequenz, also die bei der Aufnahme eingestellte Zeitauflösung, angegeben werden. Somit sind Daten der Frequenzanalyse erstellt und in MATLAB® gesichert. Für die Darstellung in einem dreidimensionalen Diagramm wird schlussendlich noch die zweite unabhängige Größe benötigt. Für diese Zwecke gibt

der Befehl einen dritten Vektor aus, aus dem zusammen mit der Abtastfrequenz die Indices der Zeitpunkte berechnet werden können, wann eine Frequenzanalyse durchgeführt wurde. Bei einem Campbell-Diagramm ist die zeitliche Abhängigkeit durch die Abhängigkeit von einer Drehzahl zu ersetzen. Dank der zeitlichen Synchronisation der aufgenommenen Messsignale und dem monotonen Anstieg der Drehzahlen bei einem Motorhochlauf, ist dies unproblematisch umsetzbar, da mithilfe des dritten Ergebnisvektors sich neben den Zeitpunkten auch die Drehzahlen ergeben, wann ein Spektrum berechnet wurde. Um nun das Campbell-Diagramm darzustellen, kann ein Surface-Diagramm gezeichnet werden, welches die dritte Dimension durch Farben darstellt.

3. Angewandte Methodik

3.1. Durchführung der Drehzahlermittlung mit dem Laserrotationsvibrometer Polytec OFV 4000

Zur Ermittlung der Drehzahl, sollte nach Aufgabenstellung ein Laserrotationsvibrometer des Herstellers Polytec in Betrieb genommen werden, um anschließend die notwendigen Messungen am hochschuleigenen Testfahrzeug durchzuführen und aufzuzeichnen.

3.1.1. Technische Daten

Das Polytec Messsystem besteht aus einem ausgelagertem OFV 400 Doppelstrahlensensorkopf und der Verarbeitungseinheit OFV 4000. Am OFV 4000 wird über ein Display die ermittelte Drehzahl „rpm“, die Winkelgeschwindigkeit $\Delta\omega$ und der Rotationswinkel $\Delta\varphi$ angezeigt. Die Angabe rpm ist ein verbreitetes äquivalent zur Drehzahleinheit min^{-1} und wird folgend in Verbindung mit dem Polytec- Messsystem verwendet. Die drei Werte können jeweils über einen BNC- Anschluss, zur weiteren Verarbeitung, direkt abgegriffen werden. Die für das Projekt interessierende Drehzahl kann nach Herstellerangabe in einem Arbeitsbereich von -7000 rpm bis 11000 rpm ausgegeben werden. [Anlage 2] Das Signal wird vom internen Gleichstromdecoder mit einer Spannung von 1 V pro 1000 rpm, bei einer absoluten Genauigkeit von ± 5 rpm bzw. ± 1 %, ausgegeben. Das Testfahrzeug, ein BMW Mini Cooper mit einem Viertakt-Vierzylinderottoverbrennungsmotor, hat einen Betriebsdrehzahlbereich von 800 rpm im Leerlauf bis zur automatischen Motorbegrenzung bei 6700 rpm. Somit erfüllt das Messsystem von Polytec die Voraussetzung die Betriebsdrehzahlen des Motors bestimmen zu können.

3.1.2. Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des Laserrotationsvibrometers erfolgte nach Bedienungsvorschrift des Herstellers. Dazu wurde der Sensorkopf mit der Verarbeitungseinheit verbunden und eine dafür vorgesehene Reflektorfolie senkrecht aufgehangen. Die beiden Laserstrahlen des Sensorkopfes wurden im Abstand von $d = 20$ cm auf die Folie orthogonal ausgerichtet. Ohne Bewegung der Folie sollte die rpm- Anzeige den Wert 0 angeben. Dieser Fall stellte sich ein. Im Fall, dass die Anzeige $\neq 0$ ausgibt, besteht die Möglichkeit den Wert über das Bedienmenü auf 0 zu kalibrieren. Durch Bewegung der Folie konnte die Funktionsfähigkeit, anhand sich ändernder Ausgabewerte, festgestellt werden. Zur Überprüfung der Richtigkeit der ermittelten Werte, wurde eine Messung an

einem rotierenden Lüfter, mit der bekannten Drehzahl von $n = 2760 \text{ min}^{-1}$, durchgeführt. Die Messung wurde mit einer ermittelten Drehzahl von $n = 2761 \text{ min}^{-1}$, unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit, als verlässlich evaluiert. Der Sensorkopf wurde mit beiden Laserstrahlen im gleichen Abstand zum Rotationsmittelpunkt des Lüfters orthogonal ausgerichtet. An der Rückseite des Sensorkopfes ist dafür eine sogenannte Balanceanzeige vorgesehen. Bei erfolgreicher Ausrichtung leuchtet eine grüne LED in der Mitte der Anzeige, bei Abweichungen gelbe LED am Rand der Anzeige auf. Je nach Grad der Abweichung verlieren die ausgegebenen Werte ihre Verlässlichkeit. Dabei werden unplausible Werte angezeigt oder es kommt, in unregelmäßigen Abständen zeitweise oder dauerhaft, zum Aussetzen der Anzeige. Die Signalausgabe über den BNC- Anschluss wurde mit einem Oszilloskop überprüft. Es konnte eine zu erwartende Gleichspannung von $U_{Osz} \approx 2,8 \text{ V}$ abgelesen werden.



Abbildung 11 Verarbeitungseinheit Polytec OFV 4000 mit einer ermittelten Drehzahl von 2761 min^{-1}



Abbildung 12 Sensorkopf OFV 400 korrekt ausgerichtet mit grüner LED in der Mitte der Balanceanzeige

3.1.3. Messung am Fahrzeug

Nach den Theoretischen Vorüberlegungen und den Erfahrungen aus der Inbetriebnahme und Testmessung am Lüfter, musste nun am Motor ein, für die Drehzahlermittlung, geeignetes rotierendes Bauteil gefunden werden. Im Bereich des Riementriebs wurden im freien Sichtfeld zwei rotierende Scheiben von Nebenaggregaten gefunden. Aufgrund der hohen Baudichte im Motorraum zeigte sich allerdings, dass es keine freie Sichtachse gibt, welche orthogonal zu einer der beiden Scheibendrehachsen ist. Nichtsdestotrotz wurden Versuche unternommen, die Drehzahlen unter Neigungswinkeln kleiner als 90° des Sensorkopfes zu ermitteln. Nach mehreren Versuchen gelang es tatsächlich, an einer der Scheiben, eine Drehzahl von $n = 836 \text{ min}^{-1}$ im Leerlauf des Motors zu ermitteln. Diese stimmte mit der Drehzahlanzeige im Kontrollsegment im Fahrzeuginnenraum überein. Anschließend wurde die Drehzahl über die manuelle Bedienung des Gaspedals erhöht. Dabei ermittelte der OFV 4000 unplausible Werte, welche mit längeren Aussetzern der Anzeige einhergingen. Es konnte beobachtet werden, dass der Motorblock unter Betätigung des Gaspedals, nach rechts kippte. Der schmale Bereich, auf welchem die Laserstrahlen gerade so noch ungestört auf die Scheibe eintreffen konnten, verschob sich mit dem Kippen des Motorblocks. Somit konnte letztlich die Drehzahl nicht mit dem Laserrotationsvibrometer ermittelt werden. Aus den fehlgeschlagenen Messungen kann der Schluss gezogen werden, dass derartige Betriebsmessung am Motor nur im ausgebauten und fest eingespannten Zustand erfolgreich durchgeführt werden können. Einerseits um die beiden Laserstrahlen korrekt ausrichten zu können und andererseits um das Kippen des Motorblocks auf ein ausreichend geringes Maß zu minimieren.

3.2. Durchführung der Drehzahlmessung über den elektrischen Abgriff der Zündung

Aus der Aufgabenstellung ging hervor, dass der elektrische Abgriff an der Zündung, ein alternatives Vorgehen zur Laservibrometrie darstellt.

Der Abgriff wurde am Pol 3 an einem der vier Zündspulenstecker realisiert. Die Aufzeichnung der Zündspannungsimpulse wurde über einen National Instruments 9232 AD- Wandler vorgenommen. Dabei musste die Ausgangsspannung der Zündanlage an das Eingangsmodul des AD- Wandlers angepasst werden. Dafür griff man auf eine Optokopplerschaltung zurück, welche nach [MG13 2016] bereits für die Drehzahlermittlung entwickelt wurde und erfolgreich zum Einsatz kam. Die Schaltung bietet einen hochohmigen Eingang, damit die Spannung am Zündspulenstecker nicht zusammenbricht und der Motor nur auf drei Zylindern läuft. Weiterhin dient die galvanische Trennung der Schaltung dazu, den Eingangskanal des AD- Wandler vor Überspannung

zu schützen und unterbricht möglich auftretende Masseschleifen. Diese könnten durch Kontakt eines Beschleunigungssensors mit der Karosserie auftreten, da somit der Stromkreis des Fahrzeugs mit dem des Wandlers in Kontakt steht. Die Masse wurde am Motorgehäuse angelegt.

