

Messung der akustischen Güte von Kleinelektromotoren am Prüfstand unter Berücksichtigung der Lastkennlinie

- Bachelor-Thesis -

Erstellt durch:

Christian Hübner
Matrikelnummer 409939

Student des Studienganges Prozess-, Energie- und Umwelttechnik
im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Fachhochschule Düsseldorf Josef-Gockeln-Straße 9 in 40474 Düsseldorf

Betreuender Professor der Fachhochschule:

Prof. Dr. Ing. Frank Kameier
Fachgebiet Strömungstechnik und Akustik

Betreuung bei CRH durch

Dipl. Ing. (FH) Stefan Lingnau
und
Dipl. Ing. (FH) Peter Borowczyk

in der Abteilung Akustik und Schwingungen der
Firma C. Rob. Hammerstein GmbH & Co. KG
Merscheider Straße 167 in 42699 Solingen

1	EINLEITUNG	5
2	AUFGABENSTELLUNG	5
3	GRUNDLAGEN	6
3.1	Wirbelstrombremse	6
3.1.1	Funktionsprinzip	7
3.1.2	Drehzahlerfassung	7
3.1.3	Momentaufnehmer	8
3.2	Gleichstrommotor	9
3.2.1	Aufbau	9
3.3	3-Komponenten-Kraftsensoren	10
3.3.1	Messkette der Kraftsensoren	11
3.4	Grundlagen der Schwingungsanalyse.....	11
3.4.1	Zeitebene vs. Frequenzebene	11
3.4.1.1	Übertragung der Zeit- in die Frequenzebene (FFT).....	12
3.4.2	Übertragungsfunktion (FRF)	13
3.4.3	Kohärenzfunktion	14
3.5	Ordnungsanalyse.....	15
3.5.1	Kurzübersicht	15
3.5.2	Drehwinkelsynchrone Abtastung	17
3.5.2.1	Funktionsprinzip mit variabler Abtastfrequenz	17
3.5.2.2	Funktionsprinzip mit konstanter Abtastfrequenz (digitales Order-Tracking).....	17
3.5.2.2.1	Interpolation auf der Zeitachse	18
3.5.2.2.2	Interpolation auf der Amplitudenachse	20
4	MESS-, STEUER- UND REGELEINRICHTUNGEN	22
4.1	Computergestützte Datenerfassung und Steuerung	22
4.1.1	Brüel & Kjaer Pulse 9.0	22
4.1.1.1	Pulse Funktionen	22
4.1.1.2	Hardware- und Softwarekonfiguration zur Ordnungsanalyse	23
4.1.1.2.1	Anschluss der Hardware	23
4.1.1.2.2	Pulse-Project zur Aufnahme der Rohdaten	25

4.1.1.2.3	Pulse-Project zur Auswertung der Ordnungsanalyse	26
4.1.2	National Instruments LabVIEW 7.1	27
4.1.2.1	Steuerung der Bremse und Aufnahme der Motorenkennlinie.....	27
5	DER PRÜFSTAND	31
5.1	Grundzustand des Prüfstandes.....	31
5.2	Neukonstruktion des Prüfstandes	31
5.2.1	Entwicklung der Konstruktion.....	31
5.2.2	Ausgeführte Verbesserungen	32
5.2.2.1	Motoranschraubplatte	32
5.2.2.2	Kreuzsupport.....	32
5.2.2.3	Achse	33
5.2.3	Eigenfrequenzermittlung experimentell/ rechnerisch	33
5.2.3.1	Experimentelle Eigenfrequenzanalyse.....	34
5.2.3.2	Numerische Eigenfrequenzanalyse	36
5.2.3.2.1	Berechnungsgrundlagen	36
5.3	Aufbau	38
5.3.1	Montage der Kraftaufnehmer	38
5.3.1.1	Vorgehensweise.....	38
5.4	Kalibrierung der Sensoren	42
5.4.1	Messaufbau und Auswertung.....	42
5.4.1.1	Modalhammer	42
5.4.1.2	Shaker	45
5.4.2	Ergebnisse	47
5.4.2.1	Verwendbare Frequenzbereiche.....	47
6	MESSUNGEN.....	49
6.1	Fahrzeugmessung	49
6.1.1	Messaufbau.....	50
6.1.2	Subjektive Bewertung	50
6.1.2.1	Auswertungsbogen	50
6.1.2.2	Ergebnisse	50
6.1.3	Objektive Bewertung	52
6.1.3.1	Terzspektrum	52
6.1.3.2	FFT.....	54

6.2	Messungen am Prüfstand / Ordnungsanalyse.....	60
6.2.1	Vorgehensweise.....	60
6.2.2	Mögliche Fehlerbilder.....	61
6.2.3	Auswertung	62
6.2.3.1	Spektren	64
6.2.3.2	Slice.....	65
6.2.3.2.1	1. Ordnung	65
6.2.3.2.2	2. Ordnung	67
6.2.3.2.3	8. Ordnung	68
6.2.3.2.4	16. Ordnung	69
6.2.3.2.5	24. Ordnung	70
6.2.3.2.6	Ergebnisse	70
6.3	Korrelation zwischen Prüfstands- und Fahrzeugmessungen.....	72
6.3.1	Motor 1 und 2	72
6.3.2	Motor 3	73
6.3.3	Motor 4	73
6.3.4	Motor 5	74
6.3.5	Motor 6	75
6.4	Ordnungsanalyse vs. Leerlaufmessung.....	76
6.5	Problemlösung	77
6.5.1	50 Hz Fehlerfrequenz.....	77
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	79
8	AUSBLICK	80
9	LITERATUR.....	81
9.1	Fachbücher.....	81
9.2	Tagungsunterlagen und Fachberichte.....	81
9.3	Skripte	81
9.4	Betriebsanleitungen.....	81
9.5	Webseiten	82

10	ANHANG	84
10.1	Rechnerische Berechnung der Eigenfrequenzen	84
10.1.1	FEM-Modelle des vorhandenen Prüfstandes.....	84
10.1.2	Modellparameter	84
10.1.2.1	Definition „1.4542“	84
10.1.2.2	Definition von „1.4305“	84
10.1.2.3	Definition von "Aluminiumlegierung"	85
10.1.2.4	Definition von "API"	85
10.1.2.5	Definition von "PA 6.6 GF25"	86
10.1.2.6	Definition von "Bremse"	86
10.1.2.7	Definition von "Baustahl"	87
10.2	Zeichnungen des neu konstruierten Prüfstandes	88
10.2.1	Prüfstand komplett	88
10.2.2	Grundplatte	89
10.2.3	Befestigungsplatte.....	90
10.2.4	Seitenteil.....	91
10.2.5	Sensorenaufnahme	92
10.2.6	Sensorendeckplatte	93
10.2.7	Sensorengrundplatte.....	94
10.3	Fahrzeugmessung	95
10.3.1	Subjektive Bewertung	95
10.3.1.1	Bewertungsbögen	95
10.4	Ordnungsanalyse	97
10.4.1	Ordnungsspektren.....	97
10.4.1.1	X-Richtung bis zur 32. Ordnung CW.....	97
10.4.1.2	Y-Richtung bis zur 32. Ordnung CW.....	100
10.4.1.3	Z-Richtung bis zur 32. Ordnung CW.....	103
10.4.1.4	Slice.....	107
10.4.1.4.1	X-Richtung	107
10.4.1.4.2	Y-Richtung	111
10.4.1.4.3	Z-Richtung.....	115

1 Einleitung

In den heutigen Automobilen wird der Faktor Schwingung und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Akustik immer wichtiger. Mittlerweile sind die Fahrzeuge so gut gegen Außengeräusche isoliert, dass die Akustik im Fahrzeuginnern mehr und mehr an Bedeutung gewinnt.

Automobile werden aus umwelttechnischen Gründen wie z.B. Verbrauch etc. immer leichter konstruiert. Die Sitzhersteller sind deshalb angehalten, ihre Sitzstrukturen, bei gleich bleibenden oder verschärften Sicherheitstests (Festigkeit, Crashtest etc.), immer leichter zu konstruieren. Dadurch werden hochfeste und leichte Materialien eingesetzt. Die daraus folgende Konsequenz ist, dass die Schwingungen des Elektromotors bei elektrischen Verstellsystemen durch die geringere Masse weniger gedämpft werden und dadurch ein lauterer Verstellgeräusch entstehen kann.

Auf die Elektromotoren wird deshalb ein besonderes Augenmerk gelegt. Sie sollten ein möglichst ruhiges Laufverhalten haben. Die Konstanz der Wertigkeit der Motoren gleichen Bautyps ist daher sehr wichtig.

Bisher war es üblich, die Motoren im Leerlauf zu prüfen, doch die Ergebnisse waren nicht auf die Praxis übertragbar, da die Motoren in dem Sitzversteller immer einer Last ausgesetzt sind und selten bis gar nicht im Leerlauf drehen. An dem im Zusammenhang mit dieser Arbeit benutzten Prüfstand wird der Motor einer stetig steigenden Last ausgesetzt, sodass es möglich wird, die Motoren näher an der Praxis zu bewerten. Die akustische Bewertung steht in dieser Arbeit im Vordergrund.

2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Gleichstrommotoren mit Hilfe der Ordnungsanalyse in ihrer Güte, Verarbeitungsqualität und ihrem akustischen Verhalten zu bewerten. Die Aufgabenstellung besteht daraus, die Verbesserung des Handling und die Erhöhung der Eigenfrequenz des vorhandenen Prüfstandes durch konstruktive Änderungen zu erreichen; die Messgenauigkeit des Prüfstandes durch Kalibrierung der Sensoren in der Frequenzebene zu überprüfen und die Ermittlung von Kennwerten mit Hilfe der Ordnungsanalyse zur Selektierung von i.O. und n.i.O. Motoren.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die benötigten und angewandten Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Anwendungen kurz erläutert. Etwas genauer ist die Funktionsbeschreibung der Ordnungsanalyse verfasst, da es sich um das Hauptthema dieser Arbeit handelt. Eine tiefergehende Beschreibung der anderen Themen ist in der angegebenen Literatur nachzulesen.

3.1 Wirbelstrombremse

Die verwendete Bremse ist eine Wirbelstrombremse der Fa. Magtrol vom Typ 2WB43. Die technischen Daten der Bremse sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.1: Technische Daten der Wirbelstrombremse Magtrol 2WB43.

Nenn-Drehmoment	Restdrehmoment (nicht erregt)	Nenneingangsträgheit	Nennleistung	Nenndrehzahl	Max.Drehzahl	Erregerstrom
Nm	Nm	kg*m ²	kW	1/min	1/min	A
3	0,3	2,17x10 ⁻⁴	3	9550	50000	2

Die Bremse hat einen optischen Drehzahlaufnehmer und einen Momentaufnehmer, die in 3.1.2 und 3.1.3 näher beschrieben werden, integriert.

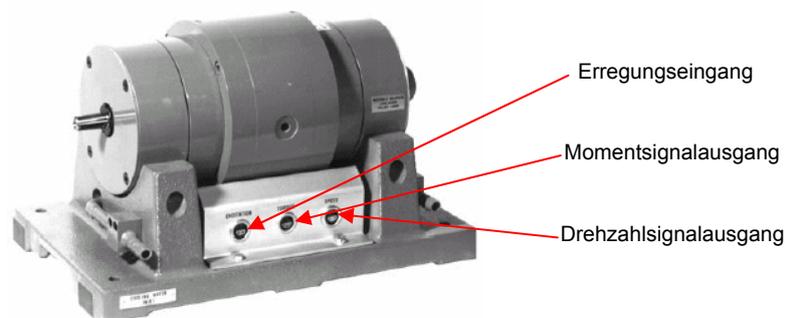


Bild 3.1: Wirbelstrombremse Typ 2WB43 (Bild aus [XXIV]).

Da die Maximalbremsleistung nach [XXIV] S.5-1 nicht überschritten werden darf, muss der Erregerstrom bei zunehmender Drehzahl reduziert werden. Aus diesem Grund bleibt die Leistung, wie in Bild 3.2 abzulesen, nach Erreichen der Nennleistung konstant und das Drehmoment fällt trotz steigender Drehzahl ab.

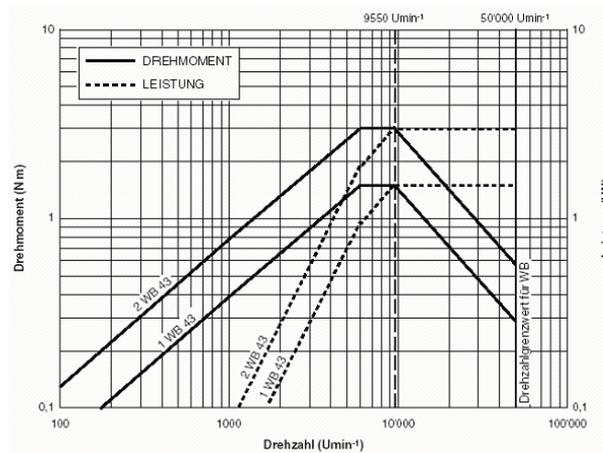


Bild 3.2: Drehmoment/Drehzahl und Leistung/Drehzahl (Diagramm aus [XXIV]).

3.1.1 Funktionsprinzip

Die Wirbelstrombremse besteht aus einem Elektromagneten und einem massiven Laufrad aus leitendem Metall, welches fest mit der Welle verbunden und von U-förmigen Magneten umgeben ist. Fließt kein Strom durch die Spulen des Magneten, so dreht sich die Scheibe frei durch den Magneten. Sobald der Strom eingeschaltet wird, werden durch die Bewegung des Laufrades im Magnetfeld in dem Laufrad Wirbelströme erzeugt. Auf die Wirbelströme wirkt im Magnetfeld eine Kraft, die der Bewegung des Laufrades entgegengesetzt ist. Das rotierende Laufrad wird gebremst.[IX]

3.1.2 Drehzahlerfassung

Die Drehzahlerfassung ist in die Wirbelstrombremse integriert. Es handelt sich um einen fotoelektrischen Aufnehmer mit einer Impulsscheibe mit 30 Teilungen (Bild 3.3). Wie in Bild 3.4 zu sehen ist, wird ein rechteckförmiges Drehzahlsignal (0-5V) mit drehzahlabhängiger Frequenz geliefert. [XXIV]

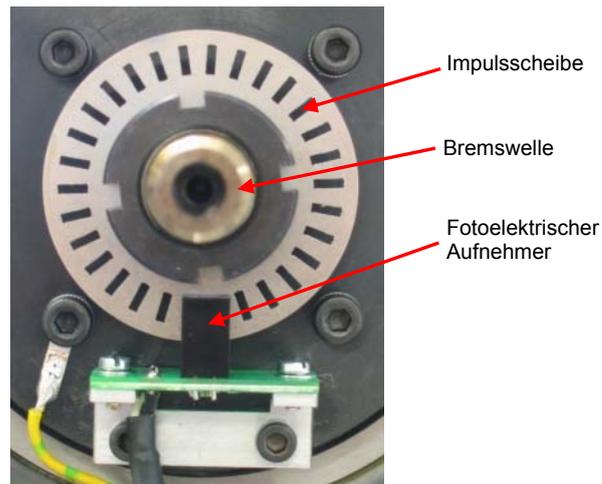


Bild 3.3: Drehzahlaufnehmer und Impulsscheibe in der Bremse.

Die Drehfrequenz ergibt sich aus Formel (3.1).

$$f_n = \frac{1}{T \cdot k} \quad (3.1)$$

Mit: f_n = Drehfrequenz / Hz

T = Periodendauer

k = Anzahl der Teilungen pro Umdrehung

Mit der Kenntnis von f_n lässt sich die Drehzahl n berechnet (Formel (3.2))

$$n = \frac{60s}{min} \cdot f_n \quad (3.2)$$

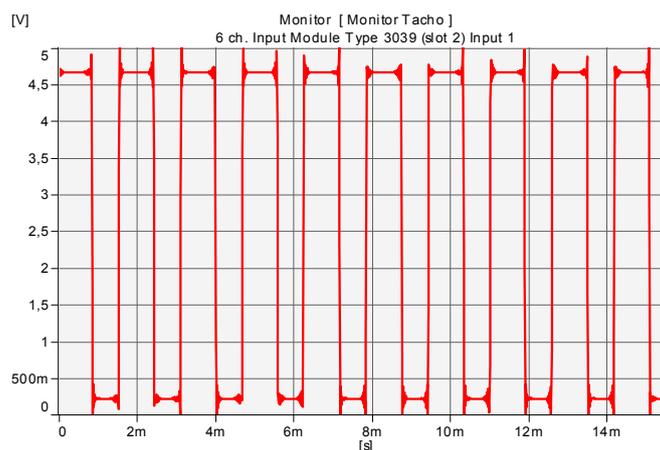


Bild 3.4: Drehzahlsignal der Wirbelstrombremse.

3.1.3 Momentaufnehmer

Das Drehmomentsignal stammt von einer DMS-Messbrücke, die in einer Lastmesszelle verbaut ist.

Die Lastmesszelle ist über ein Übertragungsgestänge mit dem Stator der Bremse verbunden. Vom Stator wird das von der Bremse erzeugte Drehmoment über das Übertragungsgestänge zur Lastmesszelle übertragen. An der Zelle liegt eine Kraft F an. Um das Drehmoment zu errechnen, muss die Kraft F mit dem Abstand l der Zelle zur Drehachse der Welle multipliziert werden (siehe Bild 3.5).

$$M = F \cdot l \quad (3.3)$$

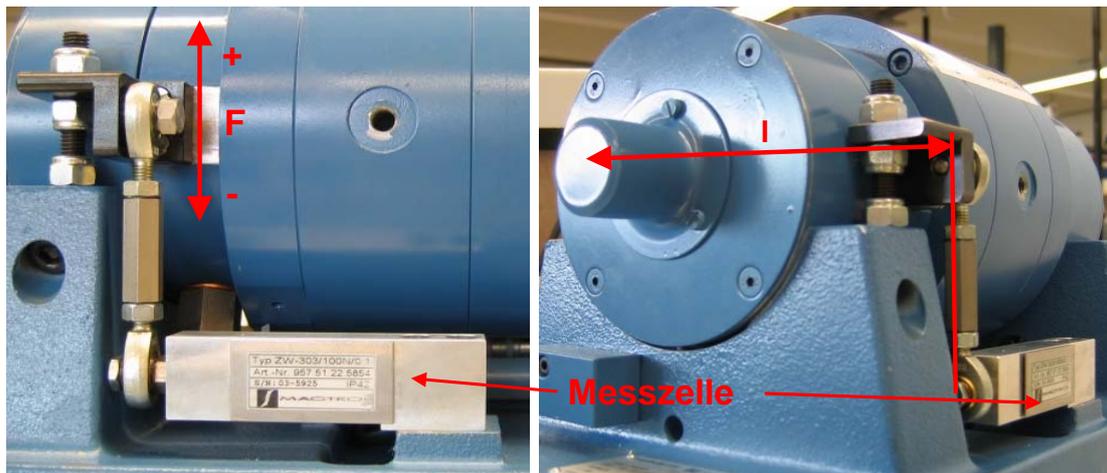


Bild 3.5: Verhältnis von Kraft und Abstand zur Drehachse.

3.2 Gleichstrommotor

In den von CRH hergestellten Sitzverstellern werden unter anderem Motoren der Fa. Bosch eingesetzt. Vom Grundprinzip sind alle Gleichstrommotoren ähnlich aufgebaut wie der in diesem Kapitel gezeigte Motor. Sie variieren in ihrer Leistung, Leerlaufdrehzahl und in der Kommutatoranzahl. Optional kann der Motor mit einem bipolaren Hallensensor für Positionierungsaufgaben (Memoryfunktion) ausgestattet werden.

3.2.1 Aufbau

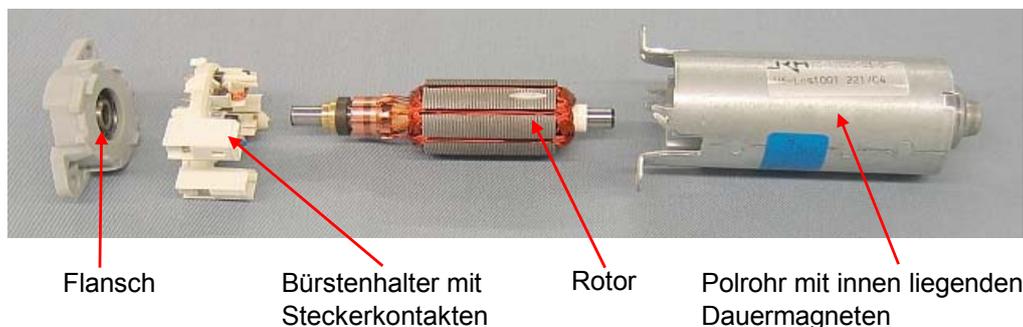


Bild 3.6: Zerlegter Gleichstrommotor.

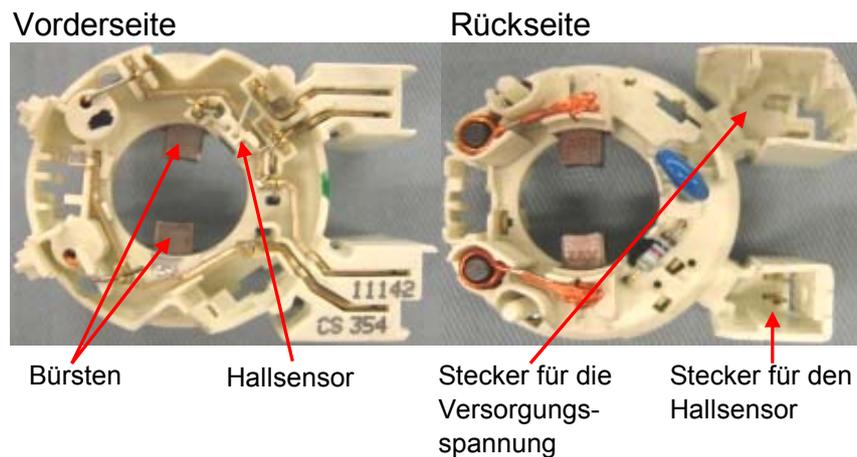


Bild 3.7: Bürstenhalter.

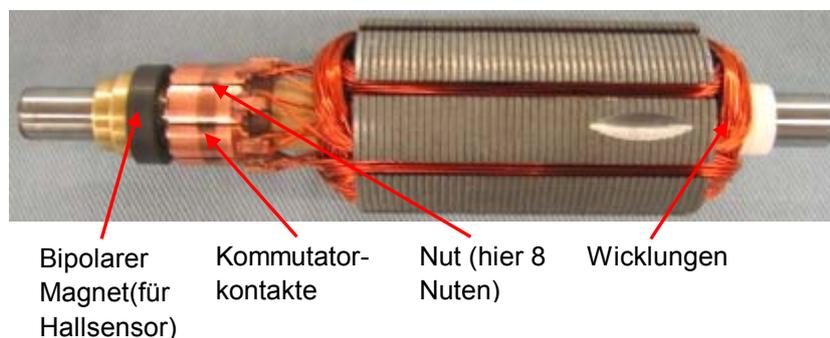


Bild 3.8: Rotor.

3.3 3-Komponenten-Kraftsensoren

Die hier verwendeten 3-Komponenten-Kraftsensoren des Typs 9017B der Fa. Kistler funktionieren nach dem piezoelektrischen Prinzip. Wird ein Quarzkristall in definierten Richtungen mechanisch belastet, treten elektrische Ladungen auf, die der aufgebrachten Kraft F proportional sind. Diese Ladungen werden mit Hilfe von Ladungsverstärkern in eine Spannung gewandelt.

Die Sensoren enthalten 3 Kristallringe, es sind also drei Sensoren in einem, die zwischen zwei Stahlplatten in das Gehäuse eingebaut sind.



Bild 3.9: 3-Komponenten-Kraftsensor Typ 9017B der Fa. Kistler (Bild aus [XXII]).

Die einzelnen Kristallringe sind jeweils in X und Y Richtung auf Schub empfindlich und in Z-Richtung auf Druck. Die Ladungen werden über Elektroden an den jeweiligen Steckerausgang geleitet. [XXII]

3.3.1 Messkette der Kraftsensoren

Eine Messkette zeigt den Weg des Signals von einem Messfühler als erstes Glied der Kette und einem Messwertausgeber bzw. einer Messdatenerfassung (hier B&K Pulse und LabVIEW) als letztes Glied. Das Signal durchläuft auf dem Zwischenweg meistens mehrere Glieder, in denen das Signal gewandelt oder umgesetzt wird. [XXV]

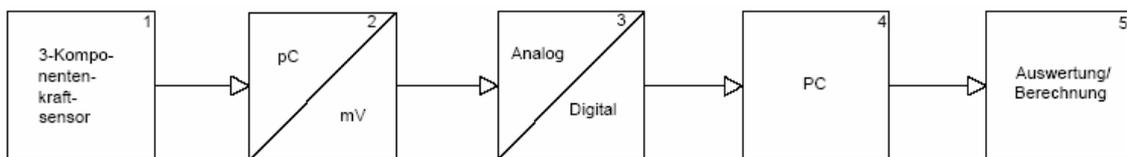


Bild 3.10: Messkette der Messung mit Kraftsensoren am Prüfstand.

Bild 3.10 zeigt die Messkette der Messung mit Kraftsensoren. Die einzelnen Schritte basieren auf den folgenden Komponenten:

1. Kistler 9017B 3-Komponenten-Kraftsensor. Ausgangssignal: Ladung in pC.
2. Bruel&Kjaer Ladungswandler Typ 2647C. Eingangssignal: Ladung in pC; Ausgangssignal: Spannung in mV.
3. Bruel&Kjaer Messsystem 3650. A/D-Signalwandlung
- 4./5. PC mit Software Bruel&Kjaer Pulse 9.0. Signal wird mit voller Bandbreite aufgezeichnet und anschließend mit den integrierten Analysatoren ausgewertet (FFT, Time, Ordnungsanalyse, um nur einige Analysatoren zu nennen).

3.4 Grundlagen der Schwingungsanalyse

3.4.1 Zeitebene vs. Frequenzebene

In der Zeitebenendarstellung wird eine veränderliche Größe über die Zeit t dargestellt. Also gibt sie Antwort auf die Frage wann ein Ereignis stattfindet. [II]/[XIX]

In der Frequenzebene wird die Amplitude eines Signals über den Kehrwert der Zeit t , der Frequenz f , aufgetragen. Die Frequenz gibt im Gegensatz zur Zeitebene, bei der die zeitliche Änderung dargestellt wird, ein Intervall, in dem sich das Signal ändert, an. Sie gibt also Antwort darauf, wie oft ein Ereignis vorkommt. Das folgende Beispiel

ist aus [II] S.23 zitiert und erklärt in einfachen Worten den Unterschied zwischen der Zeit- und der Frequenzebene:

„Der Fahrplan eines Busses kann als Zeittabelle oder aber als Frequenz angegeben werden. Bei der Zeittabelle sind die Abfahrtzeiten für jeden einzelnen Bus aufzuschreiben, in der Frequenzform genügt das Intervall zwischen den einzelnen Bussen zusammen mit der Abfahrtzeit des Ersten. In beiden Fällen ist der Informationsgehalt der gleiche, die Darstellungsform im Frequenzbereich ist wesentlich komprimierter und prägnanter ... Soll eine vollständige Transformation von der Zeitdarstellung zur Frequenzdarstellung und umgekehrt möglich sein, muss neben der Frequenz auch die Abfahrtzeit des ersten Busses bekannt sein, äquivalent mit der Phase einer Schwingung....“.

Tabelle 3.2: Fahrplan eines Busses in der Zeit und Frequenzdarstellung (aus [II]).

Zeit	Frequenz
06:10	Ab 6:10
06:30	alle 20 Minuten
06:50	
07:10	
07:30	
07:50	
Usw.	

Ein Informationsverlust zwischen Zeit und Frequenzebene ist also nicht gegeben, wenn die Phase der Frequenz bekannt ist. Der Betrachtungswinkel ist nur anders gewählt (siehe Bild 3.12). [II]

3.4.1.1 Übertragung der Zeit- in die Frequenzebene (FFT)

Jean Baptiste Fourier formulierte ein mathematisches Theorem, welches besagt, dass jede periodische nichtsinusförmige Schwingung als Überlagerung einer entsprechenden Anzahl rein sinusförmiger Teilschwingungen angesehen werden kann [XI]. Wie ein Signal mit 2 Sinusschwingungen zusammengesetzt ist, zeigt Bild 3.11.

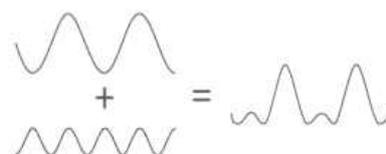


Bild 3.11: Addierung zweier Sinussignale zu einem Signal (Bild aus [XIX] S. 4).

Um, wie in 3.4.1 beschrieben, Daten einer Zeitfunktion in die Frequenzebene zu transformieren, wird der Algorithmus der East-Fourier-Transformation, kurz FFT, verwendet. Formel (3.4) zeigt die allgemeine Darstellung der Fouriertransformation.

$$X(\omega) = \int_{-T}^T x(t)e^{i\omega t} dt \quad (3.4)$$

Bild 3.12 zeigt diesen Vorgang in visueller Form. Das Zeitsignal wird in seine Sinusanteile zerlegt (b), jedes einzelne Sinussignal wird mit Hilfe der Fouriertransformation von der Zeit- in die Frequenzebene übertragen (a). (c) zeigt die Frequenzebenenansicht, in der die Amplituden der Zeitsignale über der Frequenz aufgetragen sind. Die Frequenzansicht hat den Vorteil, dass ein Signal, welches in der Zeitebene unübersichtlich und chaotisch erscheint, hier in diskreten übersichtlichen Linien dargestellt wird. [XXI]

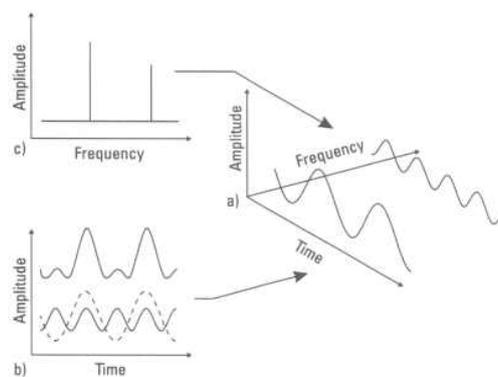


Bild 3.12: Beziehung zwischen der Zeit- und der Frequenzebene (Bild aus [XIX] S. 4).

3.4.2 Übertragungsfunktion (FRF)

Die Übertragungsfunktion $H(\omega)$, häufig wird auch der englische Ausdruck Frequency-Response-Function, kurz FRF, benutzt, beschreibt das komplexe Verhältnis zwischen Eingangssignal ($F(\omega)$) und Ausgangssignal ($X(\omega)$) (siehe Formel 3.5). Komplex bedeutet, dass sich die FRF aus einem Betrag $|H(\omega)|$ und einem Phasenwinkel $\varphi(\omega)$ zusammensetzt.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega) [\text{Ausgangssignal}]}{F(\omega) [\text{Eingangssignal}]} \quad (3.5)$$

Die FRF beschreibt das System, durch das ein Signal vom Referenzsensor zum Ausgangssensor übertragen wird. Jedes Eingangssignal wird mit dem Betrag und der Phase der Übertragungsfunktion multipliziert und ergibt das Ausgangssignal. Sind also das Eingangssignal und die Übertragungsfunktion bekannt, so kann das Ausgangssignal berechnet werden. [XIII]

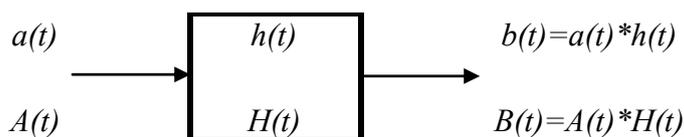


Bild 3.13: Eingang - Ausgang Beziehungen für ein lineares System [IV].

Hat der Betrag der FRF also einen Wert von 1 (lineare Darstellung) oder äquivalent dazu in logarithmischer Darstellung = 0 und die Phase einen Wert von 0° , dann ist das durchlaufene System ideal. In solch einem System ist das Ausgangssignal gleich dem Eingangssignal. Es wird also durch keine Dämpfung, Resonanzstellen oder sonstige Einflüsse verändert. (Bild 3.14)

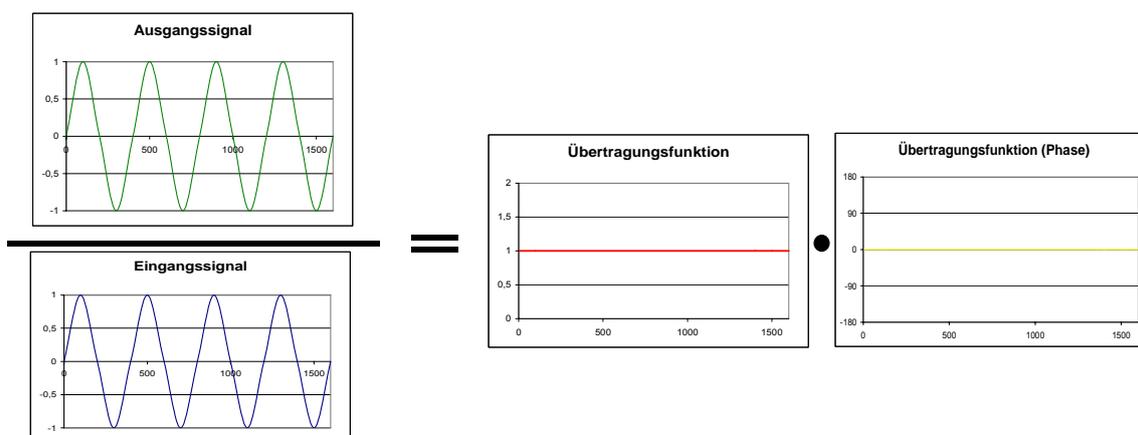


Bild 3.14: Visualisierte Formel zur Ermittlung der Übertragungsfunktion eines idealen Systems.

Bei Werten unter 1 ist die Amplitude des Ausgangssignals kleiner der Amplitude des Eingangssignals. Der umgekehrte Fall tritt nur auf, wenn die Eingangsamplitude durch eine Resonanzstelle verstärkt wird.

Das Phasenspektrum gibt Auskunft darüber, inwieweit sich die Schwingung oder die Erregung bei dem Übergang vom Eingangssignal zum Ausgangssignal um seine Phase verschiebt. Phasensprünge von 180° entstehen, wenn Eingangs- und Ausgangssignal unterschiedliche Vorzeichen haben. Resonanzen befinden sich im Phasenspektrum an den Wendepunkten des Spektrums. [XIII]

3.4.3 Kohärenzfunktion

Um den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal zu bewerten, wird die Kohärenzfunktion genutzt (lat.: cohaere = zusammenhängen). Die Kohärenz ist der Quotient aus dem Betrag des Kreuzspektrums (G_{XF}) zum Quadrat und dem Produkt der Autospektren des Eingangs- (G_{XX}) und des Ausgangssignals (G_{FF}) (Siehe Formel 3.6 aus [XIII]).

$$\gamma^2 = \frac{|G_{XF}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega)} \quad (3.6)$$

Das $0 \leq \gamma^2 \leq 1$ ist, beruht auf der folgenden Ungleichung:

$$|G_{XF}(\omega)|^2 \leq G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega) \quad (3.7)$$

Aus Formel 3.7 geht hervor, dass das Quadrat des Betrages des Kreuzspektrums kleiner oder gleich dem Produkt der Autospektren von Eingangssignal und Ausgangssignal ist. Die Kohärenz kann nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei Signalanteilen, die in beiden Signalen vorhanden sind, wird die Kohärenzfunktion gegen 1 tendieren. Bei Anteilen, die nur in einem Signal enthalten sind, tendiert sie gegen 0.