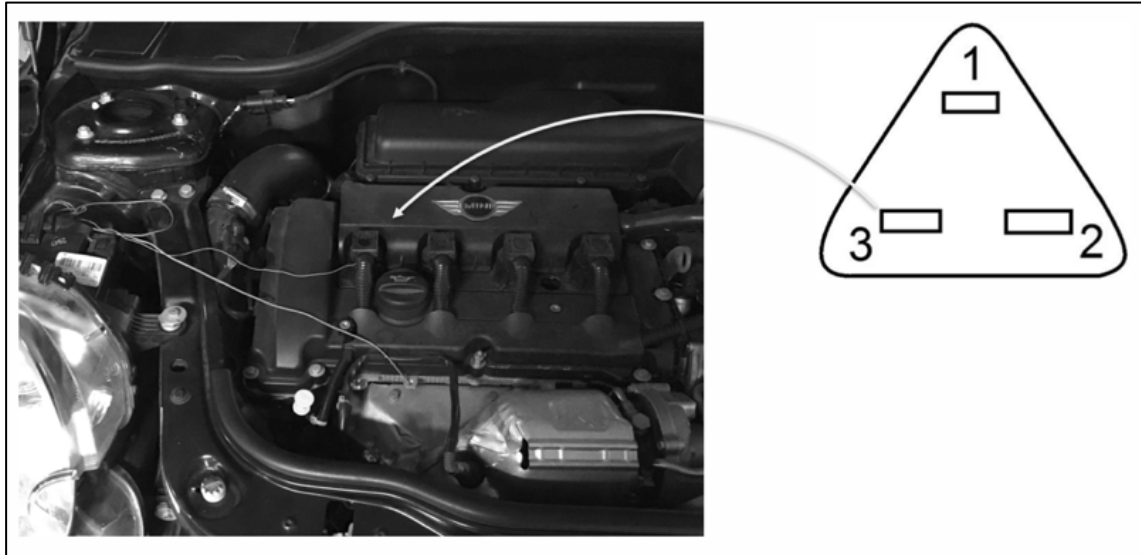


Abbildung 13 Position des verwendeten Zündspulensteckers am Motor und Pol des Spannungsabgriffs

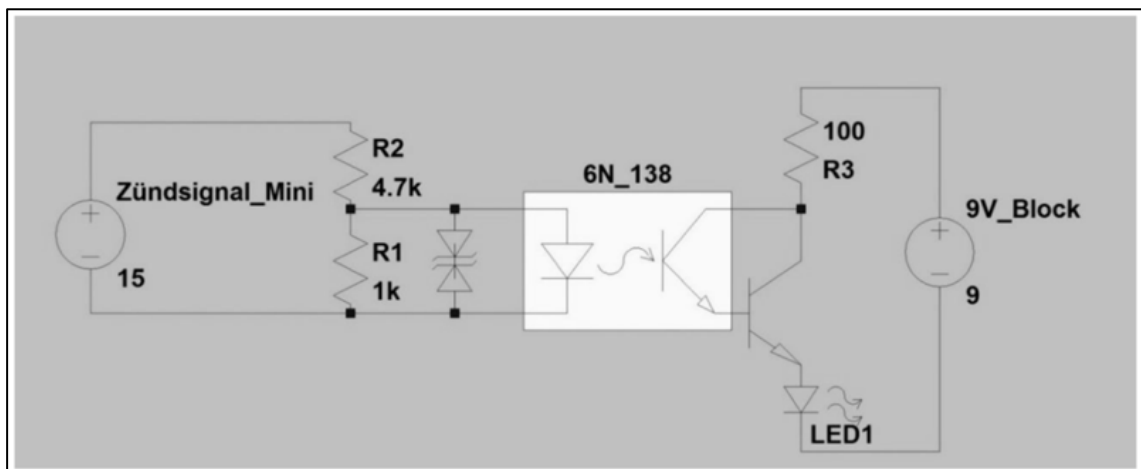


Abbildung 14 Schaltplan der verwendeten Optokopplerschaltung zur elektrischen Anpassung von Zündspule und Eingangskanal des AD-Wandlers National Instruments 9232 [MG13 2016]

„Das abgegriffene Signal besteht aus einer Konstantspannung von 13,8V, die im Moment der Zündung des Zylinders kurz unterbrochen wird, auf etwa 25V überschwingt und nach wenigen Millisekunden wieder auf 13,8V zurückfällt.“ [MG13 2016]

Die Optokopplerschaltung beseitigt für die Aufzeichnung den Offset und begrenzt die Spitzenspannung auf ca. 7 V. In Kap. 3.6 wird näher auf die erzielten Messergebnisse eingegangen.

3.3. Durchführung der Luftschallmessung mit Einzelmikrofonie

Da ein herkömmliches Messmikrofon mit einem Durchmesser von $\frac{1}{2}$ " nur bis ca. 2 kHz verwertbare Messergebnisse liefern und damit wenig Einblicke in Obertöne des Motorengeräusches geben würde, wurde ein ebenso standardmäßiges $\frac{1}{4}$ " Messmikrofon als Einzelmikrofon verwendet. Aufgrund der Analogie zu Messungen in geschlossenen Räumen wurde im Fahrzeuginnenraum auf ein diffusfeldkalibriertes Mikrofon mit Kugelcharakteristik zurückgegriffen. Die praktisch einfachere Realisierung der Stromversorgung (von 2 bis 10 mA) gab den Ausschlag für die Verwendung eines stromgespeisten (ICP) Elektretmikrofons. [vgl. Microtech Gefell 2005] Ein Microtech Gefell M365 stellte sich mit diesen Merkmalen und einem messbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 12 kHz als geeignet heraus. [vgl. Sinus Messtechnik (o. J.)]



Abbildung 15 Microtech Gefell M365

Das Einzelmikrofon wurde auf Kopfhöhe des Beifahrers angebracht, da die Steuerung des Motorhochlaufs vom Fahrersitz aus erfolgen musste. Dennoch sollte diese Position vor allem vergleichbare Werte mit der von der gleichen Position ausgehenden Kunstkopfmessung gewährleisten. Bei Durchführung der Messung musste aufgrund der Verkabelung das Autofenster einen kleinen Spalt geöffnet werden. Dies könnte das Schallfeld im Fahrzeuginnenraum beeinflussen, da dieser nicht mehr vollständig geschlossen ist. Damit könnte es zu Fehlern durch die Diffusfeldkalibrierung gekommen sein. Nach einem Motorhochlauf konnte diese Messung aufgrund eines Fahrzeugdefektes nicht optimiert werden.

3.4. Durchführung der Luftschallmessung mit Kunstkopfmikrofonie

Die Anbringung des Kunstkopfes erfolgte aus den in 3.3. genannten Gründen auf dem Beifahrersitz. Aufgrund der Stromversorgung mussten auch hier Kabel nach draußen gelegt werden und die Fensterscheibe leicht geöffnet bleiben. Aufgrund des während der Durchführung auftretenden Defektes des Fahrzeuges konnte die Kunstkopfmessung nicht durchgeführt werden.



Abbildung 16 Kunstkopfmikrofonie im Fahrzeug

3.5. Durchführung der Schwingungsmessung

Wie im theoretischen Teil zur Schwingungsmessung erläutert, existieren verschiedene Arten von Sensoren, auf die bei solch einer Messung zurückgegriffen werden können. Aufgrund der Schwierigkeit im Fahrzeuginnenraum einen festen Bezugspunkt für Relativaufnehmer zu finden und allgemein aufgrund des mangelnden Platzes, fiel die Wahl des Sensors auf einen Absolutaufnehmer. Um aus den drei möglichen Bauformen eine zu wählen, die sich für die Durchführung der Messung an der Beifahrersitzschiene eignet, wurden Überlegungen zum Frequenzmessbereich und den herrschenden Bedingungen bei der Messung angestellt. Bei der Erfassung des Luftschalls wurde der Messbereich, durch das ausgewählte ¼" M365 Mikrofon von Microtech Gefell, auf eine obere Grenzfrequenz von 12000 Hz begrenzt. Da es jedoch für alle drei Bauarten von Beschleunigungssensoren einen Vertreter für diesen Frequenzbereich gibt, war dieses Kriterium für eine Entscheidung nicht mehr aussagekräftig. Weiter wurde entschieden eine robuste Bauform zu wählen, um mögliche Schäden bei Messungen zu vermeiden. Deshalb wurde der Biegeschwinger

außer Betracht gezogen. Um nun störungsfreie Messungen, wie zum Beispiel durch das Ankoppeln vom umgebenden Luftschallfeld, gewährleisten zu können, wurde der Verlust an Empfindlichkeit und somit einem hohen Übertragungskoeffizienten in Kauf genommen. Letztlich fiel die Entscheidung auf den 352C33 Sensor von PCB® Piezotronics. Sein nutzbarer Frequenzbereich, dessen Grenzen bei 5 % Abweichung von der Kalibration liegen, erstreckt sich von 0,5 bis 10000 Hz. Dank der, statt eines Quarzkristalls, verbauten Piezokeramik weist dieser Sensor trotz seiner Bauweise eine recht hohe Empfindlichkeit von $10,2 \frac{\text{mV} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$ auf. Da es sich um einen IEPE-Aufnehmer mit integrierter Signalaufbereitung handelt, ist es nötig ihn laut Hersteller mit einem Polarisationsstrom von 2 – 20 mA zu versorgen. [vgl. PCB® Piezotronics] Dies soll eine unkomplizierte Übertragung und Verarbeitung der erfassten Daten ermöglichen.



Abbildung 17 PCB352C33 Beschleunigungssensor auf der Beifahrersitzschiene des BMW Mini

Der ausgewählte Beschleunigungssensor wurde für die Messung am BMW Mini an der Beifahrersitzschiene 8 cm von ihrem Rand mit Bienenwachs befestigt. [Abb. 17] Die Anbringung an der Beifahrerseite wurde aus dem Grund gewählt, dass die Steuerung des Motorhochlaufs vom Fahrersitz aus erfolgte und die Befürchtung bestand, dass das Schwingverhalten der Sitzschiene durch eine Person zu sehr beeinflusst wird. Die 8 cm Entfernung resultieren aus der Bedingung, dass der Sensor sich nicht in einem Schwingungsknoten und ebenso nicht zu nah am Rand der Schiene befinden soll. Das erhärtete Bienenwachs dient als starre Ankopplung des Sensors an das Messobjekt, da Befestigungsstoffe hoher Steifigkeit den Frequenzbereich des Sensors nicht bedeutend verkleinern. Zur Datenerfassung wurde der 352C33 Sensor mit einem BNC Kabel von 10 m Länge an den National Instruments 9323 AD-Wandler angeschlossen,

der die Zuschaltung einer Konstantstromquelle für IEPE- Aufnehmer ermöglicht. Parallel zur Schwingungsmessung wurden auch die Zündimpulse für die Drehzahlmessung erfasst, um zwei zeitlich synchronisierte Messsignale zur späteren Verarbeitung zu erhalten. [siehe Kap. 2.6] Der Motorhochlauf wurde für 120 Sekunden aufgenommen und die erfassten Daten in einem Zeitvektor und einer Messdatenmatrix gespeichert. Bei der Betrachtung des Ergebnisses der Schwingungsmessung musste festgestellt werden, dass das Messsignal anfänglich sehr schwach ist und daher keinen hohen Signal-Rausch-Abstand besitzt. Dies könnte auf den zu geringen maximalen Versorgungsstrom von 4 mA des genutzten AD-Wandlers zurückzuführen sein. Aufgrund eines Fahrzeugdefekts konnte diese Messung jedoch nicht weiter fortgeführt und optimiert werden.