3.5 Ordnungsanalyse

3.5.1 Kurzübersicht

Bei Schwingungsmessungen an rotierenden Maschinen mit konstanter Drehzahl reicht es aus, die klassische Spektralanalyse (FFT) mit konstanter Abtastfrequenz anzuwenden [XVII]. Sie ist also für stationäre Signale zu wählen.

Sobald sich die Drehzahl im Laufe der Messung verändert, das Signal also instationär wird, ändert sich die Lage der drehzahlabhängigen Signalanteile im Spektrum. Die Linien „verschmieren“ (Bild 3.15) und können somit kaum bis gar nicht ausgewertet werden, da keine genaue Selektierung der Linien in Drehzahlfrequenzen und Festfrequenzen (z.B. Resonanzen) möglich ist.[XVI]

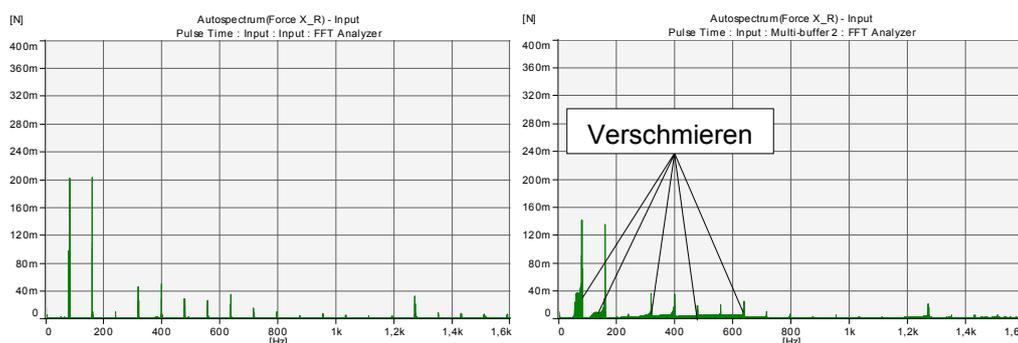


Bild 3.15: FFT-Spektrum bei konstanter Drehzahl von 4500 U/min (links) und bei einer Runterfahrt von 4500 bis 900 U/min.

Der Grund für dieses Verschmieren ist, dass das Zeitsignal mit fester Abtastfrequenz abgetastet und daraus direkt die FFT gebildet wird und aus diesem Grund nicht an die drehzahlveränderlichen Frequenzen angepasst wird. Feste (konstante) Abtastung

heißt, dass die Abtastpunkte von Beginn bis zur Beendigung der Messung denselben Abstand besitzen (vergl. Bild 3.16 (a)) (äquidistantes Zeitraster).

Um dieses Problem zu eliminieren, wird das Zeitsignal auf die Drehzahl bezogen und somit variabel abgetastet. Für jeden Punkt der Drehzahlerfassung (abhängig von der Teilung des Drehzahlaufnehmers) wird eine FFT gebildet und die so gebildeten FFT's wurden übereinander gelegt. Daraus ergibt sich ein Zeitraster, in dem die Abtastpunkte im Verlauf der Messung nicht denselben Abstand besitzen. Das bedeutet, dass je Periode immer dieselbe Anzahl an Abtastpunkten verwendet wird (vergl. Bild 3.16 (c)). Durch dieses Verfahren ändern die drehzahlproportionalen Signalkomponenten auch bei variierender Drehzahl nicht ihre Lage im Spektrum. Dieses Auswertverfahren wird als Ordnungsanalyse oder auch Order-Tracking bezeichnet [XVII].

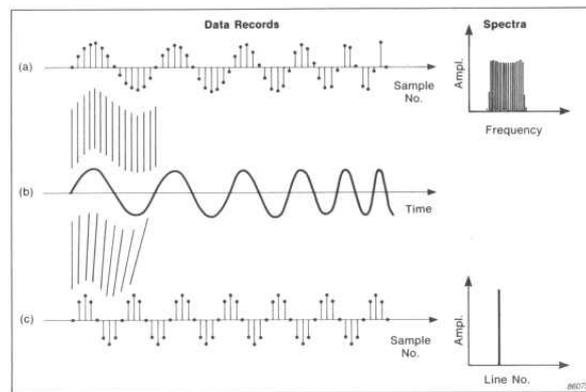


Bild 3.16: Sampling mit konstanter(a) und mit variabler Abtastfrequenz (c), (a) zeigt das Ausgangssignal (Bild aus [IV] S. 220).

Es gibt mehrere Möglichkeiten ein dreidimensionales Diagramm darzustellen. Einige Varianten sind das Wasserfalldiagramm, das Campelldiagramm oder das Konturdiagramm. Im Automobilbereich hat sich das Konturdiagramm durchgesetzt. Dort wird die Amplitude als Farbskalierung aufgetragen. Einen Vergleich des Wasserfalldiagramms mit dem Konturdiagramm zeigt Bild 3.17. In der Wasserfalldarstellung besteht die Gefahr, dass je nach Ansichtswinkel Peaks übersehen werden könnten. Dies ist bei der Konturdarstellung nicht der Fall.

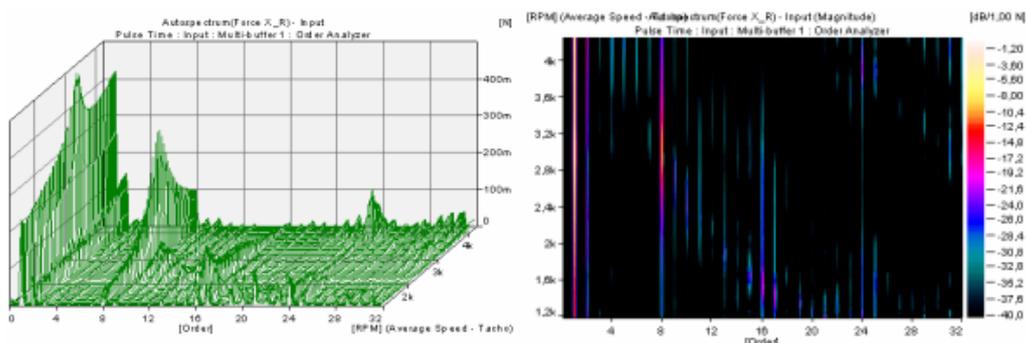


Bild 3.17: Vergleich zwischen der Wasserfall- und der Konturansicht (rechts).

Die 1. Ordnung bezieht sich auf die Drehzahl der Achse (Das Ereignis findet 1-mal pro Umdrehung statt). Die Harmonischen der Drehfrequenz bilden dann die 2., 3., usw. Ordnung [XVIII]. Wenn also ein Ereignis 2-mal je Umdrehung auftritt, dann ist dieses in der 2. Ordnung zu finden. Dasselbe gilt für die weiteren Harmonischen. Die Ordnungszahl ist also proportional zu den Ereignissen je Umdrehung.

3.5.2 Drehwinkelsynchrone Abtastung

Um die Abtastung auf die Drehzahl zu beziehen, wird die drehwinkelsynchrone Abtastung genutzt. Im Folgenden wird zum einen das Funktionsprinzip mit variabler Abtastfrequenz beschrieben, die erwähnt wird, um das Verständnis über das Prinzip der drehwinkelsynchronen Abtastung zu erleichtern und zum anderen die Variante mit fester Abtastfrequenz und digitalem Resampling, welche auch zur Auswertung der im Laufe dieser Arbeit gemessenen Werte verwendet wurde. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile, die in den nächsten Abschnitten behandelt werden.

3.5.2.1 Funktionsprinzip mit variabler Abtastfrequenz

Beim Prinzip der variablen Abtastfrequenz werden die Abtastzeitpunkte des AD-Wandlers direkt über einen externen drehwinkelsynchronen Takt gesteuert [XVII]. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Anzahl der Abtastpunkte je Umdrehung abhängig von dem Aufbau der Drehzahlerfassung ist. Bei der hier verwendeten Drehzahlerfassung sind es, wie schon in 3.1.2 beschrieben, 30 Impulse je Umdrehung. Die Anzahl der Teilungen je Umdrehung ist proportional mit der analysierbaren Ordnungszahl [XVII], das würde heißen, dass nur bis zur 30. Ordnung sicher gemessen werden könnte. Die Begründung liegt darin, dass der Zusammenhang zwischen Drehwinkel (Drehimpulse) und zeitlichem Impulsabstand (Erregungssignal) streng linear sein muss, um die Vorteile der Ordnungsanalyse voll ausschöpfen zu können [II]. Diese Art der Abtastung erfordert zusätzlich einen relativ hohen Schaltungsaufwand. Außerdem ist es fast unmöglich, gebrochen rationale Ordnungen, z.B. wie sie bei der Analyse von Getrieben benötigt werden, zu analysieren. [XVII]

3.5.2.2 Funktionsprinzip mit konstanter Abtastfrequenz (digitales Order-Tracking)

Im Zeitalter der computerunterstützten Datenerfassung und der Mikroprozessoren ist es möglich, den Vorgang aus 3.5.2.1 digital durchzuführen (auch digitales Resampling genannt [XVII]). Hierzu wird das Signal erst einmal mit fester Abtastfre-

quenz abgetastet. Das hat zusätzlich den Vorteil, dass das Schwingungssignal in voller Bandbreite für andere Analysen zu Verfügung steht [XVII], dem AD-Wandler ist ein Antialiasingfilter mit fester Grenzfrequenz vorgeschaltet. Parallel dazu wird das Drehzahlsignal als Synchronimpuls aufgezeichnet und abtastwertbezogen gespeichert. Mit Hilfe eines Algorithmus' kann der Drehwinkelverlauf zwischen den Impulsen interpoliert werden. [XVII]

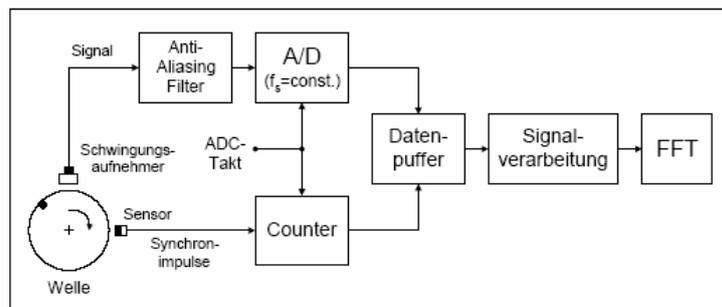


Bild 3.18: Ablauf der Signalerfassung mit konstanter Abtastfrequenz(aus [XVII]).

So können Abtastpunkte ermittelt werden, die einer konstanten Winkeländerung entsprechen hätten (beschrieben in Abschnitt 3.5.2.2.1). Im Anschluss erfolgt ein Resampling des im Datenpuffer zwischengespeicherten, mit fester Abtastfrequenz abgetasteten, Zeitsignals zu den erforderlichen drehwinkelsynchronen Zeitpunkten. Der Amplitudenverlauf des Signals wird durch Interpolationsverfahren (i.d.R. ein mitlaufender FIR-Filter) rekonstruiert (beschrieben in Abschnitt 3.5.2.2.2). Das Endergebnis dieses Ablaufes ist ein drehwinkelsynchrones abgetastetes Schwingungssignal [XVII]

3.5.2.2.1 Interpolation auf der Zeitachse

Um Abtastpunkte zu interpolieren, die wiedergeben, zu welchem Zeitpunkt bei variabler Abtastfrequenz hätte abgetastet werden müssen, wird angenommen, dass der Drehzahlverlauf auch zwischen 2 Impulsen linear verläuft. Mit dieser Randbedingung kann dann die Formel für gleichmäßig beschleunigte Bewegung für unsere Zwecke verwendet werden:

$$\phi(t) = \frac{\alpha}{2}t^2 + \omega t + \phi_0 \quad (3.8)$$

Mit: $\phi(t)$ = Drehwinkelverlauf

α = Winkelbeschleunigung

ω = Winkelgeschwindigkeit

ϕ_0 = Anfangswinkel

Da anfangs die Winkelbeschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und der Anfangswinkel unbekannt sind, werden durch Messung von drei aufeinander folgenden Synchronimpulsen drei Zeitpunkte ermittelt, an denen der Drehwinkel bekannt ist. Dadurch kann man ein lineares Gleichungssystem mit drei Unbekannten aufstellen. Mit diesen drei Gleichungen können die drei Unbekannten Winkelbeschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und der Anfangswinkel ermittelt werden. Nach Zusammenfassen der Gleichung ergibt sich nach [XVII], unter Berücksichtigung, dass angenommen wird, dass $\phi(t)$ immer monoton steigend ist, d.h. die Welle steht nicht und läuft nicht rückwärts, Formel (3.9):

$$t_r(\phi) = \frac{1}{\alpha} (\sqrt{\omega^2 + 2\alpha(\phi - \phi_0)} - \omega) \quad (3.9)$$

Mit dieser Formel lassen sich die gewünschten drehwinkelsynchronen Abtastzeitpunkte ermitteln.

Wenn zusätzlich angenommen wird, dass über den Zeitraum der drei gemessenen Intervalle eine konstante Drehzahl vorhanden ist, lassen sich nach [XVII] die Abtastpunkte nach Formel (3.10) ermitteln:

$$t_r(\phi) = \frac{\phi - \phi_0}{\omega} \quad (3.10)$$

Bild 3.1 zeigt den oben beschriebenen Ablauf der Interpolation auf der Zeitachse.

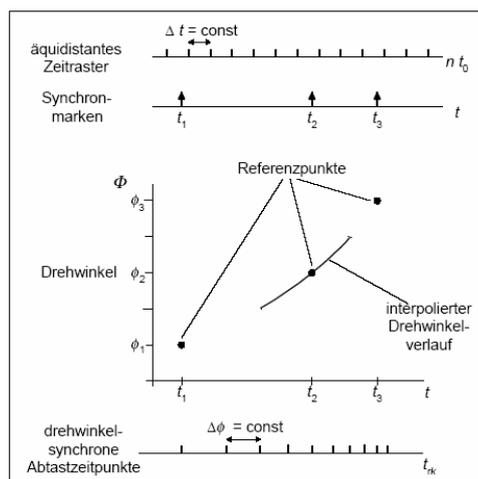


Bild 3.19: Visualisierung der Interpolation drehwinkelsynchroner Abtastzeitpunkte (aus [XVII]).

Das Problem, dass die Anzahl der analysierbaren Ordnungen abhängig von der Teilung des Drehzahlaufnehmers ist, ist bei diesem Prinzip, unter Voraussetzung, dass die Drehzahl sich linear ändert, nicht gegeben. Die Interpolation funktioniert unter diesen Voraussetzungen absolut fehlerfrei [XVII]. Ist die Änderung der Drehzahl

nicht linear, wie in unserem Fall, wird der Drehwinkelverlauf nur näherungsweise ermittelt werden können (vergleiche Bild 3.20, dessen Werte einer während dieser Arbeit durchgeführten Messung und Auswertung entnommen wurden). Zwischen 2 Impulsen wird die Änderung der Drehzahl dann als linear angenommen. Der dabei entstehende Fehler pflanzt sich nicht weiter fort, da für jeden Impuls bzw. für jede Interpolation die Formel neu berechnet wird. Je höher also die Anzahl von Impulsen je Umdrehung, desto genauer die Interpolation des Drehwinkelverlaufes. [XVII]

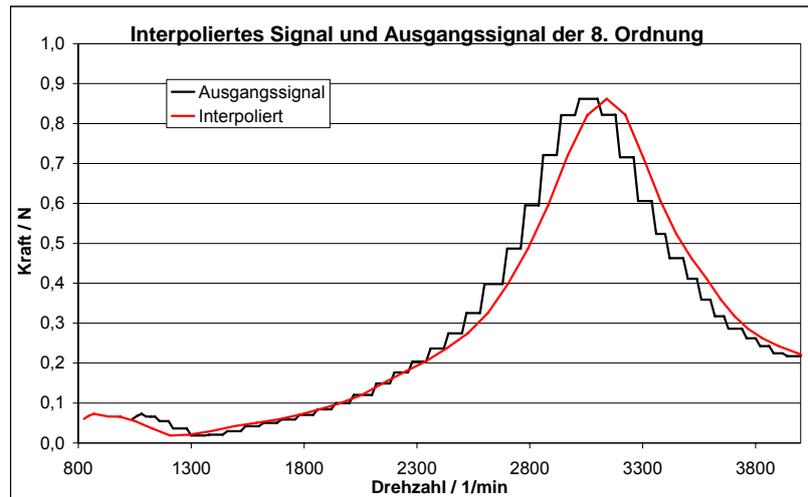


Bild 3.20: Vergleich des mit variabler Abtastfrequenz abgetasteten Signals mit demselben mit fester Abtastfrequenz abgetasteten Signal.

3.5.2.2.2 Interpolation auf der Amplitudenachse

Nachdem die Interpolation auf der Zeitachse durchgeführt worden ist, müssen aus den Amplituden der Abtastung mit fester Abtastung die Amplituden für die Abtastung mit variabler (drehsynchroner) Abtastfrequenz gewonnen werden. Das Problem dabei ist, dass es durch die unterschiedliche Abtastung dazu kommen kann, dass die Amplituden nicht ausreichend genug abgetastet werden und somit mit einem zu geringen Betrag angezeigt werden. Um dieses zu vermeiden, wird mit einem Filter mit variablem Filtergrad gearbeitet, meist ein FIR-Filter (FIR= Finite Impulse Response = finite Impulsantwort), welcher ein Filter mit endlicher Impulsantwort ist [XVII]. Die Impulsantwort des Filters wird mit dem gesuchten Abtastzeitpunkt benachbarter, Messwerte gefaltet. Ein FIR-Filter arbeitet nach Formel (3.11) (aus [XVII]).

$$y(t_k) = K \sum_{n=N_0}^{N_0+N} x(nt_0) \cdot g(t_k - nt_0) \quad (3.11)$$

Mit: K =Dezimierungsfaktor

N =Filtergrad

N_0 =Anfangsfiltergrad

$x(nt_0)$ =Eingangsfunktion

$g(t_k - nt_0)$ =Impulsantwort

Die Anpassung der Durchlasskurve des Filters an die momentane Drehzahl wird durch Stauchung oder Dehnung der Impulsantwort erreicht (Bild 3.21). Je nach Drehzahl wird also eine unterschiedliche Anzahl benachbarter Originalstützwerte zur Filterung verwendet. [XVII]

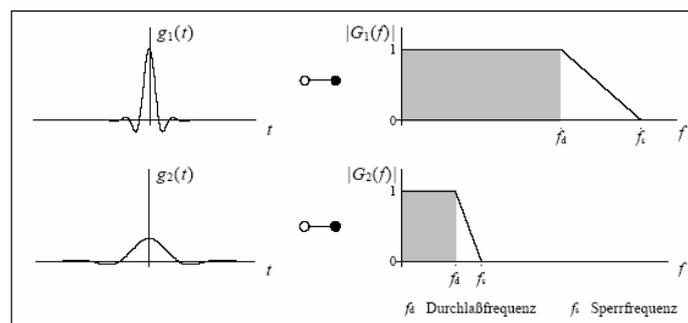


Bild 3.21: Prinzip der Filteranpassung durch Stauchung oder Dehnung der Impulsantwort des Filters (aus[XVII]).

Der Berechnungsaufwand ist im Vergleich zu einem Filter mit konstantem Filtergrad höher, da die Impulsantwort für jeden Resamplewert neu skaliert werden muss. Dies ist aber bei den heutigen Mikroprozessoren kein Problem mehr.

4 Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen

4.1 Computergestützte Datenerfassung und Steuerung

4.1.1 Brüel & Kjaer Pulse 9.0

Pulse ist eine Mess- und Auswertplattform für die Geräusch- und Schwingungsanalyse. Die Software und die Hardware sind modular aufgebaut.

Um einen kleinen Überblick über den Funktionsumfang von Pulse zu bekommen, werden in den Abschnitten 4.1.1.2.2 und 4.1.1.2.3 die für die Ordnungsanalyse erstellten Projekte als Beispiel gezeigt. Zusätzlich werden einige „Organiser“ erläutert (Abschnitt 4.1.1.1). Außerdem wird ein Teil der Hardwarekonfiguration erklärt (Abschnitt 4.1.1.2.1)

4.1.1.1 Pulse Funktionen

Die Pulssoftware arbeitet mit so genannten Organismen die in Bild 4.1 gezeigt werden.

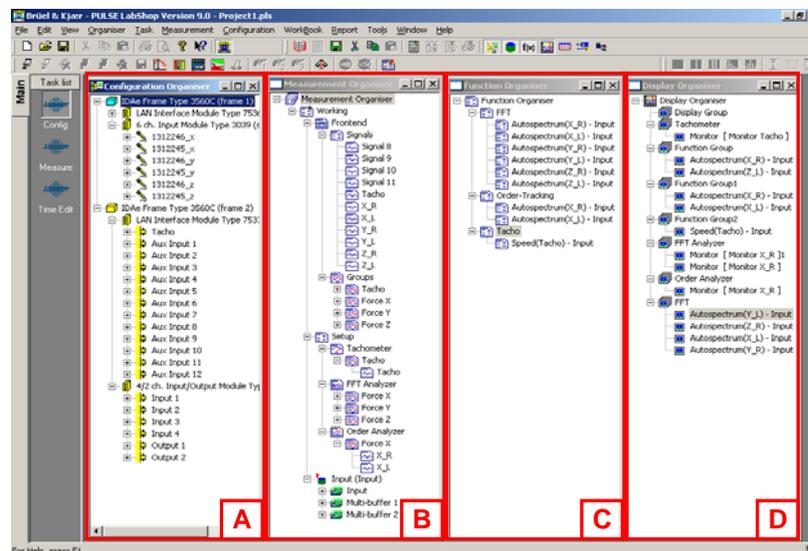


Bild 4.1: Konfigurationsseite eines Pulse-Projects.

Die Organiser sind der Dreh- und Angelpunkt in der Bedienung von Pulse. In ihnen werden die meisten Einstellungen getätigt und von ihnen aus werden die Anzeigen gestartet. Die wichtigsten Organiser werden im Folgenden erläutert:

A) Configuration Organiser

Im Configuration Organiser sind die verfügbaren Frontends sowie deren Messkanäle angezeigt. Hier werden die sensorspezifischen Kalibrierwerte eingetragen und die Frontends konfiguriert.

B) Measurement Organiser

Im Measurement Organiser werden die Signale in frei wählbare Gruppen (Groups) geordnet. Die Gruppen sollten so erstellt werden, dass die Signale, die zusammen in einem Analyzer ausgewertet werden sollen, in einer Gruppe zu finden sind. Im Setup-Baum können die gewünschten Analyzer, wie z.B. FFT, Order-Analyzer, Tachometer, CPB-Analyzer etc. und der Recorder eingefügt und konfiguriert werden. In die gewählten Analyzer müssen die Gruppen eingefügt werden, damit die darin enthaltenen Signale ausgewertet werden können.

C) Function Organiser

Der Function Organiser verwaltet, wie der Name schon sagt, die Funktionen. Es können Function-Groups oder PL-Program-Groups erstellt werden. In den Function Groups werden die in Pulse vorbereiteten Funktionen, wie z.B. Autopektrum, Kohärenz, Kreuzspektrum etc., eingefügt und geordnet. In einer PL-Program-Group können individuelle Funktionen mit Hilfe der Pulseeigenen Programmiersprache Pulse-Language erstellt werden.

D) Display Organiser

In diesen Organiser werden die Einstellungen für die Darstellung der Ergebnisse vorgenommen.

4.1.1.2 Hardware- und Softwarekonfiguration zur Ordnungsanalyse

Für die Ordnungsanalyse ist zum einen ein Project zum Aufzeichnen der Rohdaten und zum anderen eines zur Auswertung und Analyse erstellt worden.

4.1.1.2.1 Anschluss der Hardware

Bild 4.2 zeigt den Hardwareaufbau zur Erfassung der Rohdaten für die Ordnungsanalyse. Wie zu sehen ist, sind zwei Frontends synchronisiert worden. Dies ist notwendig, da allein für die zwei 3-Komponenten-Kraftsensoren sechs Kanäle benötigt werden. Da die vorhandenen Frontends aber nur sechs bzw. fünf Kanäle zur Verfügung haben und für die Ordnungsanalyse noch ein Kanal für die Erfassung des

Drehzahlsignals benötigt wird, ist es notwendig, die beiden Frontends zu synchronisieren. (Bild 4.2)

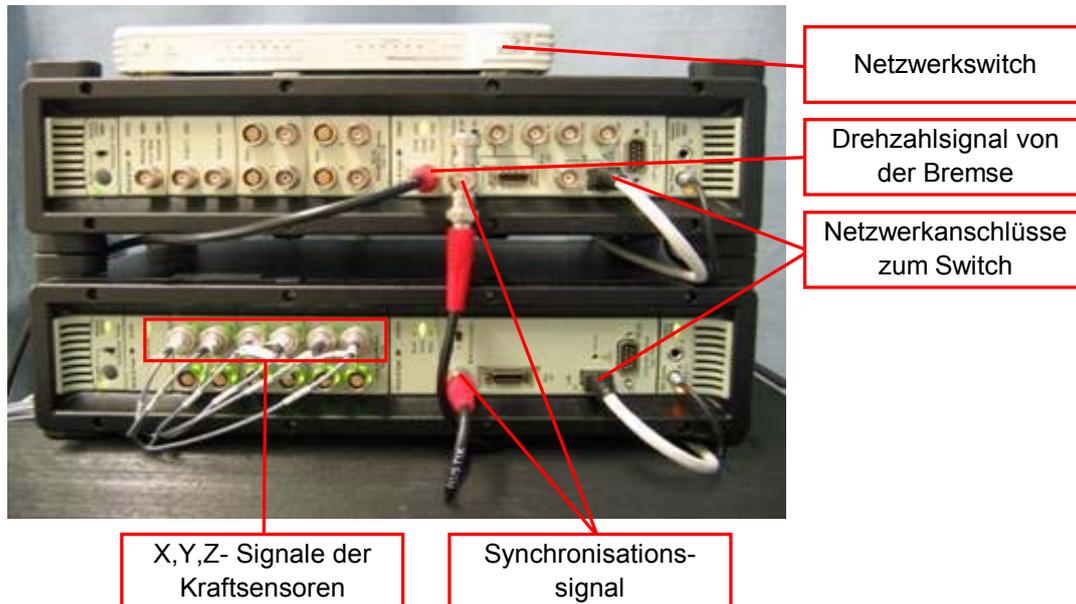


Bild 4.2: Messaufbau zur Erfassung der Rohdaten der Ordnungsanalyse.

Die Synchronisation erfolgt über ein BNC-Kabel, welches die beiden Frontends direkt miteinander verbindet (Bild 4.2). Dieses wird genutzt um einen Synchronimpuls zu übertragen. Über diese Verbindung werden die auf den Frontends gemessenen Signale zueinander synchron gehalten. Dies ist besonders für die Ordnungsanalyse wichtig, da die Genauigkeit des Ergebnisses von der Synchronität des Drehzahlsignals mit den Kraftsignalen abhängig ist (siehe Kapitel 3.5).

Damit die Messdaten zu einem Messrechner gelangen, wird ein Netzwerkswitch benötigt. Jedes Frontend ist mit einem LAN-Interface mit frei zuweisbarer IP-Adresse ausgestattet und kann somit in jedes Netzwerk integriert werden. Der Vorteil ist, dass von jedem Rechner innerhalb eines Netzwerkes die Messung gesteuert werden kann. Auf diesen Rechner, oder einem Server im Netzwerk, können die Rohdaten gespeichert werden. Voraussetzung ist, dass auf dem gewählten Rechner die Pulse-Software installiert ist. Es werden beide Frontends per Standard Patchkabel (nicht per Crossover-Kabel!!) mit dem Switch verbunden. Zusätzlich ist ein Patchkabel zu einer Netzwerkdose oder, wenn das System netzwerkautark betrieben werden soll, direkt zu einem PC notwendig.

Ist die Hardware richtig konfiguriert worden, werden im Configuration-Organiser beide Frontends mit allen verfügbaren Kanälen angezeigt.

4.1.1.2.2 Pulse-Project zur Aufnahme der Rohdaten

Um die Rohdaten der Ordnungsanalyse aufnehmen zu können, ist ein Project ausschließlich zur Aufzeichnung der Messdaten ohne Analytoren erstellt worden. (Bild 4.3)

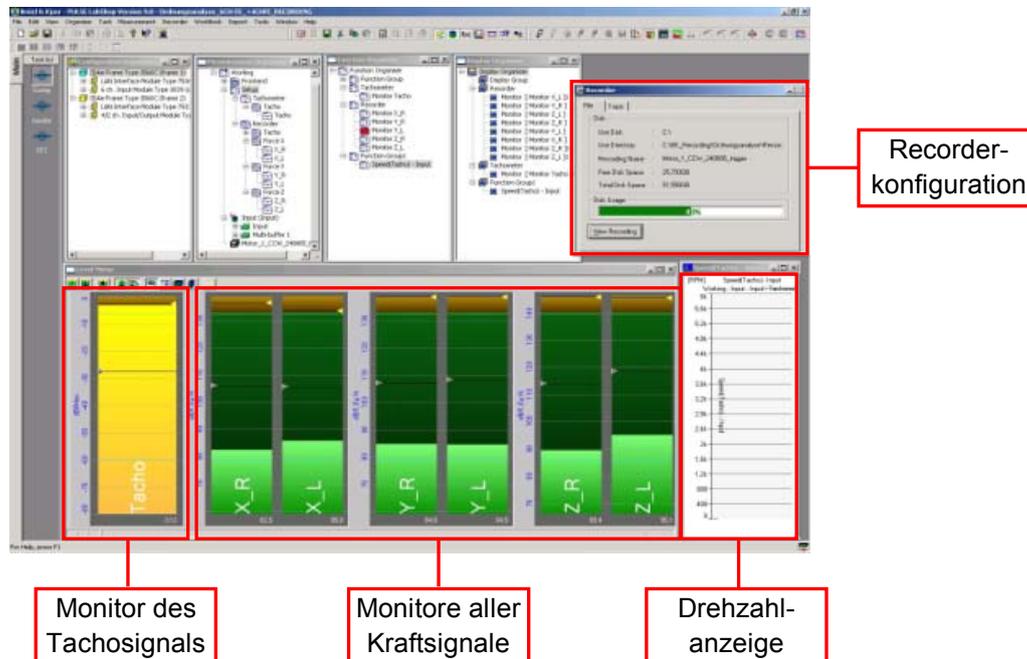


Bild 4.3: Pulse Project zur Aufnahme der Rohdaten.

- Monitor des Tachosignals**
 Hier wird das Signal der Drehzahlerfassung angezeigt. Die verwendete Drehzahlerfassung gibt ein Rechtecksignal mit 0V oder 5V aus. (Siehe auch Abschnitt 3.1.2)
- Monitor aller Kraftsignale**
 In dieser Anzeige wird kontrolliert, ob der Messbereich der Sensoren ausreichend groß gewählt wurde. Ist der Kanal übersteuert, wird der Anzeigebalken rot, bei einer grenzwertigen Belastung gelb angezeigt. Die Anzeige wird genutzt, um den Messbereich an die jeweilige Messung anzupassen.
- Drehzahlanzeige**
 Anhand der Drehzahlanzeige kann die aktuelle Drehzahl online abgelesen werden.
- Recorderkonfigurator**
 Hier werden der Speicherort und der Dateiname definiert. Zusätzlich werden die Bandbreite, mit der die Signale aufgezeichnet werden sollen, sowie die Dateilänge eingestellt.

4.1.1.2.3 Pulse-Project zur Auswertung der Ordnungsanalyse

Zur Auswertung der Ordnungsanalyse ist für jede Messrichtung (X, Y, Z) ein Project erstellt worden. Dies war notwendig, da nur eine Order-Analyzer-Lizenz verfügbar war, die es zulässt höchstens zwei Kanäle gleichzeitig auszuwerten. Bis auf die Tatsache, dass jedes Project eine andere Messrichtung auswertet, unterscheiden sich die drei Projekts nicht voneinander. Deshalb wird im Folgenden auch nur eines beschrieben.

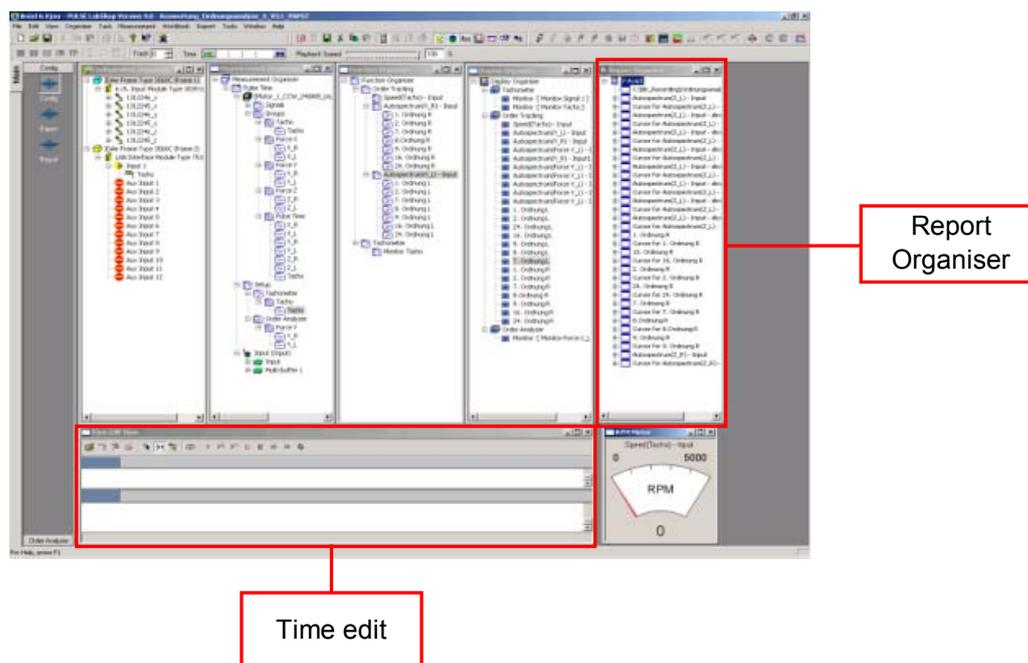


Bild 4.4: Konfigurationsseite des Projects zur Auswertung der Rohdaten der Ordnungsanalyse.

- Time edit**
 Mit Hilfe der „Time edit view“ können zuvor mit Pulse gespeicherte Rohdaten aber auch externe Formate, wie z.B. *.WAV, eingelesen werden. Hier können die Rohdaten mit einem Kopfhörer oder Lautsprecher angehört und bei Bedarf auch geschnitten werden. Anschließend können die Rohdaten in das Project exportiert werden. Die Daten werden so in das Project implementiert, als würde die Messung live durchgeführt.
- Report Organiser**
 In den Report Organiser können per drag&drop die in der Taskbar befindlichen Tasks, die Diagramme enthalten, eingefügt werden. Der Report Organiser kann daraus einen Report in MS-Word erstellen. Die Diagramme werden dann als Grafiken in das Dokument eingefügt.

Das Wichtigste der Auswertung sind natürlich die Ergebnisse in Form von Diagrammen. Für jeden Sensor (R/L) ist ein Task vorhanden. (Bild 4.5)

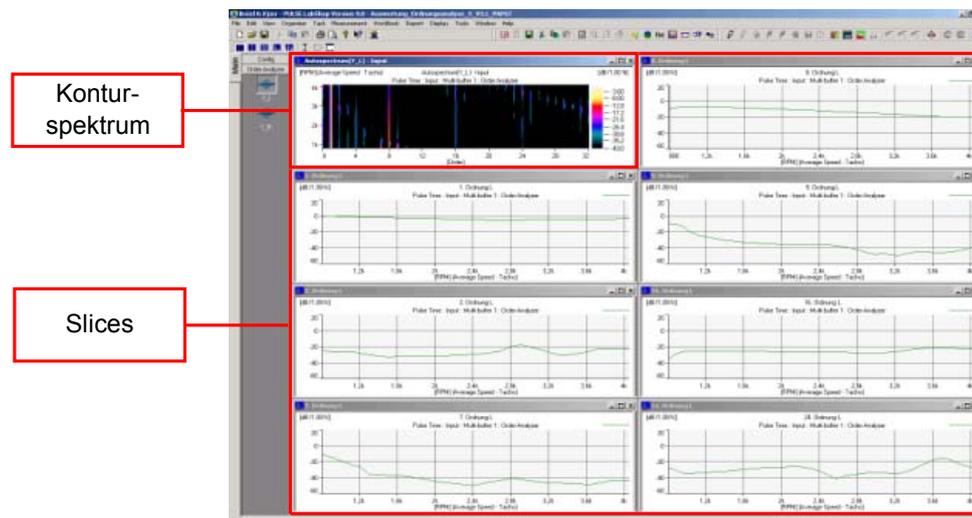


Bild 4.5: Konturspektrum und Slices.