3.6. Datenverarbeitung in MATLAB®

Um letztendlich ein Campbell-Diagramm aus den erfassten Daten zu erhalten, muss zum einen das Messsignal der Drehzahlen aufbereitet und alle erfassten Daten in MATLAB® dafür vorbereitet werden. Es soll gezeigt werden, wie bei der Bearbeitung der Messdaten vorgegangen wurde.

3.6.1. Aufbereitung und Erstellen des Drehzahlvektors

Wie in 3.2 beschrieben konnten am elektrischen Abgriff des Zylinders dessen Zündspannungsimpulse aufgezeichnet werden. Da es in der Realität keinen unendlich kurzen Impuls gibt und die zeitliche Auflösung dieser Aufzeichnung sehr hoch ist, führte es dazu, dass aus den Zündimpulsen in MATLAB® Spitzen mit zeitlichem An- und Abstieg entstanden sind.

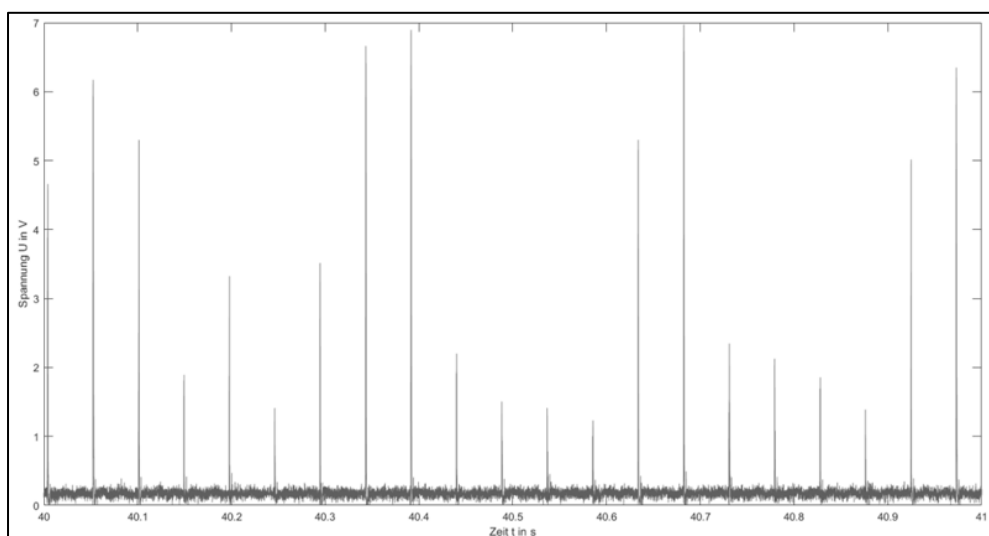


Abbildung 18 Zündspannungsimpulse am elektrischen Abgriff des Zylinders

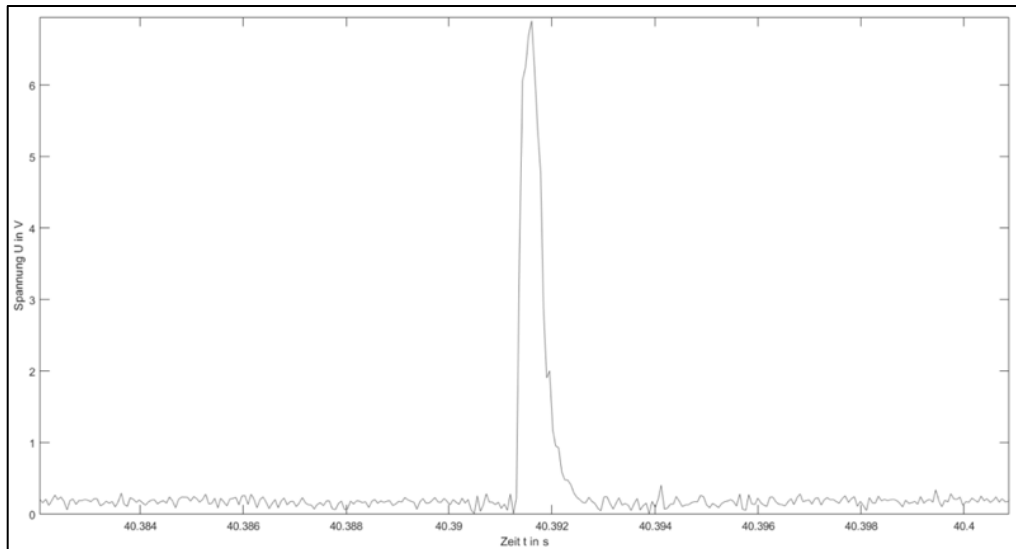


Abbildung 19 Einzelner Zündimpuls des Zylinders

Um aus den Zündimpulsen nun einen Drehzahlvektor zu gewinnen, ist es notwendig das Messsignal in eine reine Impulsfolge umzuwandeln. Um dies zu erreichen wurden in MATLAB® „if“-Abfragen verwendet, die mithilfe von „for“-Schleifen für den ganzen Ergebnisvektor wiederholt wurden. Für jeden einzelnen Wert des Vektors wurde überprüft, ob dieser einen selbst gewählten Schwellenwert überschreitet. Ist das der Fall, wird dieser Wert auf „1“ gesetzt. Wird der Schwellenwert unterschritten wird der Wert auf „0“ gesetzt. Als Schwellenwert wurden 5 V gewählt, um die Maxima so weit einzugrenzen, dass folgende Bearbeitungsschritte präzise Ergebnisse lieferten, ohne dass Fehler durch fehlende Maxima, aufgrund eines zu hohen Schwellenwertes, entstehen. Die nun aufeinander folgende „1“-Werte bilden eine Reihe von sehr kurzen Rechteckfunktionen. Um aus diesen Rechteckfunktionen Impulse zu machen, wurde eine weitere Abfrage mit zwei Bedingungen gestellt. (1) Ist die Differenz des Wertes und seinem Vorgänger gleich 1, bleibt der Wert „1“. (2) Ist die Differenz ungleich 1 wird der Wert auf „0“ gesetzt. Damit diese Logik umsetzbar ist, wurde das Ergebnis in einen neuen Vektor geschrieben. In der Theorie ergibt sich die Drehzahl aus der zeitlichen Differenz von zwei Impulsen. Da es sich beim BMW Mini um einen Vierzylindermotor handelt, zündet ein Zylinder aller zwei Umdrehungen der Kurbelwelle. [vgl. 2.1.3] Somit lässt sich die Drehzahl manuell aus der Gleichung Gl.(7) berechnen, die zur Kontrolle des Impulsvektors herangezogen wurde. Die so herausgefundenen fehlerhaften Impulse wurden entfernt und der Impulsvektor vollständig aufbereitet.

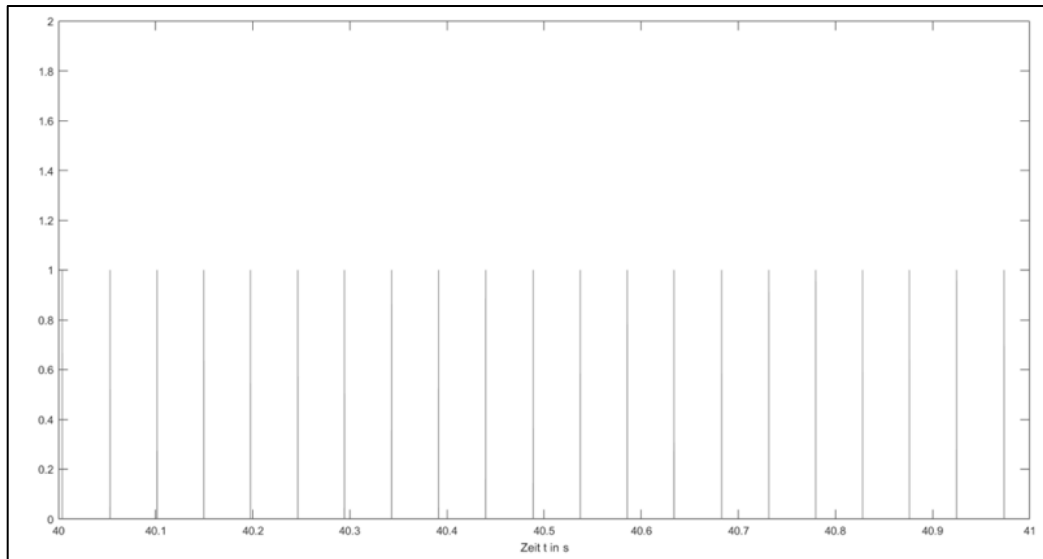


Abbildung 20 Aus den Zündimpulsen erstellte ideale Impulsfolge

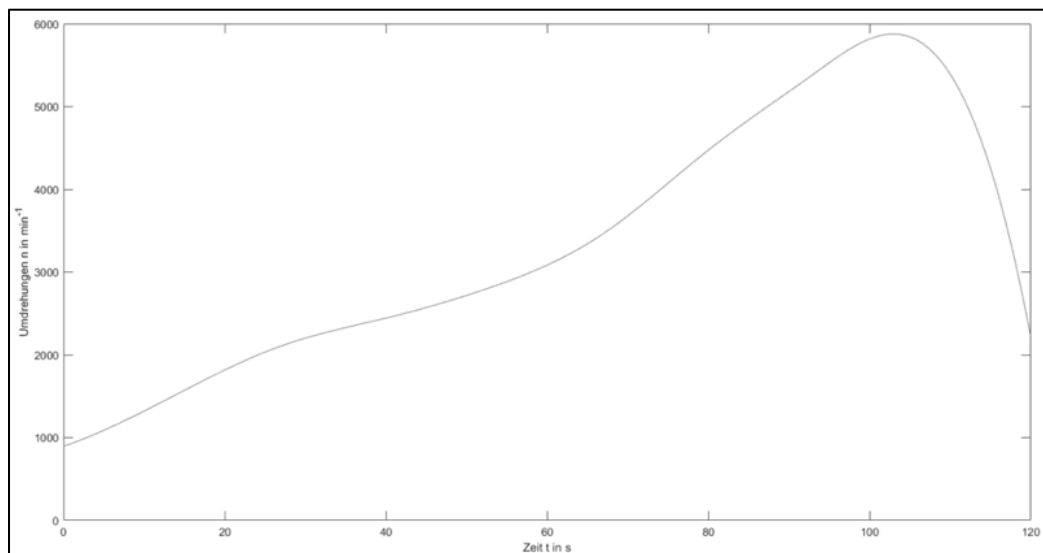


Abbildung 21 Motordrehzahl in Abhängigkeit von der Zeit

Dank der in MATLAB® integrierten Funktion „rpm = tachorpm(x,Fs)“ konnte mithilfe der bei der Datenerfassung eingestellten Abtastfrequenz und dem Impulsvektor ein Drehzahlvektor gleicher Länge berechnet werden. Die Länge des Vektors ist für die nachfolgenden Arbeitsvorgänge von großer Bedeutung, da ein Frequenzspektrum einer bestimmten Drehzahl zugeordnet werden muss.

Da es ab ca. 105 Sekunden zu einem Abfall der Drehzahl kommt und für die Frequenzanalyse nur der Hochlauf von Interesse ist, wurde der Drehzahlvektor auf seinen Anstieg untersucht und sobald dieser negativ wurde der Index dieser Drehzahl abgerufen, um alle Messsignale auf diese Länge zu kürzen.

3.6.2. Frequenzanalyse der Luftschall- und Schwingungsmessung und das Campbell-Diagramm

Im nächsten Schritt wurde eine Kurzzeit-Fourier-Transformation der Luftschall- und Schwingungsmessung durchgeführt. Dies erfolgte mit dem veralteten Befehl „y = specgram(x)“, der die gleiche Funktion wie der aktuelle Befehl „y = spectrogram(x)“ besitzt, jedoch eine unterschiedliche Syntax verwendet. Für die Analyse wurde (1) eine Fensterfunktion mit einem 8192 Werte breiten Hanning-Fenster und (2) die prozentuale Überschneidung zweier nebeneinander liegender Fenster auf 25% festgesetzt. Als Ergebnis der Spektralanalyse erhielt man die drei Vektoren (1) B, der die Information der Spektralanalyse enthält, (2) F als Vektor, der die Frequenzskala zur späteren Darstellung enthält und (3) Vektor T, der für die Zuordnung der Spektren zu einem genauen Zeitpunkt bestimmt ist. [Abb. 22]

```
nfft      = 8192;
noverlap  = floor(0.25*nfft);
window    = hanning(nfft);

[B,F,T] = specgram(data2,nfft,Fs>window,noverlap);

idx      = round((T*Fs+1));
rpmT     = rpm(idx);
```

Abbildung 22 Auszug aus dem MATLAB® Skript zur Erstellung eines Campbell-Diagramms, Frequenzanalyse und Drehzahlabhängigkeit

Um nun die Zeitabhängigkeit des Spektrums in eine Drehzahlabhängigkeit umzuwandeln, wird der Vektor T mit der Abtastfrequenz F_s multipliziert, wodurch sich ein Vektor mit Indices ergibt. Ein Frequenzspektrum ist also zu der Drehzahl des jeweiligen Index zugehörig. Diese Drehzahlen sind in einen neuen Vektor, in diesem Versuch „rpmT“ benannt, zu schreiben.

Letztlich gilt es das Campbell-Diagramm zu zeichnen. Für diesen Schritt wurde der „surface“-Befehl benutzt, der wie in 2.4 beschrieben ein dreidimensionales Diagramm erzeugt. Die Abszissenachse stellt die Frequenzachse und somit der Vektor F und die Ordinatenachse die Drehzahl, also der neue Vektor „rpmT“ dar. Die Farbe, als die dritte Dimension des Diagramms, wird durch den Pegel des Betragsspektrums bestimmt. Die Darstellung besteht aus kleinen farbigen Kästchen, die den Pegel in Abhängigkeit von Drehzahl und Frequenz ausdrücken. Um die Kastenränder zu entfernen und einen kontinuierlichen Farbverlauf zu erstellen diente der Befehl „shading('interp')“, der die Farben zwischen den Kästchen interpoliert. [Abb. 23]

```
surface(F, rpmT, 20*log(abs(B)));  
shading('interp');
```

Abbildung 23 Auszug aus dem MATLAB® Skript zur Erstellung eines Campbell- Diagramms“, zeichnen des Diagramms und Interpolation der Farben

4. Präsentation der Ergebnisse

4.1. Auswertung der Luftschallmessung mittels Einzelmikrofonie

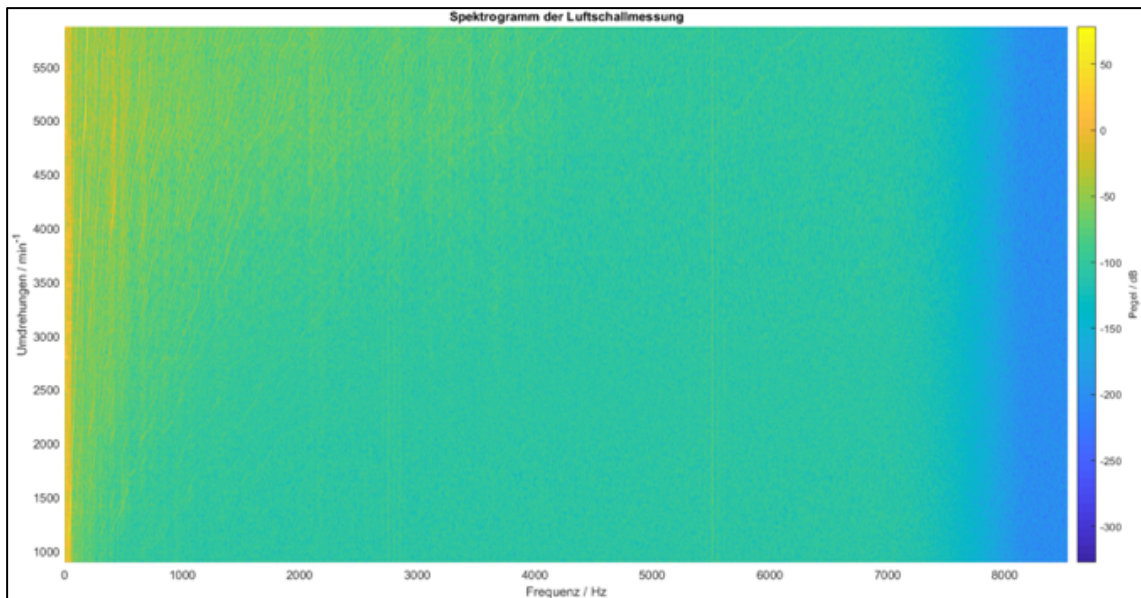


Abbildung 24 Campbell-Diagramm der Einzelmikrofonie über die Frequenz von 0 bis 8000 Hz

Wie in Abbildung 18 erkennbar wird, weist die Luftschallmessung nur im Frequenzbereich $\ll 1000$ Hz Pegel über 0 dB auf. Somit ist eine Betrachtung bis 500 Hz für die Auswertung von Vorteil.

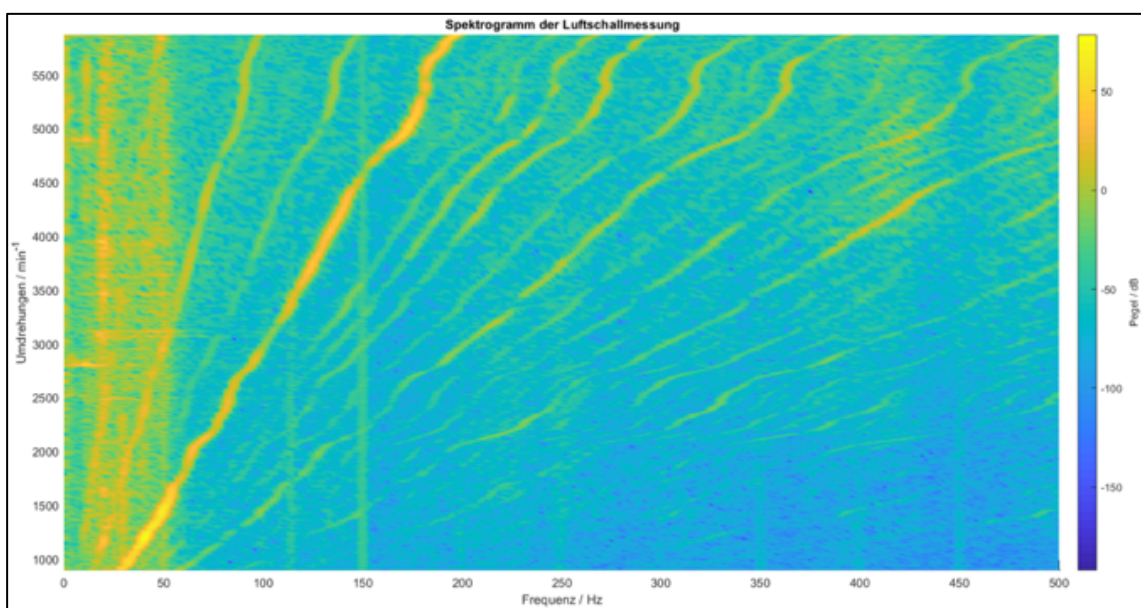


Abbildung 25 Campbell-Diagramm der Luftschallmessung über die Frequenz von 0 bis 500 Hz

In Abbildung 19 werden nun schräge Linien als Ordnungen erkennbar. Besonders hohe Pegel (bis hin zu 50 dB) weist die zweite Ordnung über alle Drehzahlen auf. Sie ist auf den 4-Zylinder-Motor des BMW-Minis zurückzuführen. Zwei Zylinderpaare bewegen sich genau 180° phasenversetzt zueinander. Die zwei Zylinder jedes Paares sind jeweils konphas, jede Umdrehung zündet jedoch abwechselnd nur einer der beiden. Infolgedessen ergeben sich für 4 Zylinder zwei Zündimpulse pro Umdrehung, weshalb die doppelte Frequenz der Motordrehzahl (die zweite Motorordnung) besonders stark erkennbar ist. Weiterhin kann man auch die Grunddrehzahlfrequenz (1. Ordnung) im Spektrum deutlich erkennen. Sie entsteht beispielsweise durch die Drehfrequenz des zum Motor synchronen Turboladers. [vgl. Genuit 2010] Alle weiteren Ordnungen sind nicht durchgängig und nur in geringen Pegeln bis 0 dB zu erkennen. Eine stärkere Stromversorgung hätte hier zu deutlicheren Ergebnissen geführt. Diese Korrektur konnte jedoch aufgrund des Defektes nicht durchgeführt werden.