Die Slices sind Querschnitte der Ordnungen. Sie stellen den Amplitudenverlauf der Ordnung über der Drehzahl dar. Diese Darstellung wird genutzt, um Ordnungen verschiedener Messungen direkt miteinander zu vergleichen (siehe Abschnitt 6.2.3.2). In Bild 4.5 sind Slices der ersten, zweiten, siebten, achten, neunten und der sechzehnten Ordnung zu sehen.

4.1.2 National Instruments LabVIEW 7.1

LabVIEW ist ein Mess-, Steuer- und Regelprogramm, welches eine grafische Programmieroberfläche hat. Der Name der verwendeten Programmiersprache lautet G, in Anlehnung an die Hochsprachen C, C++ usw. Auf eine genaue Beschreibung von LabVIEW wird verzichtet und auf die gängige Literatur verwiesen.

4.1.2.1 Steuerung der Bremse und Aufnahme der Motorenkennlinie

Zur Steuerung der Bremse für die Ordnungsanalyse ist ein LabVIEW-Programm genutzt worden, welches zur Aufnahme der Motorenkennlinie programmiert wurde. Das Programm ist von einem Ingenieur der Abteilung Akustik und Schwingungen im Vorfeld dieser Arbeit erstellt worden und brauchte nicht mehr geändert zu werden. In Bild 4.6 ist der verwendete mobile Messrechner mit Messkarte zu sehen.



Bild 4.6: Mobiler Messrechner mit Messkarte.

Um eine Motorenkennlinie aufzunehmen, ist eine Runterbremsung von der Leerlaufdrehzahl bis zur Minimaldrehzahl notwendig. Um die Intensität und die Dauer der Bremsung definieren zu können, ist in dem LabVIEW-Programm ein Rampengenerator integriert. (Bild 4.7)

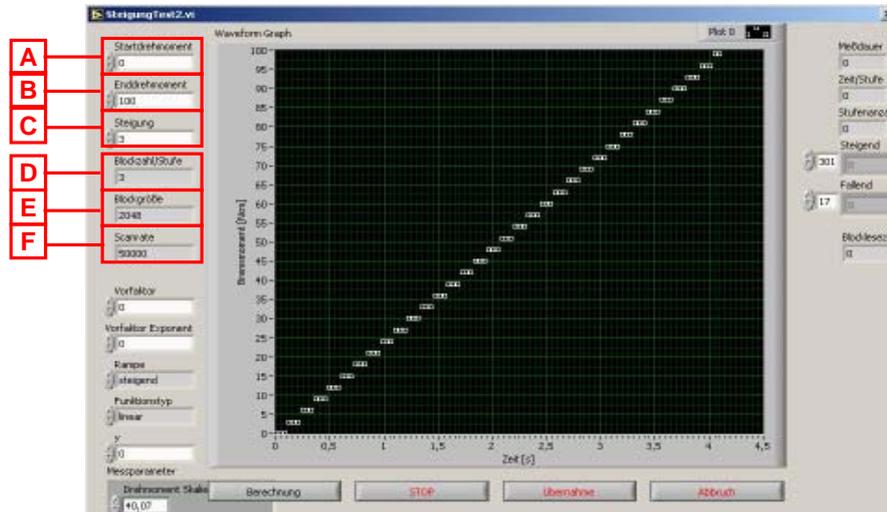


Bild 4.7: Rampengenerator

Die wichtigsten Einstellmöglichkeiten der Rampe sind in der folgenden Auflistung beschrieben:

A) Startdrehmoment

Definierung des Drehmoments zu Beginn der Messung. Notwendig, um Hochfahrten oder Punktmessungen zu realisieren.

B) Enddrehmoment

Stellt das Drehmoment ein, welches am Ende der Messung auf den Motor wirkt.

C) Steigung

Konfiguriert die Steigung der Rampe. Je steiler die Rampe, desto schneller wird das Enddrehmoment erreicht und umgekehrt.

Die folgenden Elemente werden in dem Konfigurationsfenster aus Bild 4.8 eingestellt. Sie werden auch im Rampengenerator angezeigt, können dort aber nicht geändert werden

D) Blockzahl/ Stufe

Hier wird die Blockzahl pro Stufe eingestellt.

E) Blockgröße

Hier wird die Blockgröße eingestellt. Hier sind es 2048 Samples pro Block

F) Scanrate

Die Scanrate ist auch als Abtastrate bekannt und gibt die Anzahl der Messpunkte pro Sekunde an.

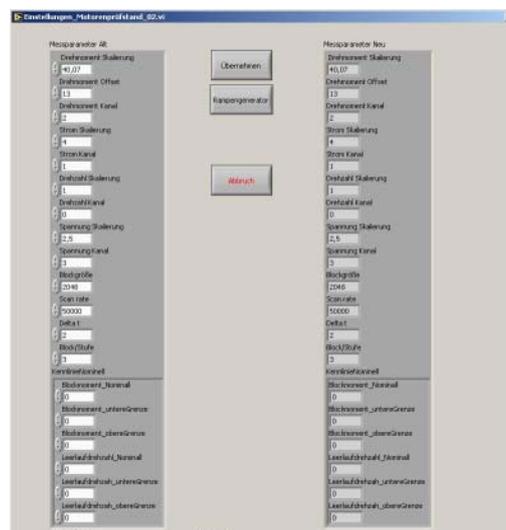


Bild 4.8: Konfigurationsfenster.

In Bild 4.9 ist das Startfenster des Programms dargestellt. In dieser Maske werden die Angaben zu Versuchsobjekt, Versuchsart, Prüfer usw. eingegeben. In dem Diagramm sind die Motorkennlinien angezeigt. Erfasst und angezeigt werden der Drehzahlverlauf (blau), die Stromaufnahme (orange), die mechanische Leistung P_m (grün), die elektrische Leistung P_{el} (hellbraun) und der Wirkungsgrad η (dunkelbraun). Der Wirkungsgrad wird durch den Quotienten aus der mechanischen Leistung mit der elektrischen Leistung gebildet.

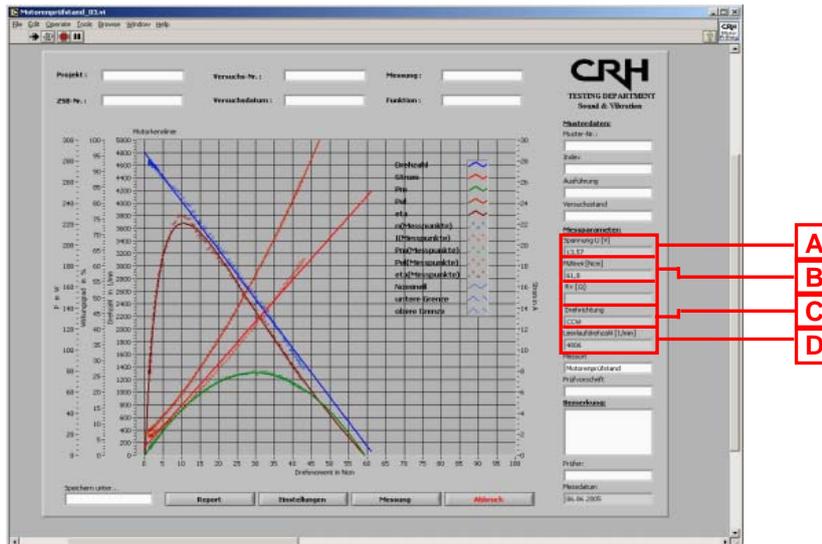


Bild 4.9: Zeigt das Hauptfenster des Programms mit Motorkennlinien.

Im Hauptfenster werden noch folgende Messparameter angezeigt:

- A) Spannung / V
- B) Blockmoment / Ncm
- C) Drehrichtung (CW/CCW)
- D) Leerlaufdrehzahl / 1/min

5 Der Prüfstand

5.1 Grundzustand des Prüfstandes

Der Prüfstand in der ersten Ausführung wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Bosch geplant und hergestellt. Der Prüfstand wird in Bild 5.1 dargestellt.

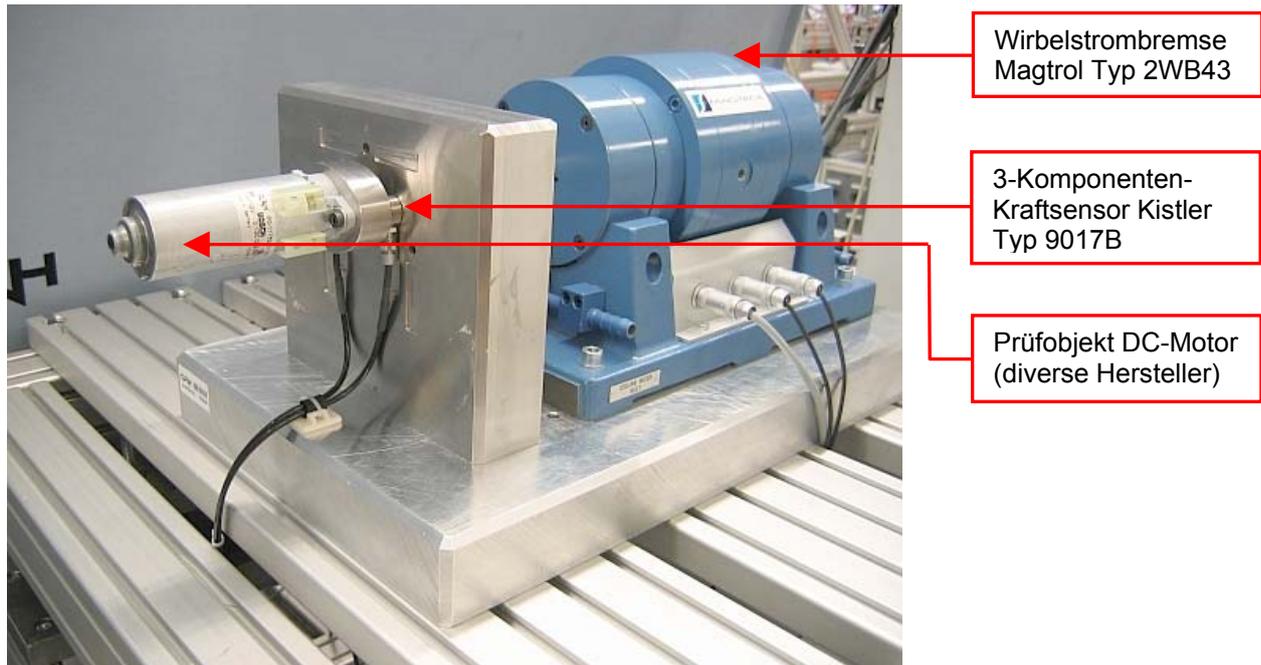


Bild 5.1: Der Prüfstand.

5.2 Neukonstruktion des Prüfstandes

Die Aufgabe bestand darin, den bestehenden Prüfstand in seinem Handling und in seinem Messverhalten zu verbessern. Vorab sei erwähnt, dass die hier erstellten Konstruktionen bis zum Ende dieser Arbeit aus Kapazitätsmangel nicht gefertigt werden konnten.

5.2.1 Entwicklung der Konstruktion

Im Laufe der Konstruktion haben sich verschiedene Versionen entwickelt. Im Folgenden wurde das Augenmerk auf die Motorbefestigungsplatte gelegt. Sie sollte eine sehr geringe Tiefe besitzen. Die unterste Grenze wurde von der Fa. Kistler mit 11mm Dicke gesetzt. Anhand dieser Vorgabe wurde die neue Platte konstruiert. Tabelle 5.3

zeigt die verschiedenen Variationen, die zur Auswahl standen. Der rote Pfeil verfolgt die gewählte Variante.

Tabelle 5.3: Morphologischer Kasten.

Bauteil	Variationen					
	1	2	3	4	5	6
Motoraufnahme (Deckplatte) (Material)	Aluminium	Edelstahl	Titan	Magnesium		
Motoraufnahme (Deckplatte) (Form)	Kreuzform (Einfacher Anschraubpunkt) Sensoren senkrecht zu Motorenschrauben	Längsform (Einfacher Anschraubpunkt) Sensoren auf einer Ebene mit Motorenschrauben	Kreuzform (Doppelter Anschraubpunkt) Sensoren variabel	Rund, Variable Motorenschrauben, Sensoren fixiert	Aufnahme für Spindelmotoren	Rund, Sensoren verstellbar, fest eingebaut
Achse	Wie vorhanden	Wie vorhande, kürzere Variante	Mit abgedrehter Spitze zur Aufnahme der Kupplung (Spindelmotoren)			
Support/Verstellvorrichtung	Item-Schlitten	Kreuzsupport	Support (Eine Richtung)			

5.2.2 Ausgeführte Verbesserungen

5.2.2.1 Motoranschraubplatte

Um das Schwingverhalten des Motors um die Anschraubpunkte überprüfen zu können, ist ein variables Anschraubsystem entwickelt worden. Es wurde, bedingt durch die um 90° versetzten Motoranschraubpunkte, eine drehbare Einheit aus Sensoren und Motorenbefestigungsplatte gebildet (siehe Bild 5.2 rechts). Der Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass die Sensoren bei Verdrehen der Anschraubpunkte nicht jedes Mal neu vorgespannt werden müssen (vergleiche 5.3.1).

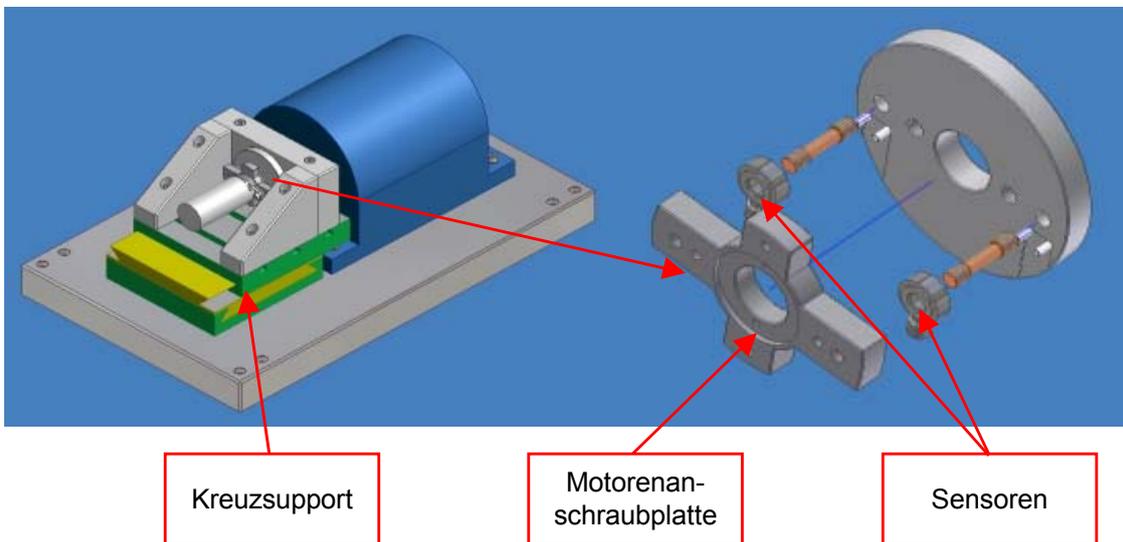


Bild 5.2: Die endgültige Version des Prüfstands. In der Explosionsdarstellung ist die neue Sensoren/ Motorbefestigungsplatteneinheit zu sehen.

5.2.2.2 Kreuzsupport

An dem vorhandenen Prüfstand war es sehr umständlich, den Prüfstand auf unterschiedliche Motorentypen einzustellen. Da die verschiedenen Motoren unterschiedliche Flexwellenlängen und Typen verwenden, muss der Abstand der Bremse von

dem Motor verändert werden. Es musste die komplette Bremse vom Fundament losgeschraubt werden und auf den richtigen Abstand verschoben werden. Zu diesem Zweck sind im Fundament für jede der vier Schrauben drei Bohrungen im Abstand von 15mm vorhanden. Es ist daher sehr zeitaufwendig, verschiedene Motortypen hintereinander zu messen.

Im neuen Konzept wurde aus diesem Grund ein Kreuzsupport integriert. Dieser hat die Vorteile, dass man großen Zeitaufwand bis zu 0,05 mm genau der axiale und horizontale Abstand des Motors von der Bremse und die Flucht der Flexwelle eingestellt werden können.

Als Kreuzsupport wird der Support Typ KT 150 der Fa. Proxxon verwendet, da sein Preis-Leistungsverhältnis sehr gut ist.

5.2.2.3 Achse

Es ist anzunehmen, dass die Achse bei der momentan am Prüfstand vorhandenen Länge leicht dazu neigt, auszuschlagen und unrund zu laufen. Da der Prüfstand dafür konzipiert wurde drehzahlabhängige Fehler an Elektromotoren zu selektieren, würde ein unrunder Lauf der Welle zur Überlagerung des eigentlichen Fehlers führen. Um die Gefahr des Auftretens dieses Fehlers zu minimieren, ist die Achse gekürzt worden.