Von 20 Hz bis 50 Hz sind zudem geradlinig höhere Pegel im Spektrum zu erkennen. In diesem Frequenzbereich könnten Moden des Fahrzeuginnenraums angeregt worden sein.

4.2. Auswertung der Körperschallmessung

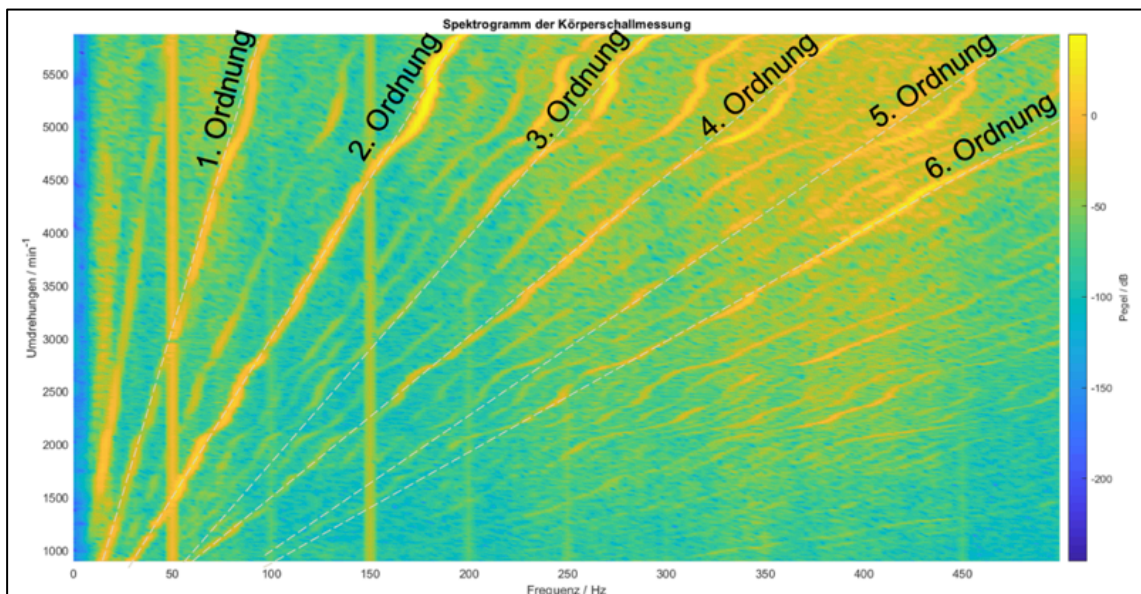


Abbildung 26 ganzzahlige Ordnungen im Körperschalldiagramm über eine Frequenz von 0 bis 500 Hz

Auch im Körperschall-Diagramm lassen sich die in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Ordnungen nachweisen. Zusätzlich sind ganzzahlige weitere Ordnungen sowie Subordnungen (z.B. 1.5. Subordnung) deutlich zu erkennen. Ein Grund für das Auftreten der 1.5. Subordnung sowie der 3. Ordnung könnte die Abgasanlage sein. Besonders die erstere soll im Schub Leistungsvermögen vermitteln und wird dementspre-

chend beim Sounddesign des Fahrzeugs berücksichtigt. Dabei sind Pegel von 20 bis 26 dB zu erwarten, die im gezeigten Campbell-Diagramm nicht ganz erreicht werden.

Bei Betrachtung eines größeren Frequenzbereiches fällt auf, dass bis hin bis zur 10. Ordnung ganzzahlige Vielfache der Drehzahlfrequenz deutlich im Diagramm wiederzufinden sind. Zahnzahlen der in den Ölpumpen befindlichen Zahnräder können Geräusche im Bereich von 6. bis 12. Ordnung hervorrufen.

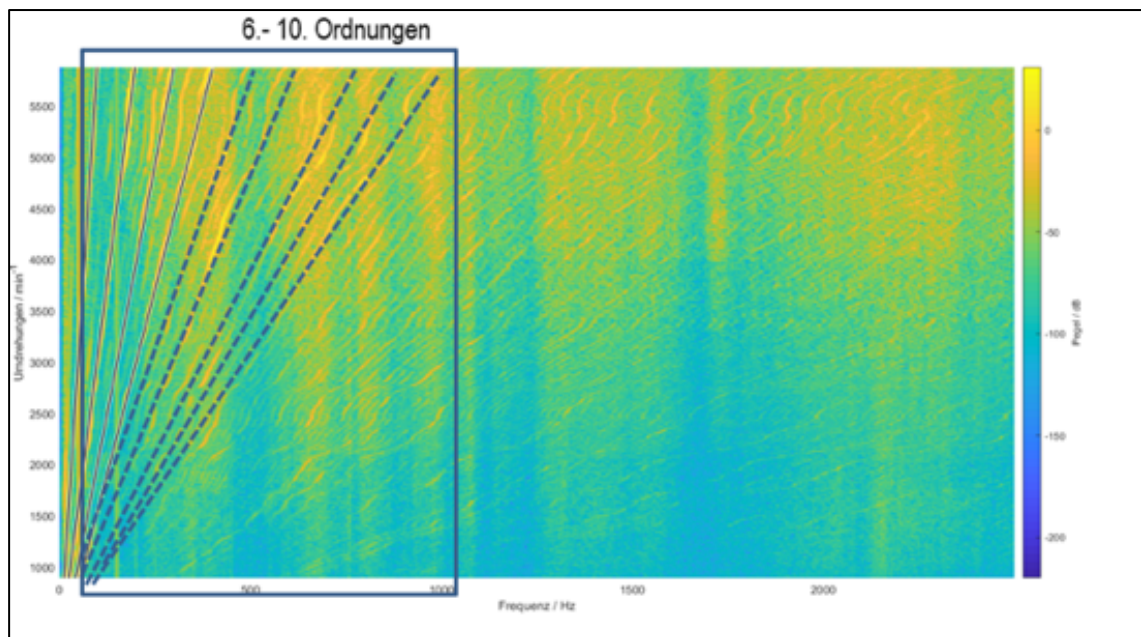


Abbildung 27 Darstellung der 6.-10. Motorordnung als gestrichelte Linien im Körperschalldiagramm

Es fällt auf, dass sowohl bei der Luft- als auch bei der Körperschalldarstellung ein durchgängiger Knick in den Motorordnungen im Drehzahlbereich von 5000 bis 5500 rpm auftritt. In Matlab wurde eine Neuordnung der zuvor zeitabhängigen Drehzahl- und der zugehörigen Frequenzwerte an der y- Achse des Campbell-Diagramms vorgenommen. Dennoch könnte eine stärkere Schwankung am manuell gesteuerten Gaspedal eine Ursache für den Knick sein. In der zugehörigen Drehzahlaufzeichnung kann in dieser Größenordnung allerdings keine deutliche Schwankung festgestellt [siehe. Abb. 22] werden. Da in Matlab in gleichen Zeitabständen eine Drehzahl mit einem FFT-Spektrum verknüpft wird und der Anstieg der Drehzahl bedingt durch die manuelle Bedienung des Gaspedals schwankt, sind auch die Drehzahlinkremente inkonstant. Damit ist die Dichte der vorliegenden Werte in unterschiedlichen Drehzahlbereichen verschieden und es wird mal über ein größeres, mal über ein kleineres Drehzahlinkrement (Abstand zwischen zwei Drehzahlwerten) interpoliert. Dies könnte zu Schwankungen in den Frequenzwerten und zu diesem erkennbaren Knick führen. Die Werte sind somit kritisch zu betrachten. Zum Nachweis dieses Problems bedarf es weiterer Untersuchungen.

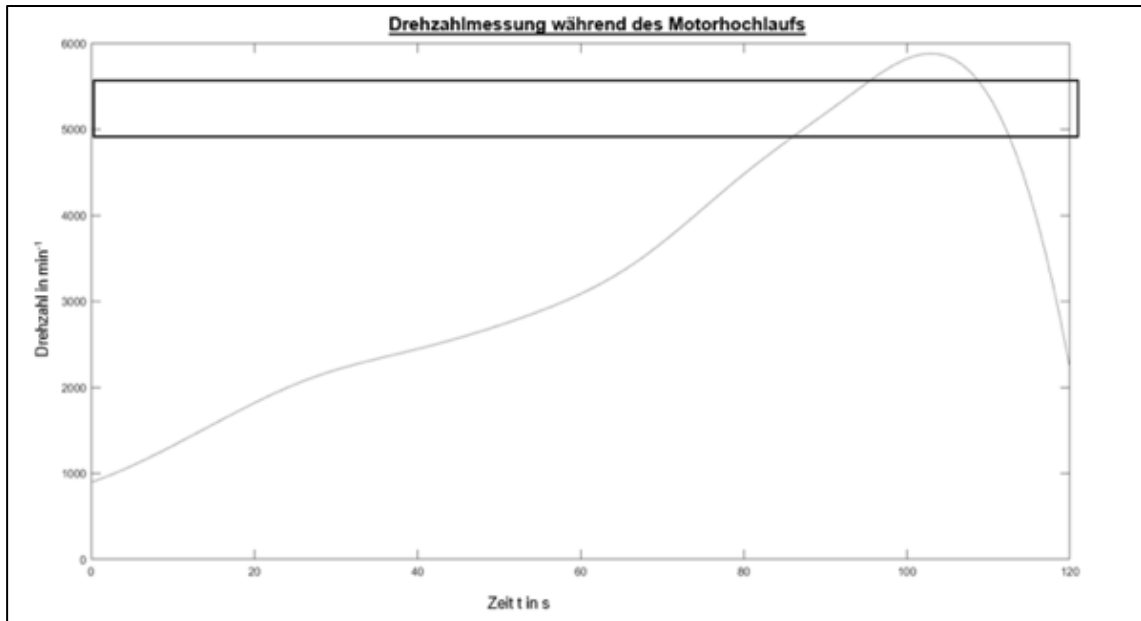


Abbildung 28 Werte der Drehzahlmessung mit Markierung des Drehzahlbereiches von 5000 bis 5500 rpm

Die in 4.1 gezeigten höheren Pegel im Bereich von 20 bis 50 Hz werden in Abbildung 9 nicht durchgängig deutlich. Dies lässt den Schluss zu, dass sich die in diesem Bereich vorliegenden Resonanzen durch das Luftvolumen und die Fahrzeugdimensionen ergeben. Eine ausführliche Modalanalyse wäre unter Berücksichtigung der Fahrzeugdimensionen noch zu führen. Außerdem lassen sich einzelne senkrechte Linien bei einer Frequenz von 50 Hz und deren Vielfachen erkennen. Diese könnten durch die Netzspannung infolge eines Massekontaktes hervorgerufen worden sein.