5.2.3 Eigenfrequenzermittlung experimentell/ rechnerisch

Um den Prüfstand auf die Frequenzen der zu prüfenden Motoren abzustimmen, wurde eine FEM gestützte Eigenfrequenzanalyse durchgeführt. Die Analyse wurde sowohl für das neue Modell als auch für das alte vorhandene Modell durchgeführt. Die Berechnung des alten Modells sollte durch eine experimentelle Eigenfrequenzermittlung verifiziert werden.

Die Frequenzwerte eines Motors bei 6500 U/min werden in Tabelle 5.4 gezeigt (dieser Wert wurde gewählt, da die Motoren in den von CRH hergestellten Sitzverstellern mit höchstens 6000 U/min drehen und die Tendenz zu langsamer drehenden Motoren geht.). Die 6000 U/min beziehen sich auf Motoren, die einen Kommutator verwenden und keine „Easy-Entry“-Funktion besitzen. Diese Funktion dient zur Einstiegshilfe. Die Art von Motoren kann in der Easy-Entry-Funktion bis zu einer Drehzahl von 12000 U/min drehen. Sie werden aber in dieser Arbeit und an diesem Prüfstand nicht geprüft, da die Funktion im Fahrzeug ohne Last verwendet wird.

Tabelle 5.4: Frequenzen eines 8-nutigen Motors bei einer Drehzahl von 6500 U/min.

Einfluss	Frequenz/Hz	Formel	Ursache
Drehfrequenz	108	Drehzahl/60	
Polygon	325	3*Drehfrequenz	eventuell Polygonform des Kommutators/Vermutung
2,3 Mode des Polrohrs	758	7*Drehfrequenz	Vermutung
Nutfrequenz	867	8*Drehfrequenz	Bei 8-nutigen Motoren
Bürsten	1733	2*Nutfrequenz	2 Bürsten am Motor
2,3 Mode des Polrohrs	975	9*Drehfrequenz	Vermutung
Bürstengeräusch	2500-4000	—	Reibung der Bürsten auf den Kommutator

5.2.3.1 Experimentelle Eigenfrequenzanalyse

Die Eigenfrequenzanalyse wurde an dem bestehenden Prüfstand durchgeführt. Es wurden ein Modalhammer, Typ 2303-10 der Fa. Endevco, und ein triaxialer Beschleunigungsaufnehmer Typ 4506B bzw. monoaxialer Beschleunigungsaufnehmer, Typ 4508B 002 der Fa. Brüel&Kjaer, verwendet. Die genauen Daten sowie die Kalibrierscheine sind im Anhang zu finden. Die Versuchsaufbauten dokumentieren Bild 5.3 und Bild 5.6.

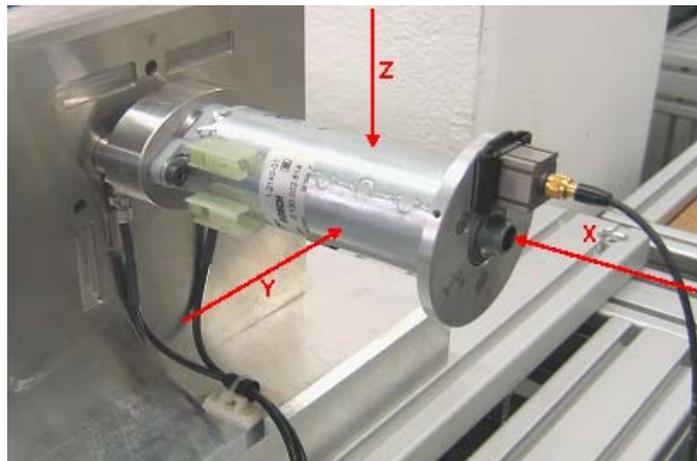


Bild 5.3: Messaufbau mit Magnetring und 3D-Beschleunigungssensor. Die Pfeile markieren die Anregpunkte und die dazugehörigen Koordinaten.

Die Annahme, dass der Ring wegen lockeren Sitzes an dem Motor durch die Hammeranregung vibriert, hat sich durch die folgenden Messungen bestätigt (Bild 5.5). Die Messungen wurden mit einem monoaxialen Beschleunigungssensor ohne Ring und zusätzlich mit dem monoaxialen Aufnehmer auf dem Ring (Bild 5.4) durchgeführt. Die Messung hat ergeben, dass in Y- und Z-Richtung keine sichtbaren Unterschiede zu erkennen sind. In X-Richtung zeigt sich eine starke Amplitudenänderung im Bereich von 900-1700 Hz (siehe Bild 5.5) die entweder der Eigenfrequenz des Ringes und/oder der zu geringen magnetischen Kontaktkraft zwischen Motor und Ring zuzuordnen ist. Aus diesem Grund sind die folgenden Eigenfrequenzmessungen

gen ausschließlich mit einem monoaxialen Beschleunigungssensor ohne Magnetring durchgeführt worden.



Bild 5.4: Probemessung zur Ermittlung des Verhaltens des Magnetringes in X-Richtung.

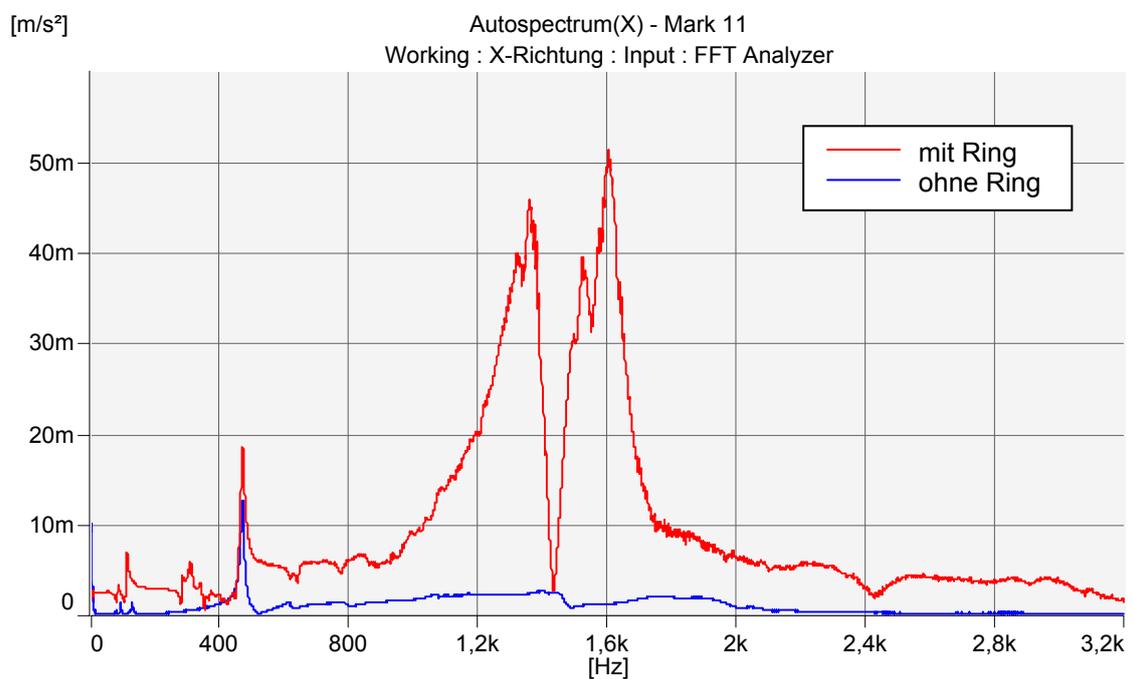


Bild 5.5: Vergleich mit und ohne Ring in X-Richtung mit 1D-Beschleunigungssensor.



Bild 5.6: Anordnung des 1D-Beschleunigungssensors

Die Ergebnisse der experimentellen Frequenzanalyse sind im folgenden Abschnitt in Tabelle 5.5 nachzulesen.

5.2.3.2 Numerische Eigenfrequenzanalyse

Die numerische Frequenzanalyse wurde mit Hilfe des FEM-Programms ANSYS-DesignSpace V7.0 berechnet. Ein Modell der zu berechnenden Version (siehe Bild 5.7) wurde erstellt und Werkstoffparameter eingegeben. Die genauen Definitionen für die eingegebenen Modellparameter sind im Anhang zu finden. (siehe Anhang 10.1.2)

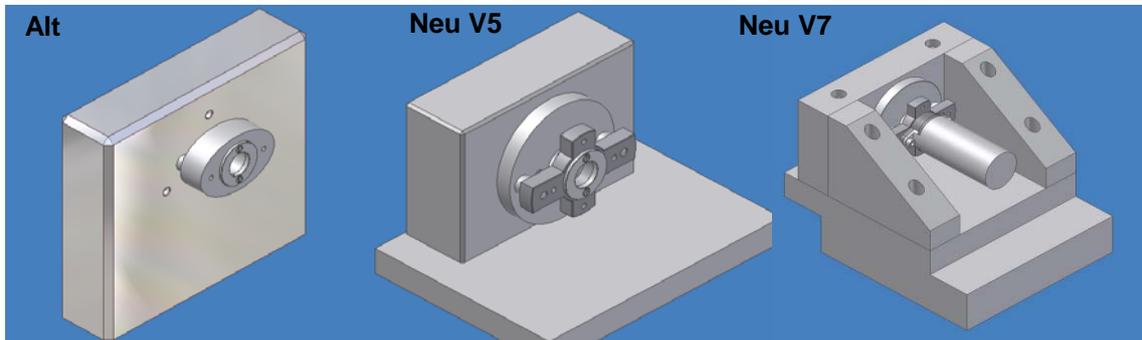


Bild 5.7: Übersicht einiger Versionen des Modells.

In das Modell wurden anfangs nur die Befestigungsplatte und später auch der Support mit einbezogen. Zu Vergleichszwecken wurde noch eine Berechnung mit dem ganzen Prüfstand inklusive aller Teile erstellt.

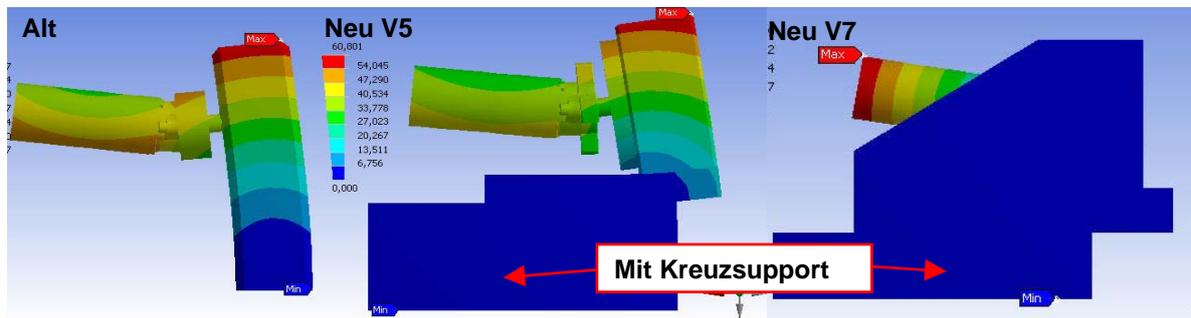


Bild 5.8: Vergleich der Berechnungsergebnisse der Konstruktionsentwicklung im 3. Mode. (Die Farbskalierungen in den Abbildungen sollten nicht beachtet werden, da sie keine Einheit repräsentieren).

5.2.3.2.1 Berechnungsgrundlagen

Die Materialien der verschiedenen Bauteile wurden definiert und für alle Modelle wurden für die jeweiligen Teile dieselben Materialien verwendet. Die Materialdaten wurden aus [XXVI] bezogen.

Die Unterseite des Modells wurde in allen drei Fällen als Festlagerung angenommen. Die Sensoren wurden näherungsweise aus hochfestem Stahl (1.4542) definiert und Sensorenbolzen und Sensoren als Blockmodell genommen. Das Sensorenmodell wird in Bild 5.9 dargestellt.

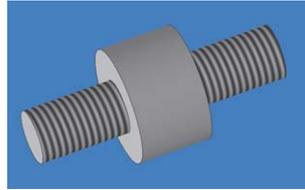


Bild 5.9: Modell der Sensoren.

Die Kontaktstellen wurden an den benötigten Stellen definiert. ANSYS berechnet die Eigenfrequenzen mit der folgenden Formel:

$$\omega = \sqrt{\frac{\text{Steifigkeit}}{\text{Masse}}} \quad (5.12)$$

Die Berechnung wird pro Element durchgeführt. Die Vernetzung zeigt Bild 5.10. Es wurde die Autovernetzungsfunktion gewählt.

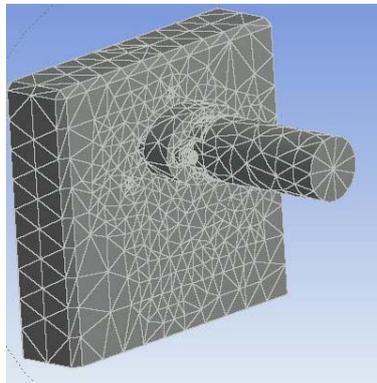


Bild 5.10: Vernetzung des Modells.

Die Ergebnisse der experimentellen und der berechneten Eigenfrequenzanalyse sind in Tabelle 5.5 und Bild 5.11 zusammengefasst.

Tabelle 5.5: Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den Werten aus der experimentellen Modalanalyse.

Mode	Messung	Rechnung	Abweichung	
	Frequenz / Hz		in %	in Hz
1	120	379	215,5	258,6
2	356	867	143,6	511,0
3	471	1145	143,1	673,9
4	996	1940	94,8	944,5
5	1675	2048	22,3	373,0

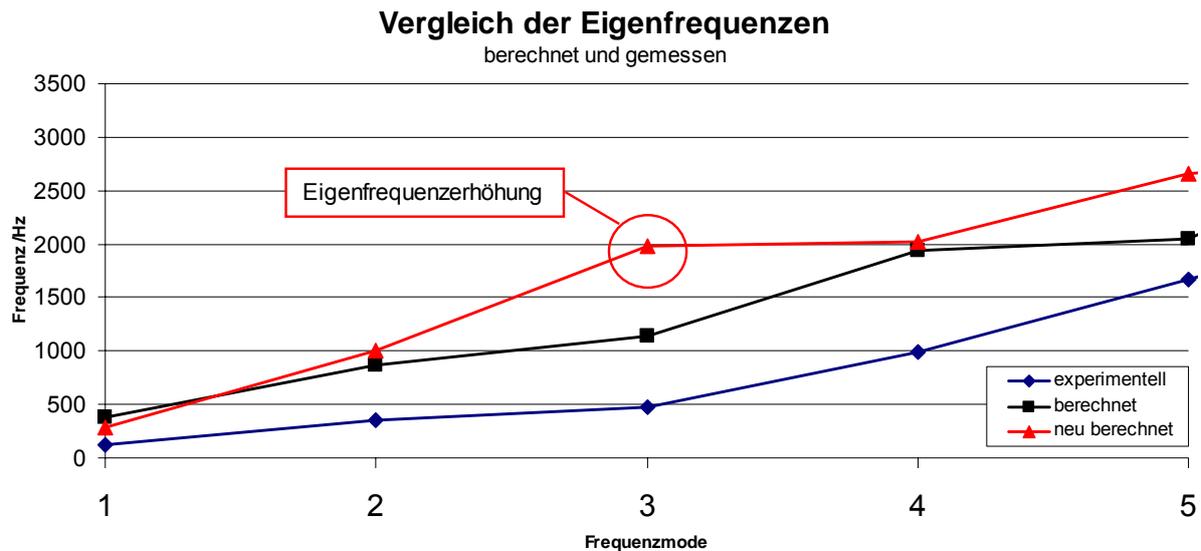


Bild 5.11: Verlauf der Eigenfrequenzen experimentell/berechnet.

Das Ergebnis der Berechnung weicht in großem Maße von den gemessenen Werten ab und zeigt, dass das Modell in diesem Fall nicht dazu verwendet werden kann, um ein genaues Ergebnis für das neu konstruierte Bauteil zu liefern. Damit die Modelle brauchbar werden, müssten sie in ihren Eigenschaften noch verfeinert werden, was aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Da sich aber die Kurvenverläufe der Eigenfrequenzen nur durch einen Offset unterscheiden, können die Ergebnisse als Richtwert genommen werden. Sodass im dritten Mode definitiv eine Eigenfrequenzerhöhung des neu konstruierten Prüfstandes zu erkennen ist. Der erste und zweite Frequenzmode ist dem Motor zuzuweisen.

5.3 Aufbau

5.3.1 Montage der Kraftaufnehmer

An diesem Prüfstand werden zwei 3-Komponenten-Kraftsensoren (Typ 9017B) der Fa. Kistler verwendet. Die Kraftsensoren benötigen eine Standardvorspannung von 10 kN. Diese Vorspannkraft ist die Voraussetzung für die lineare Messfähigkeit der Sensoren.

5.3.1.1 Vorgehensweise

Die Idee, die Vorspannkraft mit Hilfe eines Drehmomentschlüssels aufzubringen, wurde wieder verworfen. Dieses Verfahren erwies sich als zu ungenau. Einige Berechnungsfaktoren sind nicht genau genug oder gar nicht vom Hersteller angegeben

worden und daher war eine genaue Berechnung des Anzugsmomentes mit Formel (5.13) nicht möglich.

$$M_A = F_M (0,16 \cdot P + 0,58 \cdot \mu_G \cdot d_2 + \mu_K \cdot r_m) \quad (5.13)$$

(Formel (5.13) aus [1] S. 185)

Mit: M_A = Anziehungsmoment /Nm

F_M = Standardvorspannung /kN

P = Steigung des Gewindes /mm

μ_G = Reibzahl im Gewinde

d_2 = Flankendurchmesser des Gewindes /mm

μ_K = Reibzahl an der Kopf- bzw. Mutterauflagefläche

r_m = mittlerer Auflageradius /mm

Da es sich bei dieser Formel um eine Näherung handelt, ist sie für unsere Zwecke nicht brauchbar.

Aus diesem Grund und nach Rücksprache mit der Fa. Kistler, die ein Leihgerät zur Verfügung gestellt hat, wurde die Vorspannung mit einem Schraubenschlüssel aufgebracht und die erzeugte Ladung mit Hilfe eines Handladungsverstärkers Typ 5995 (Bild 5.12) gemessen.