5. Fazit

Die Inbetriebnahme des Laserrotationsvibrometers konnte erfolgreich durchgeführt und an einem Vorversuch mit einem Lüfter bekannter Drehzahl getestet werden. Messungen am Fahrzeug lieferten jedoch nur im Leerlauf verwertbare Ergebnisse. Die hohe Baudichte im Motorraum und die Neigung des Motorblocks ließen die, für eine Messung benötigte optimale Ausrichtung des Lasers auf ein sich rotierendes Bauteil nicht zu, wodurch sich unplausible Werte einstellten oder es zu einem kompletten Ausfall der Anzeige führte. Die Messung der Motordrehzahl konnte letztlich durch den elektrischen Abgriff an einem Zündspulenstecker erfolgreich realisiert werden.

Die Luftschall- und Schwingungsmessung wurden erfolgreich durchgeführt, sollten jedoch ausgebaut und optimiert werden. Vor allem beim Spektrum des Luftschalls sind die Ergebnisse oftmals für eine tiefgreifendere Auswertung, aufgrund von zu geringer Pegel, nicht deutlich genug erkennbar. Dennoch sind einzelne Ordnungen zu sehen, die für die Auswertung herangezogen werden können. Bei beiden Campbell-Diagrammen sind die erste und zweite Ordnung zu erkennen, wobei die erste Ordnung vom Turbolader hervorgerufen werden kann, der synchron zum Motor läuft. Die zweite Ordnung geht aus der Zylinderanzahl des Motors hervor, da bei einem Vierzylindermotor in einer Umdrehung der Kurbelwelle zwei Zylinder das Luft-Kraftstoffgemisch entzünden. Im Spektrum der Schwingungsmessung an der Beifahrersitzschiene sind deutlich mehr Ordnungen als auch Subordnungen, also nicht ganzzahlige Ordnungen, zu erkennen. Die 1,5. als auch die dritte Ordnung können durch die Abgasanlage entstehen. Besondere Beachtung wird der 1,5. Ordnung geschenkt, da sie dem Fahrer Leistungsvermögen vermitteln soll und zum akustischen subjektiven Eindruck des Fahrzeuges beiträgt. Ölpumpen dagegen können aufgrund ihrer verbauten Zahnräder Geräusche im Bereich der sechsten bis zur zwölften Ordnung hervorrufen.

Das Projekt ermöglichte die Analyse von Luft- und Körperschall im Kraftfahrzeuginnenraum, womit auf Ursachen von Geräuschen geschlossen werden kann. Für die Einschätzung der akustischen Wertigkeit des Fahrzeuges jedoch, ist die Messung mithilfe der Kunstkopfmikrofonie in verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeuges unerlässlich. Nur so können für den Fahrkomfort wesentliche Einflüsse wie zum Beispiel Klappern, Knarzen und Quietschen bei diversen Fahrbahnvoraussetzungen oder Abroll- und Strömungsgeräusche berücksichtigt werden.

Bei nachfolgenden Untersuchungen zu diesem Thema sollte der Optimierung der Messaufbauten große Beachtung geschenkt werden, um fehlerfreie und verwertbare Messungen zu ermöglichen. Die Messinstrumente befinden sich bestenfalls im Fahrzeuginnenraum, um Messungen in verschiedenen Betriebszuständen in einem gänzlich abgeschlossenen Fahrzeuginnenraum zuzulassen. Auch die Messung der Dreh-

zahl kann mithilfe eines OBD (On Board Diagnose) Steckers und dazugehöriger Software direkt im Fahrzeug auch während der Fahrt gemessen werden. Das bietet die Möglichkeit die akustische Wertigkeit des Fahrzeuges richtig einzuschätzen.

Literaturverzeichnis

[Schreiner, 2020]:

Schreiner, K.(2015).Basiswissen Verbrennungsmotor: Fragen – rechnen – verstehen – Prüfung bestehen(2.Auflage).Wiesbaden:Springer Vieweg

[Zimmermann/Schmidgall 2014]:

Zimmermann, W. & Schmidgall, R.(2014). Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur(5.Auflage).Wiesbaden: Springer Vieweg

[Reif 2015]:

Reif, K. et al.(2015).Ottomotor- Management im Überblick.Wiesbaden: Springer Vieweg

[Kollmann/Schösser/Angert 2006]:

Kollmann, K., Schösser, T., Angert, R.(2006). Praktische Maschinenakustik. Heidelberg: Springer

[Genuit 2010]:

Genuit, K.(2010). Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Berlin, Heidelberg: Springer

[PCB Synotech 2016]:

PCB Synotech Mikrophon-Handbuch (2016): in: <https://www.synotech.de/>, [online] https://www.synotech.de/produkte_skript/downloads/marketing/SYN_Mikrophon-Handbuch_Applikationsbroschuere_DEU_1305.pdf [26.02.2020]

[Schulz 2019]:

Schulz, D.(2019). Sound Design. Sound Engineering. Hochschule Mittweida. Mittweida, 09.01.2020

[Teichmann/Merker 2019]:

Eichseder, H.(2019).Verbrennungsmotoren–gestern,heute,morgen.Merker.In G. P. Merker & R. Teichmann(Hrsg.), Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise

und alternative Antriebssysteme, Verbrennung, Messtechnik und Simulation(S.505).Wiesbaden:Springer Vieweg

[MG13 2016]:

Lindner, P., Hennig, D., Ziller, K., Dunkel, J., Kirsch, C., Schubert, E.(2016).Eventmodul II: Campbell Diagramm eines Motorhochlaufes mit LabView.

[Microtech Gefell 2005]:

Microtech Gefell Akustische Messgeräte Preisliste (2005): in: <https://www.yumpu.com/>, [online] <https://www.yumpu.com/de/document/read/29676674/download-preisliste-akustische-messgerate-josephson> [26.02.2020]

[Sinus Messtechnik (o. J.)]:

Sinus Messtechnik Produkt-Katalog (o. J.): in: <https://www.yumpu.com/>, [online] <https://www.yumpu.com/de/document/read/9325534/soundbookde-sinus-messtechnik-gmbh/61> [26.02.2020]

[Kuttner/Rohnen 2019]:

Kuttner, T., Rohnen, A.(2019).Praxis der Schwingungsmessung:Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB®(2., überarbeitete und erweiterte Auflage).Wiesbaden: Springer Vieweg

Anlagen

Anlage 1 Grundlagen der Laserrotationsvibrometrie. Bereitgestellt durch Polytec GmbH.

A Grundlagen des Messverfahrens

Anhang A: Grundlagen des Messverfahrens

A.1 Theorie der interferometrischen Geschwindigkeits- und Wegmessung

Optische Interferenz wird beobachtet, wenn zwei kohärente Lichtstrahlen überlagert werden. Die resultierende Intensitätsschwankung, z.B. an einem Fotoempfänger, variiert mit der Phasendifferenz φ zwischen beiden Strahlen entsprechend der Gesetzmäßigkeit:

$$I(\varphi) = \frac{I_{\max}}{2} \cdot (1 + \cos \varphi) \quad \text{Gleichung A.1}$$

Die Phasendifferenz φ ist mit der optischen Pfaddifferenz L zwischen beiden Strahlen verknüpft entsprechend der Beziehung:

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{L}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.2}$$

λ ... Laserwellenlänge

Wird einer der beiden Strahlen von einem bewegten Messobjekt zurückgestreut (Messstrahl), so wird die Pfaddifferenz zeitabhängig $L = L(t)$. Die Interferenzstreifen wandern am Empfänger und die Positionsänderung des Messobjekts kann durch vorzeichengenaues Zählen der Streifendurchgänge ermittelt werden.

Die Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Messstrahls ist mit der Pfaddifferenz L verknüpft entsprechend der Gleichung:

$$\frac{dL(t)}{dt} = v(t) \cdot 2 \quad \text{Gleichung A.3}$$

Für den Fall einer gleichförmigen Bewegung v gilt:

$$\left| \frac{dL(t)}{dt} \right| = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = f_D \cdot \lambda = |v| \cdot 2 \quad \text{Gleichung A.4}$$

mit

$$f_D = 2 \cdot \frac{|v|}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.5}$$

Eine Bewegung des Messobjekts führt daher zu einer Frequenzverschiebung beim Messstrahl, die als Dopplerfrequenz f_D bezeichnet wird. Überlagert man den frequenzverschobenen Messstrahl und den internen Referenzstrahl, d.h. zwei elektromagnetische Wellen mit wenig verschiedenen Frequenzen, wird am Empfänger eine Schwebung erzeugt, deren Frequenz gleich der Dopplerfrequenz ist. Die Gleichung f_D (A.5) zum Bestimmen der Geschwindigkeit ist unabhängig von deren Vorzeichen. Die Richtung der Geschwindigkeit kann durch Einführen einer zusätzlichen, festen Frequenzverschiebung f_B im Interferometer bestimmt werden, zu der sich die Dopplerfrequenz vorzeichen-genau addiert.

A Grundlagen des Messverfahrens

Für die resultierende Frequenz am Detektor f_{mod} erhält man damit:

$$f_{\text{mod}} = f_B + 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.6}$$

Derartig richtungssensitive Interferometer werden heterodyn genannt.

A.2 Interferometrische Erfassung der Winkelgeschwindigkeit

Jedem Punkt am Umfang eines mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotatorisch bewegten Körpers lässt sich eine Tangentialgeschwindigkeit v_t zuordnen, die vom Rotationsradius R abhängt. Diese translatorische Geschwindigkeit kann in zwei beliebig orientierte, aber senkrecht aufeinanderstehende, translatorische Geschwindigkeitskomponenten zerlegt werden. In der nachfolgenden Abbildung sehen Sie die Vektordarstellung einer solchen Geschwindigkeitszerlegung für zwei Punkte am Umfang eines rotierenden Körpers beliebiger Gestalt, wobei eine der Geschwindigkeitskomponenten jeweils in die Einfallsrichtung des Laserstrahls gelegt wurde.