Bild 5.12: Messaufbau zur Ermittlung der Vorspannkraft.

Bild 5.12 zeigt den Messaufbau zum Vorspannen der Kraftsensoren. Es wurden die Z-Signale des linken und des rechten Sensors angeschlossen, da die Vorspannkraft ausschließlich in Z-Richtung aufgebracht wird.

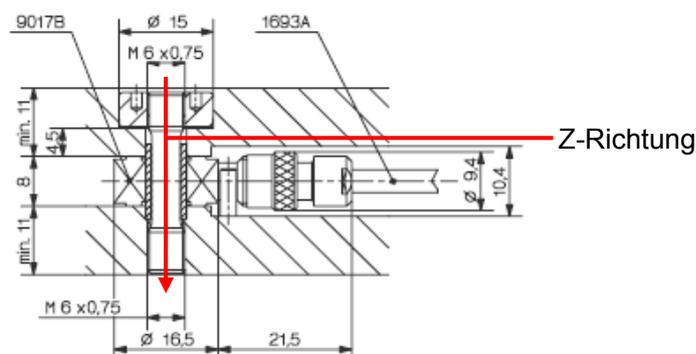


Bild 5.13: Zeichnung des eingespannten Sensors (aus [XXII]).

Das Signal, welches vom Sensor kommt, ist aufgrund der verwendeten Piezotechnik, in Verbindung mit dem Handladungsverstärker, quasistatisch. Daher ist es möglich, den Vorspannvorgang, der bis zu 20 min. oder länger dauern kann, ohne nennenswerte Ladungsverluste durchzuführen. Das Display des Ladungsverstärkers zeigt die momentane Ladung in pC an. Wegen der nichtstatischen Signale muss dafür gesorgt werden, dass alle erzeugten Ladungen der Sensoren erfasst werden, damit die Sensoren eine gleichmäßige Vorspannung aufweisen. Aus diesem Grund wurden die Signale über ein BNC-T-Stück summiert (siehe Bild 5.12). Dieses ist möglich, da es sich bei der Ladung um eine Feldgröße handelt und Feldgrößen sich vektoriell addieren lassen.

Damit die gewünschten 10 kN Vorspannkraft je Sensor erreicht werden, wird die Vorspannkraft mit der Anzahl der Sensoren multipliziert. Die pC-Werte müssen noch in die benötigte Kraft N umgerechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe der im Kalibrierschein definierten Sensitivitäten, die in Tabelle 5.6 aufgelistet sind.

Tabelle 5.6: Sensitivität der Sensoren laut Kalibrierschein.

Richtung	Seriennummer		Mittelwert	Einheit
	1312246	1312245		
F_x	-25,98	-25,96	-25,97	pC/N
F_y	-25,63	-25,59	-25,61	pC/N
F_z	-11,39	-11,34	-11,365	pC/N
F_z**	-12,82	-12,88	-12,85	pC/N

F_z**= ohne Vorspannung

Da die Sensorsignale summiert wurden, wurde der Mittelwert der Sensitivitäten, also $-12,85 \text{ pC/N}$, verwendet. Die Vorspannung wurde anschließend in 10 Schritten vorgenommen. Die Schrittfolge wird in Tabelle 5.7 erläutert.

Tabelle 5.7: Vorgehensweise zur Vorspannung der Sensoren.

Schritt	Sensor Nr.	Total Vorspann- kraft / N	Tatsächliche Ladung /pC	Anzeige	
1	1312245	2000	25700	25700	
2	1312246	4000	51400	51400	
3	1312245	6000	77100	77100	Nullabgleich
4	1312246	8000	102800	25700	
5	1312245	10000	128500	51400	
6	1312246	12000	154200	77100	Nullabgleich
7	1312245	14000	179900	25700	
8	1312246	16000	205600	51400	
9	1312245	18000	231300	77100	Nullabgleich
10	1312246	20000	257000	25700	

Die Nullabgleiche sind ausgeführt worden, da am Ladungsverstärker höchstens ein Messbereich von 100000 pC eingestellt werden kann. Die Sensoren wurden abwechselnd vorgespannt. Diese Vorgehensweise erlaubt eine gleichmäßige Vorspannung der beiden Sensoren.

5.4 Kalibrierung der Sensoren

Um die Genauigkeit der Messungen im Frequenzbereich zu gewährleisten und eventuelle Ungenauigkeiten zu lokalisieren, wurden mehrere Kalibrierungsmessungen vorgenommen.

5.4.1 Messaufbau und Auswertung

Für die Messungen wurden zwei verschiedene Arten der Erregung genutzt. Es wurden ein Modalhammer der Fa. Endevco, der auch schon in Kapitel 5.2.3 genutzt wurde, und ein Shaker der Fa. Tira, Typ S521-25, verwendet.

5.4.1.1 Modalhammer

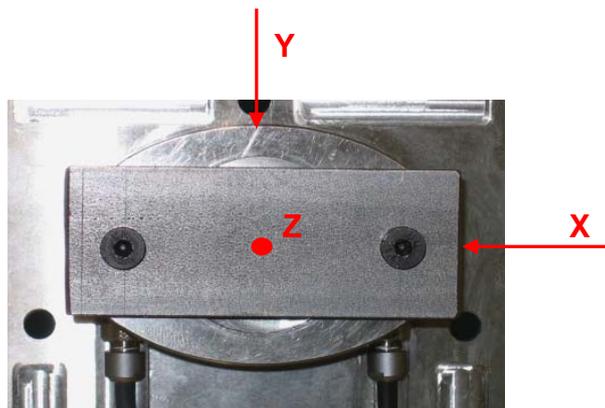


Bild 5.14: Anregungspunkte und Koordinaten.

Mit einem Modalhammer wurde die Motorbefestigungsplatte der Sensoren in alle 3 Achsrichtungen angeregt (Bild 5.15). Es wurden die Koordinaten der Kraftsensoren am Prüfstand verwendet. Um in Z-Richtung mittig zwischen den Sensoren anregen zu können, wurde eine Platte aus 5mm dickem Stahl gefertigt.

Beide Kraftsensoren sind in die jeweilige Erregungsrichtung an das Frontend angeschlossen worden, das Referenzsignal, d.h. der Modalhammer, ebenfalls. Im folgenden Bild wird aus jeder Koordinate nur eine Anregungsseite (hier die linke) gezeigt. Die Spektren der anderen Seite geben ca. dasselbe Bild wieder.

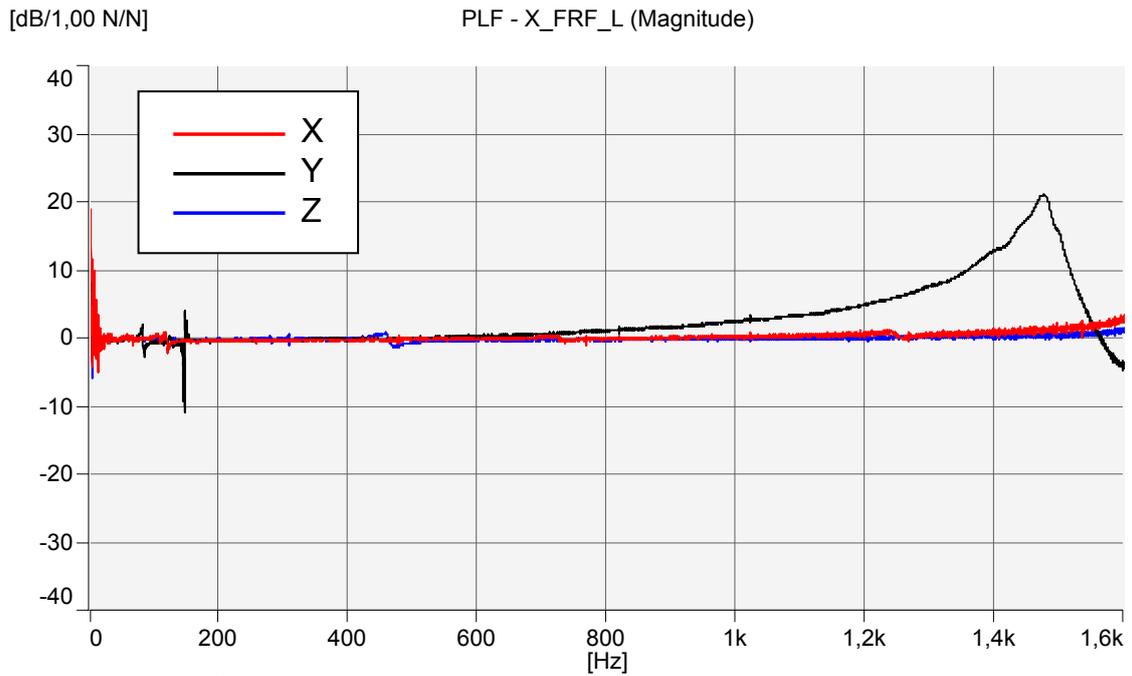


Bild 5.15: Beträge der Übertragungsfunktionen X,Y,Z.

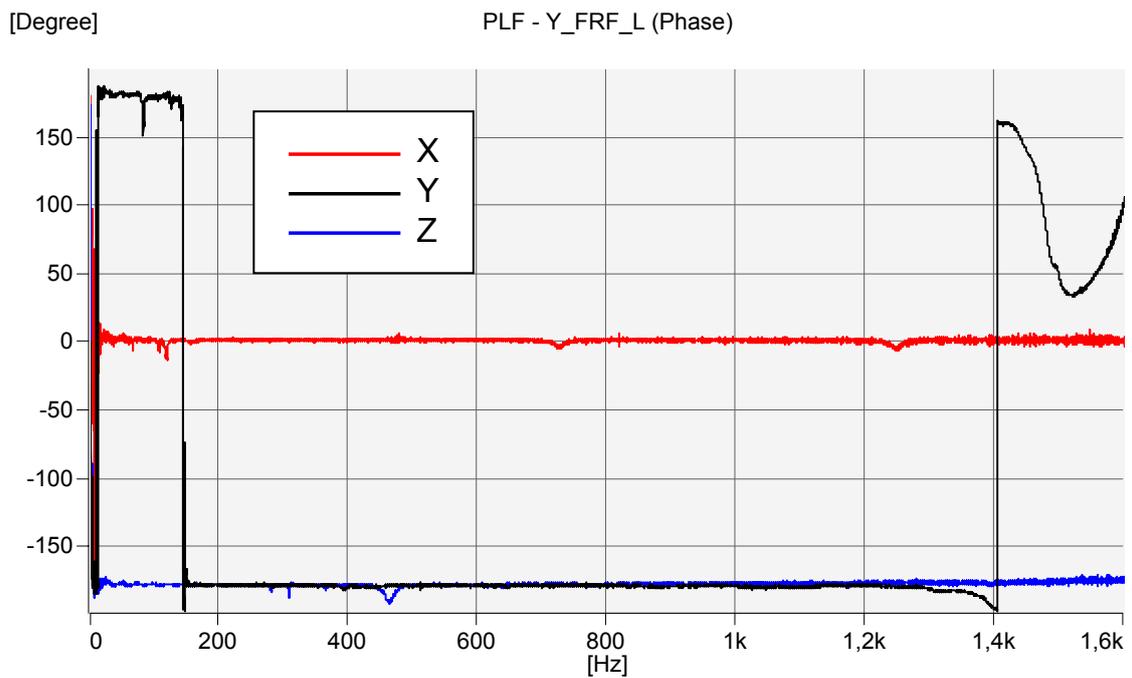


Bild 5.16: Phasen der Übertragungsfunktionen X,Y,Z.

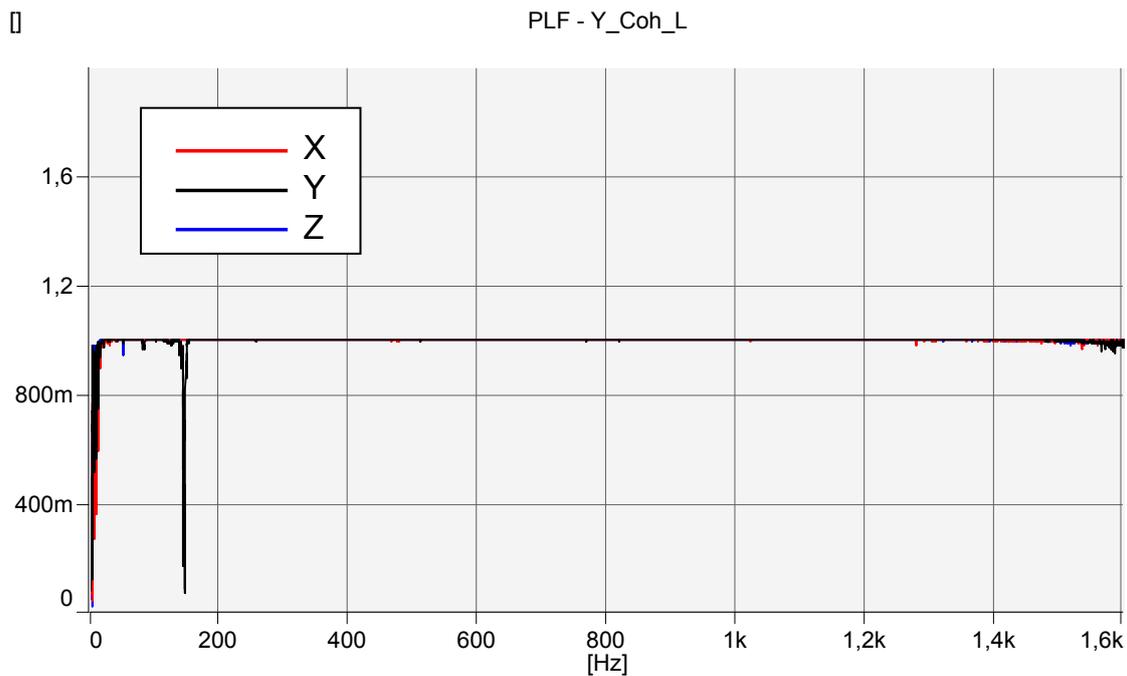


Bild 5.17: Kohärenzfunktionen X,Y,Z.

In der Kohärenzfunktion des Y-Sensors ist eine Unstetigkeit bei ca. 145 Hz zu erkennen. Die Kohärenz tendiert dort gegen Null und es ist somit in diesem Bereich nur ein geringer Zusammenhang zwischen Eingangss- und Ausgangssignal vorhanden.

Bild 5.18 zeigt den Frequenzbereich, der durch den Modalhammer angeregt worden ist. Nach [XIII] liegt der auswertbare Frequenzbereich bis 10-20 dB unter der Anfangsamplitude (hier zwischen 1500Hz und 1800Hz).

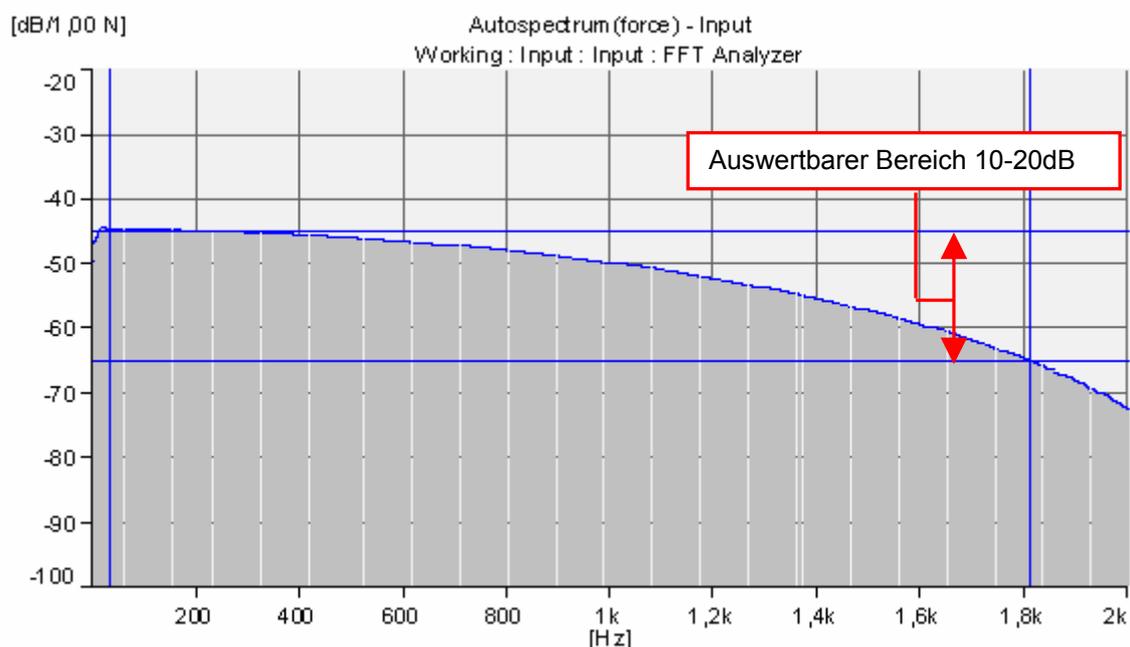


Bild 5.18: Autospektrum des Eingangssignals mit verwendbarem Messbereich.

5.4.1.2 Shaker

Der Messaufbau wird in Bild 5.19 und Tabelle 5.8 illustriert.

Tabelle 5.8: Komponenten der Kalibrierung mit Shaker.