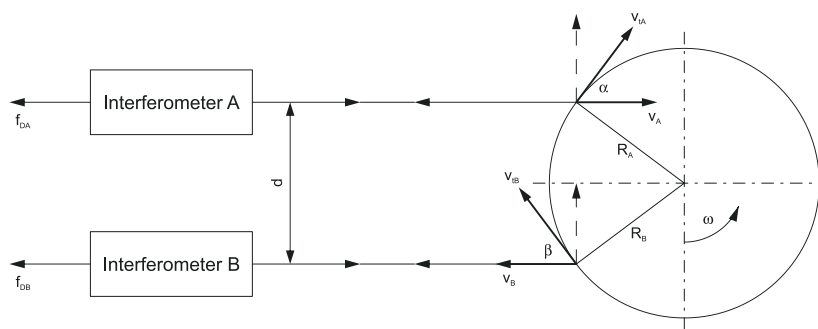


Abbildung A.1: Erfassen der Winkelgeschwindigkeit durch Zweipunktmessung

Wie im Folgenden gezeigt wird, gelingt es, durch Messen zweier paralleler translatorischer Geschwindigkeitskomponenten auf die Winkelgeschwindigkeit ω zu schließen. Eine aus zwei Interferometern bestehende Messanordnung mit zwei parallel im Abstand d angeordneten Laserstrahlen erfasst die Geschwindigkeitskomponenten v_A und v_B . Wegen der vektoriellen Zerlegung gelten die beiden Beziehungen:

$$v_A = v_{tA} \cdot \cos \alpha = \omega \cdot R_A \cdot \cos \alpha \quad \text{Gleichung A.7}$$

$$v_B = v_{tB} \cdot \cos \beta = \omega \cdot R_B \cdot \cos \beta \quad \text{Gleichung A.8}$$

A Grundlagen des Messverfahrens

Die in Richtung der Laserstrahlen wirkenden Geschwindigkeitskomponenten v_A und v_B erzeugen, wie im vorhergehenden Abschnitt dargelegt wurde, in den zurückgestreuten Laserstrahlen die Dopplerfrequenzverschiebungen f_{DA} und f_{DB} . Für diese gelten die beiden Beziehungen:

$$f_{DA} = \frac{2v_A}{\lambda} = \frac{2(\omega \cdot R_A \cdot \cos \alpha)}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.9}$$

$$f_{DB} = \frac{2v_B}{\lambda} = \frac{2(\omega \cdot R_B \cdot \cos \beta)}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.10}$$

Der geometrische Zusammenhang zwischen dem Abstand d der Laserstrahlen und den Winkeln α und β bei gegebenen Radien R_A und R_B lässt sich beschreiben durch:

$$d = R_A \cdot \cos \alpha + R_B \cdot \cos \beta \quad \text{Gleichung A.11}$$

Aus dieser Beziehung erhält man für die Summe der Dopplerfrequenzverschiebungen:

$$f_D = f_{DA} + f_{DB} = \frac{2d \cdot \omega}{\lambda} \quad \text{Gleichung A.12}$$

Damit ist die resultierende Dopplerfrequenzverschiebung nur von den Systemkonstanten d und λ und der Winkelgeschwindigkeit ω abhängig. Beachten Sie, dass die Beiträge der Doppleranteile f_{DA} und f_{DB} von der relativen Lage der Laserstrahlen zur Drehachse abhängen. Bei genau symmetrischer Anordnung (d.h. Drehachse genau in der Mitte zwischen den Strahlachsen) sind die Geschwindigkeitskomponenten v_A und v_B und somit auch die Doppleranteile betragsmäßig gleich. Bei asymmetrischer Anordnung verschieben sich die Anteile. Trifft ein Laserstrahl genau radial auf das Messobjekt, so existiert in diesem Fall natürlich keine Komponente der Tangentialgeschwindigkeit, und der entsprechende Doppleranteil ist Null. Die gesamte der momentanen Winkelgeschwindigkeit proportionale Dopplerfrequenzverschiebung muss dann vom jeweils anderen Interferometerkanal aufgebracht werden. Dies ist der Grund für die im ABSCHNITT 4.3.2 erwähnte Einschränkung des Drehzahlmessbereichs bei asymmetrischer Ausrichtung der Systemachse zur Drehachse.

Berücksichtigt man die Vorzeichen der Winkelfunktionen und der Geschwindigkeitskomponenten, so lässt sich leicht zeigen, dass eine zusätzlich vorhandene translatorische Bewegungskomponente in der Richtung der Laserstrahlen keinerlei Einfluss auf die Größe der resultierenden Dopplerfrequenzverschiebung hat, da sie sich gleichsinnig den beiden Geschwindigkeiten v_A und v_B überlagern würde. Dies gilt sowohl für den in ABBILDUNG A.1 dargestellten Fall der symmetrischen oder asymmetrischen Ausrichtung des Messsystems, als auch für den einseitigen Fall (s. ABSCHNITT 4.3.2).

Eine in ABBILDUNG A.1 senkrecht wirkende translatorische Komponente bliebe ebenfalls ohne Einfluss, da eine senkrecht zum Laserstrahl eines Interferometers gerichtete Bewegung keinen messbaren Effekt hervorrufen kann. Da jede translatorische Bewegung des zu messenden Körpers durch eine Komponente in Richtung der Laserstrahlen und eine dazu senkrecht stehende repräsentiert wird, ist das Verfahren prinzipiell unempfindlich für Translationsbewegungen.

A Grundlagen des Messverfahrens

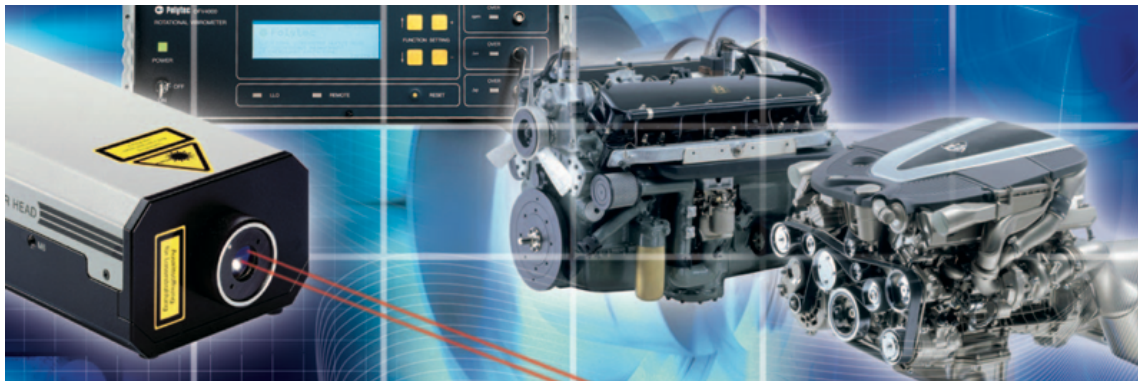
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch eine Zweipunkt-Geschwindigkeitsmessung mit der in **ABBILDUNG A.1** dargestellten Anordnung das Erfassen der reinen Rotationskomponente eines bewegten Körpers, unabhängig von dessen Gestalt, prinzipiell realisierbar ist. Grundlage dafür ist die Fähigkeit eines Laser-Doppler-Interferometers, ausschließlich Geschwindigkeitskomponenten in der Einfallrichtung des Laserstrahls zu erfassen.

Anlage 2 Broschüre Laserrotationsvibrometer Polytec OFV 4000 mit
technischen Daten.



4000 Series Rotational Vibrometer

Non-Contact Laser Measurement of Torsional and Angular Vibration

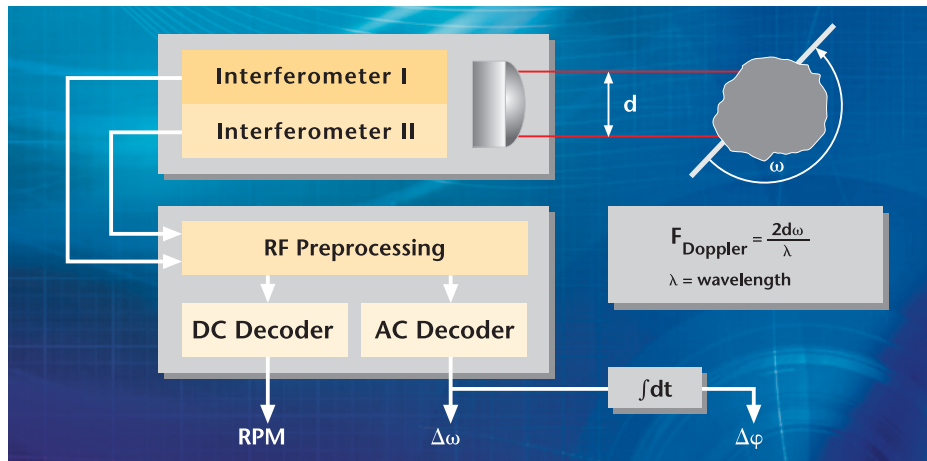


**Fast
Accurate
Convenient**





Principle of Operation



Advancing Measurements by Light

The 4000 Series Rotational Vibrometer uses two parallel laser beams which exit the OFV-400 front lens and strike the rotating surface. Each back-scattered laser beam is Doppler shifted in frequency by the surface velocity vector in the beam direction.

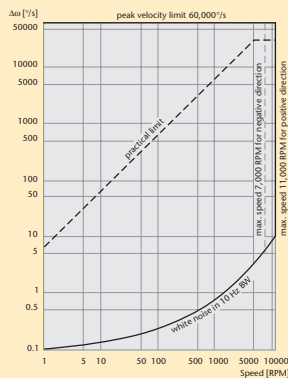
This velocity is made up of rotational and lateral components. Raw velocity information from each beam is independently sent to the OFV-4000 for processing. Using a simple geometric relationship, the difference of the two velocity components is a direct measure for the pure rotational velocity of the object and eliminates lateral vibrations.

The advantage of Polytec's dual interferometer approach lies in optical gain that is orders of magnitude higher than designs using only one interferometer operating in an optically differential mode. The resulting high optical sensitivity allows measurements on poorly reflecting surfaces, thereby increasing the range of applications and ease of use. For measuring positive and negative rotations as well as vibrations around zero RPM, a Bragg cell is incorporated into the dual interferometer. The Bragg cell produces a constant angular velocity offset by frequency shifting the laser beams.

For more information about how a Rotational Vibrometer works please visit our vibrometer university website:

www.polytec.com/usa/vib-university

Operating range of the rotational vibrometer



Rotational Vibrometer



Improvement of Rotating Parts and Structures

Polytec's rotational vibrometers measure angular velocity and displacement without contact from rotating structures such as crankshafts, axels and pulleys. The vibrometer's large standoff distance makes repositioning the laser probe fast, safe and convenient and enables the precision measurement of operating machinery at several locations without interruption. As proof of its success, automotive design and test engineers have skilfully used rotational vibrometer data to reduce engine noise and to increase product durability.



Designed for Accurate Measurements

The Polytec 4000 Series Rotational Vibrometer system is a portable, non-contact laser Doppler system for measuring angular vibrations on rotating structures. Designed to be eye-safe and simple to set-up and operate, the Rotational Vibrometer provides accurate measurements without enhancing the rotating surface with retro-reflective materials. Combining these features with the large standoff distance gives the test engineer the flexibility of setting up, making a measurement, tearing down and repositioning to other locations without stopping the machinery under test. Additionally, the large standoff distance and excellent sensitivity permit measure-

ments on hot surfaces where it is not possible to artificially improve reflectivity. Finally, the accuracy of the data is independent of the measured rotating surface shape.

Conventional contact transducers are subject to wear and slippage leading to unplanned maintenance. The Polytec Rotational Vibrometer can be remotely located and is not subject to the harsh conditions necessitated by close proximity to the measurement location. Another advantage of the Polytec design is its ability to measure anywhere within the range $-7,000$ RPM to $+11,000$ RPM including directional changes, torsional transients and rotational vibrations around the rest position.

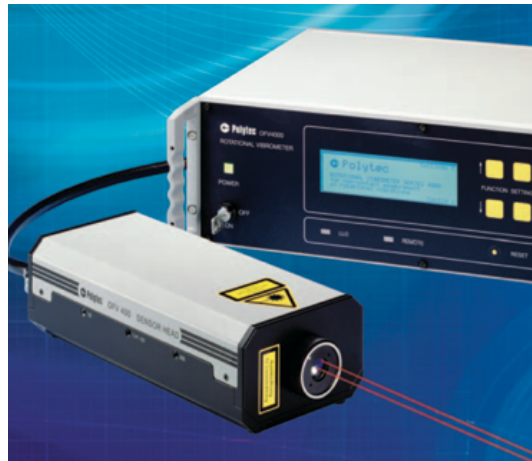
Measuring Angular Vibration

Features

- Measures angular velocity and displacement from $-7,000$ RPM to $+11,000$ RPM
- Senses direction, measures velocities and vibrations around standstill
- Portable, eye-safe class 2 visible laser
- OFV-400 Sensor Head conveniently mounts to standard tripods and customized positioners
- IEEE-488 and RS-232 interfaces for remote control and fast data transfer (RPM)
- Separate analog outputs for angular velocity and vibration amplitude (angle)

Benefits

- Wide dynamic range for high speeds, fast transients and fine resolution
- Simple set-up and easy-to-use menu-driven operation
- High efficiency optics gather sufficient light even from untreated surfaces where no contact is possible
- Eliminates down-time associated with contact methods
- Easily repositioned to different areas of rotating machinery



The System

The 4000 Series Rotational Vibrometer comprises the OFV-400 Optical Sensor Head and the OFV-4000 Controller.

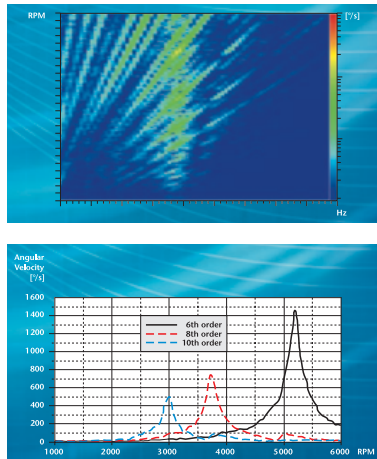
Polytec's long-standing experience in the development of laser vibrometers has been applied to the design of the OFV-400 Measuring Head, with a compact dual interferometer whose high optical sensitivity enables high resolution measurements on untreated objects. Signals from the OFV-400 are processed by the OFV-4000 Controller/Power Supply. It provides four selectable angular velocity ranges (one of them DC-capable), three angular displacement ranges and twenty-eight selectable high and low-pass filters. There are two computer interfaces: IEEE-488 and RS-232. The controller bandwidth is large enough to handle fast transients such as sudden accelerations of a shaft during gear changes.

All instrument settings are shown on the OFV-4000's large, backlit display including signal strength from both laser beams and RPM. Three BNC jacks provide analog signal outputs including angular vibrational velocity, angular vibrational displacement and RPM. These outputs can be examined further with signal processing, such as an order tracking analyzer.





Applications



The left images show an order tracking analysis of a crankshaft. Results are completely equivalent to the output from a traditional magnetic encoder. Set-up, data acquisition and tear-down were accomplished by the Rotational Vibrometer in a fraction of the time needed to install the encoder.

Right image: Measurement on a rotary printing press

Polytec's rotational vibrometers measure torsional or angular vibrations, without contact, on arbitrarily shaped structures including engine crankshafts, vehicle axels, marine driveshafts, electrical generator shafts and rotating parts in lithographic machines, printers & photocopiers. Automotive engineers use the rotational vibrometer to develop torsional vibration dampers that reduce engine noise and increase product durability. Faults in gearboxes, compressors and generators cause torsional vibrations at certain system specific frequencies. Measurements are made for:

- Reduction of noise and vibration
- Studies of rotational fatigue
- Improving the precision and quality of tool-making machines
- Monitoring and trouble shooting in power plant and production machinery
- Speeding up adjustment of torsional vibration dampers in vehicle drive shafts
- Studying run-up and run-down of machines (order tracking and Campbell plots)





Technical Data

Metrological Properties	
Rotations per Minute	
Measurement range	-7,000 RPM ... +11,000 RPM
Accuracy	±1 % (or ±5 RPM)
DC signal output	1 V/1000 RPM
Data transfer	Via interfaces; up to 500 samples/s
Time constant switch	Time constant switch slow/fast for detection of machine run-up characteristic
Angular Velocity	
Angular velocity ($\Delta\omega$) ranges	4 Velocity ranges: 100 °/s; 1,000 °/s; 10,000 °/s and 60,000 °/s (full scale range)
Analog output	±10 V
Frequency range	0.5 Hz ... 10 kHz (0 ... 10 kHz @ 60,000 °/s)
Linearity error	<0.25 %
Filters	High- and low-pass filters, 4th order, wide range of cut-off frequencies
Angular Displacement	
Angular displacement ($\Delta\phi$) ranges	3 Angle ranges: 0.1° / 1° / 10° (full scale range)
Analog output	Nom. ±10 V
Frequency range	1 Hz ... 10 kHz
Linearity error	<0.5 %

Optics	
Laser type	Helium-Neon (Red HeNe)
Laser output	633 nm, <1 mW per beam, Class 2
Separation of measurement beams	8 mm
Operating distance	400 mm ±50 mm (200 mm or 600 mm optional)

Operating range diagram: see page 5



General Properties, Housing and Power		
System	Dual interferometer system with frequency shift	
Components	OFV-4000 Controller	OFV-400 Sensor Head
Dimensions [L x W x H]	450 mm x 360 mm x 145 mm (17.7 in x 14.2 in x 5.7 in) 19" housing, rack mountable	320 mm x 120 mm x 78 mm (12.6 in x 4.7 in x 3.1 in)
Weight	11 kg	3.7 kg
Display	Large 4-digit LCD display	LED bar graph for balance
Operating temperature	+5 °C ... +40 °C (41 °F ... 104 °F)	
Relative humidity	<80 %, non-condensing	
Optics mounting	Multiple mounting positions	
Mains voltage	100 V / 115 V / 230 V	
Power consumption	max. 150 VA	
Interfaces	IEEE interface and RS-232 computer interface	
Outputs	3 separate BNC output sockets	

Compliance with Standards	
Electrical safety	IEC/EN 61010
EMC	IEC/EN 61326; Emission: FCC Class B, IEC/EN 61000-3-2 and 61000-3-3 Immunity: IEC/EN 61000-4-2 to 61000-4-6 and IEC/EN 61000-4-11
Laser safety	IEC/EN 60825-1 (CFR 1040.10, CFR 1040.11)

For more information please contact your local Polytec sales engineer or visit our website
www.polytec.com/usa/rotvib

Polytec GmbH (Germany)
 Polytec-Platz 1-7
 76337 Waldbronn
 Tel. +49 (0) 7243 604-0
 Fax +49 (0) 7243 69944
info@polytec.de

Polytec-PI, S.A. (France)
 32 rue Délizy
 93694 Pantin
 Tel. +33 (0) 1 48 10 39 34
 Fax +33 (0) 1 48 10 09 66
info@polytec-pi.fr

Lambda Photometrics Ltd. (Great Britain)
 Lambda House, Batford Mill
 Harpenden, Herts AL5 5BZ
 Tel. +44 (0) 1582 764334
 Fax +44 (0) 1582 712084
info@lambdaphoto.co.uk

Polytec KK (Japan)
 Hakusan High Tech Park
 1-18-2 Hakusan, Midori-ku
 Yokohama-shi, 226-0006
 Kanagawa-ken
 Tel. +81 (0) 45 938-4960
 Fax +81 (0) 45 938-4961
info@polytec.co.jp

Polytec, Inc. (USA)
 North American Headquarters
 1342 Bell Avenue, Suite 3-A
 Tustin, CA 92780
 Tel. +1 714 850 1835
 Fax +1 714 850 1831
info@polytec.com

Midwest Office
 3915 Research Park Dr.,
 #A12
 Ann Arbor, MI 48108
 Tel. +1 734 662 4900
 Fax +1 734 662 4451

East Coast Office
 16 Albert Street
 Auburn, MA 01501
 Tel. +1 508 832 0501
 Fax +1 508 832 4667

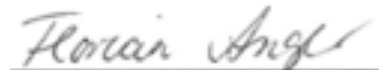
Technical specifications are subject to change without notice. LM_BR_RotVib_2005_07_E

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Thum, 26.02.2020

Florian Anger



Ort, Datum

Vorname Nachname

Mittweida, 26.02.2020

Toni Duc Vuong Nguyen



Ort, Datum

Vorname Nachname

Leipzig, 26.02.2020

Gerry Klafki



Ort, Datum

Vorname Nachname