1. Referenzkraftsensor	Misst den Impuls direkt zwischen Stinger und Prüfobjekt
2. Stinger	Metallstab, der den Impuls vom Shaker auf den Prüfstand überträgt
3. Shaker	Wandelt das Signal des Generators in Bewegung um
4. Signalverstärker	Verstärkt das Signal des Generators für den Shaker
5. Frontend	Nimmt die Signale der triaxialen Kraftsensoren auf und verarbeitet sie

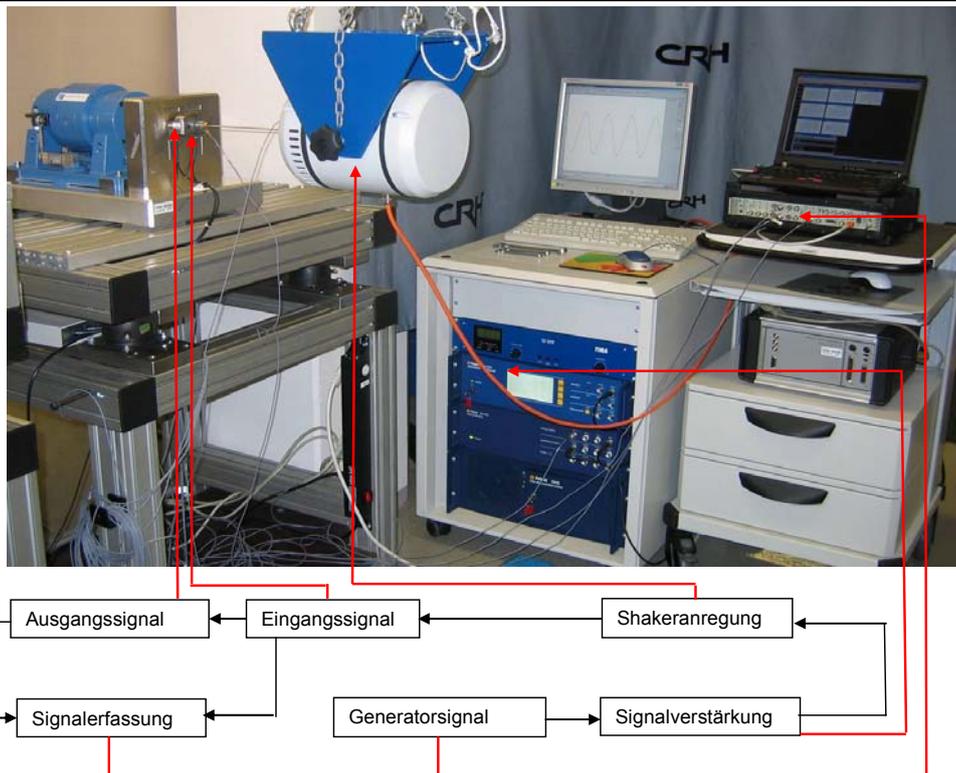


Bild 5.19: Messaufbau mit Blockdiagramm der Kalibrierung mit Shaker.

Zur Kalibrierung in der Frequenzebene gibt es verschiedene Hilfsmittel, die den Vergleich zwischen Eingangsfrequenz und Ausgangsfrequenz erleichtern. Beschreibungen der Kohärenz und der Übertragungsfunktion (FRF) befinden sich in Kapitel 3.

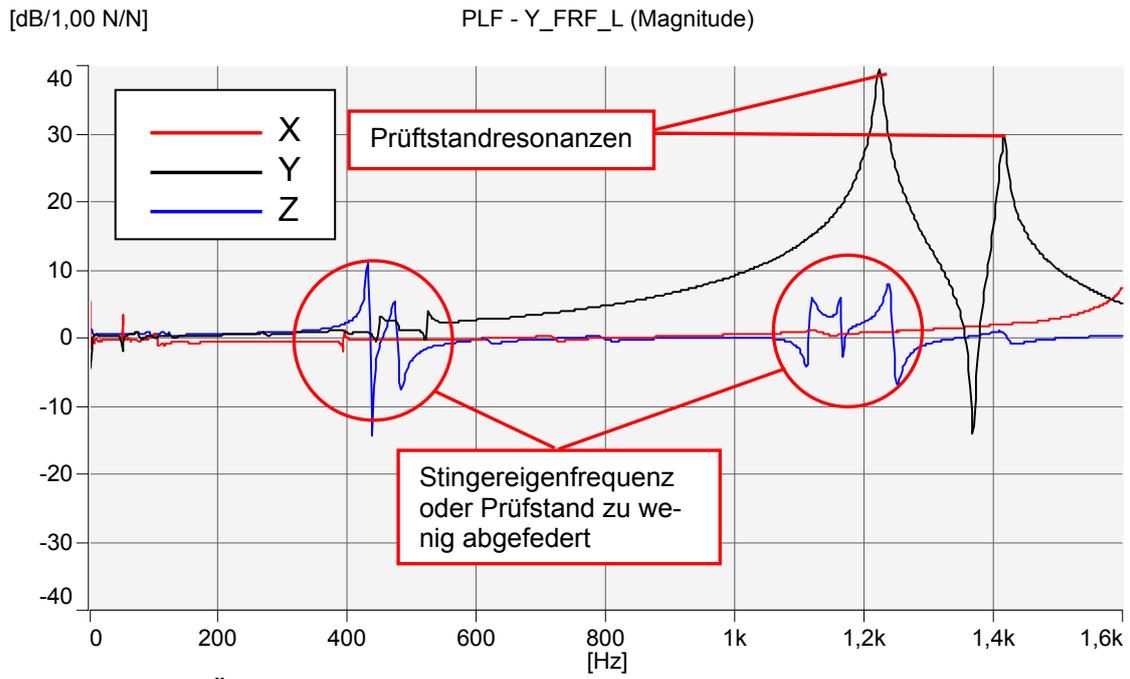


Bild 5.20: Beträge der Übertragungsfunktionen X,Y,Z.

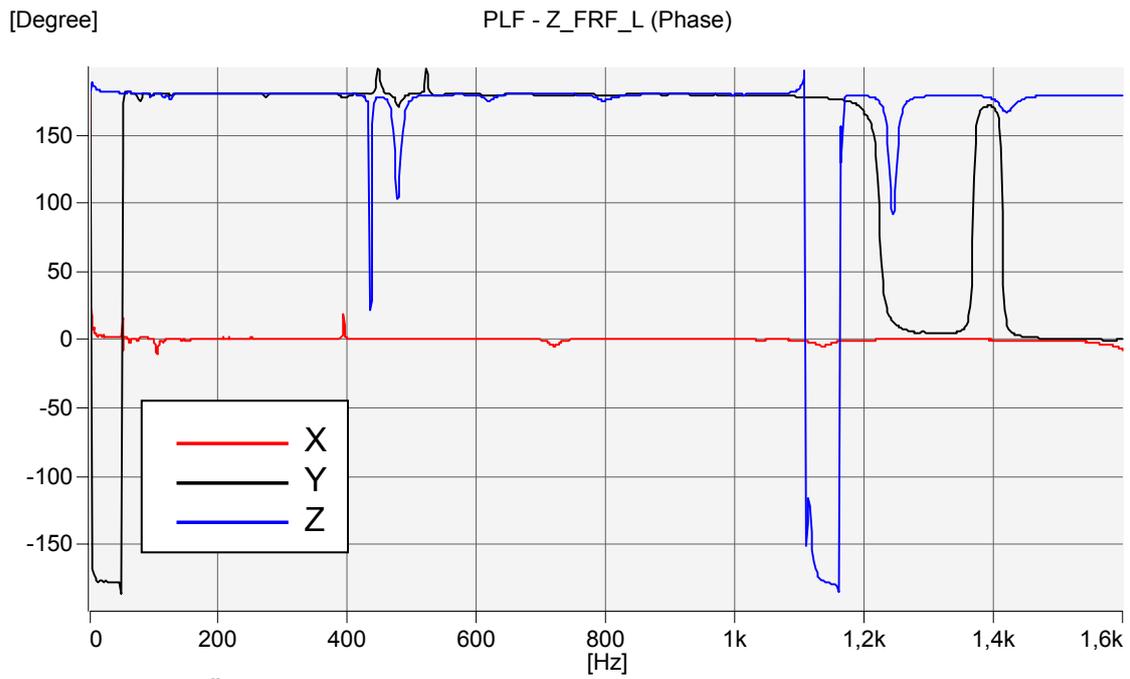


Bild 5.21: Phasen der Übertragungsfunktionen X,Y,Z.

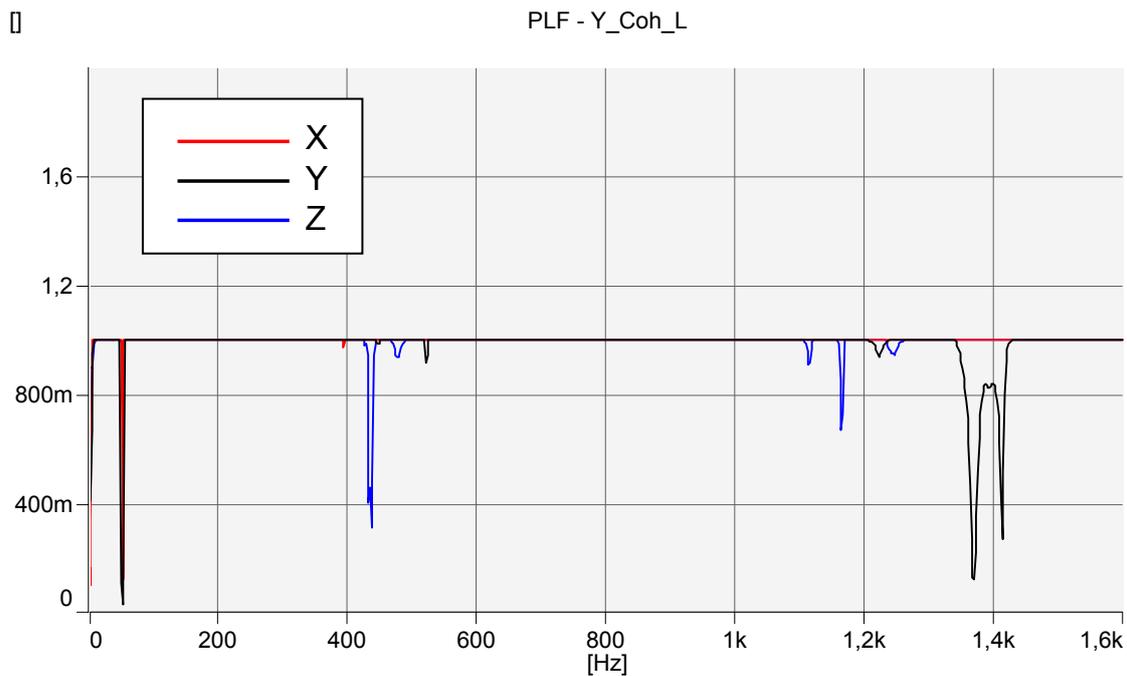


Bild 5.22: Kohärenzfunktionen X,Y,Z.

Die Kohärenz der Kalibrierung mit Shaker zeigt mehrere Unstetigkeiten. Dass in Z-Richtung bei ca. 450 Hz und zwischen 1100 Hz und 1200 Hz Unstetigkeiten auftreten, belegt den eventuellen Einfluss des Stingers auf das Messergebnis.

5.4.2 Ergebnisse

5.4.2.1 Verwendbare Frequenzbereiche

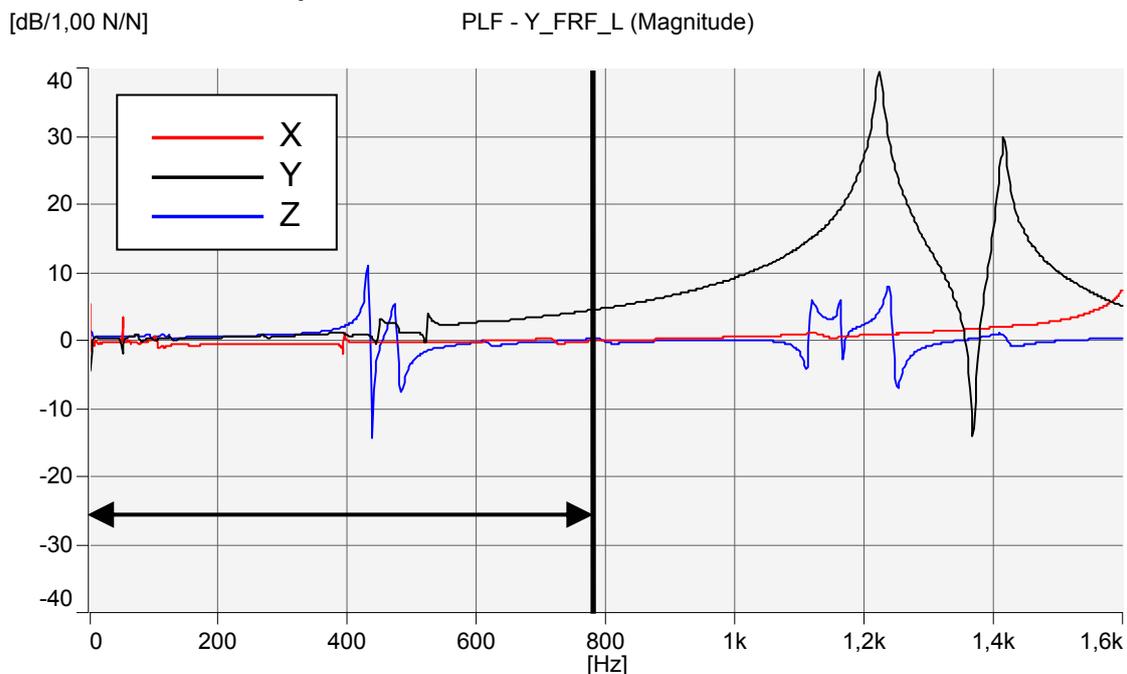


Bild 5.23: Auswertbarer Frequenzbereich (Shaker).

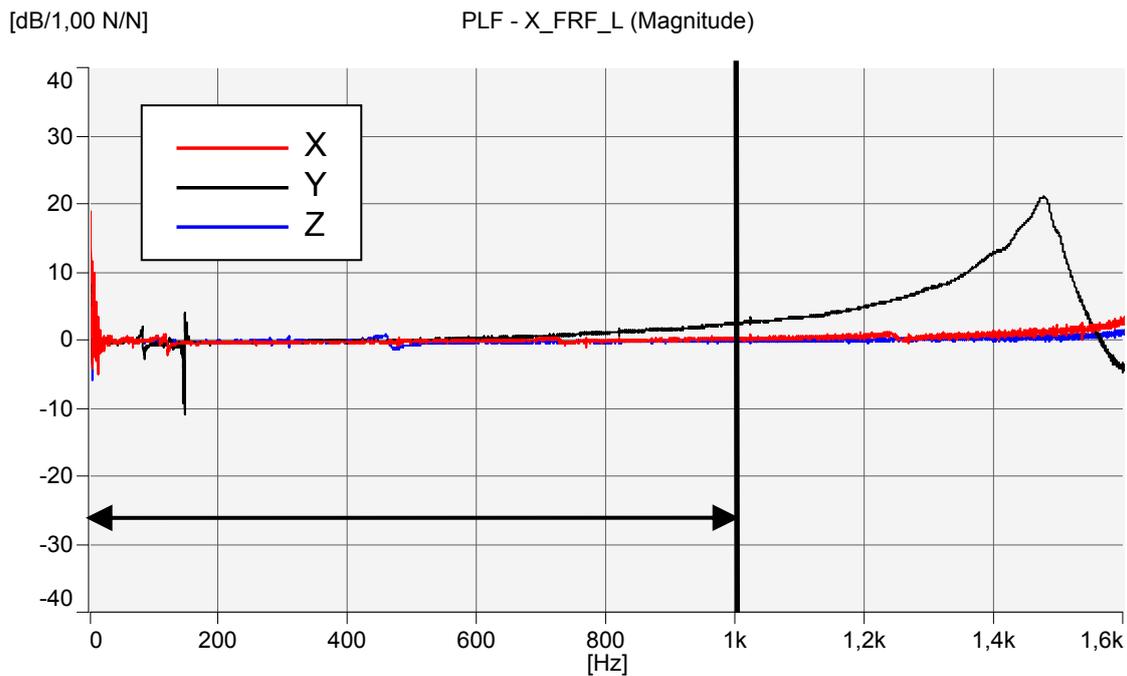


Bild 5.24: Auswertbare Frequenzbereiche (Modalhammer).

Als Erstes ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Verfahren nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Die Unterschiede der Resonanzpeaks zwischen Modalhammer und Shaker sind darauf zurückzuführen, dass durch die feste Verbindung des Shakers mit dem Prüfstand, die Gesamtmasse erhöht wird und daraus folgend eine Eigenfrequenzreduzierung stattfindet.

Der Vorteil der Kalibrierung mit Modalhammer ist, dass der Prüfstand in seinem Standardzustand belassen werden kann und nicht weich gelagert werden muss, wie es die Kalibrierung mit Hilfe des Shakers zur Vermeidung von Stingerresonanzen (siehe Bild 5.20) verlangt. Zusätzlich wird die weiche Lagerung auch benötigt wenn mit höheren Kräften kalibriert werden soll.

Eine Faustformel besagt, wenn im Frequenzgang eine Resonanzstelle vorhanden ist, liegt der messtechnisch auswertbare Bereich bis 70% vor der Resonanzstelle. In Bild 5.23 und Bild 5.24 sind die auswertbaren Bereiche des Y-Sensors markiert. In X und Z-Richtung sind in dem ausgewerteten Frequenzbereich bis 1600 Hz keine Resonanzen vorhanden. Die Resonanzstelle bei ca. 1500 Hz ist einer Eigenfrequenz des Prüfstandes zuzuordnen.

6 Messungen

Das Hauptanliegen dieser Arbeit liegt in der drehzahlabhängigen Analyse von Gleichstromelektromotoren.

Es wurden 6 Motoren, die von der Fa. Bosch als Referenzmuster ausgewählt wurden, verglichen. Die Motoren wurden jeweils in negativer (CCW, counterclockwise, gegen den Uhrzeigersinn) und in positiver (CW clockwise, im Uhrzeigersinn) Drehrichtung gemessen. Um die Datenflut etwas einzuschränken, sind im Folgenden nur Auswertungen in positiver Drehrichtung (CW) durchgeführt worden. Die Fahrzeugmessungen sind in beiden Verstellrichtungen bewertet worden.

6.1 Fahrzeugmessung

Die Fahrzeugmessungen wurden im Vorfeld dieser Arbeit von Dipl. Ing. P. Borowczyk aus der Abteilung Akustik & Schwingungen durchgeführt. Dabei wurden die Testmotoren in einem Sitzversteller im Fahrzeug (3'er BMW; E90) eingebaut und mit einem Kunstkopf der Fa. Brüel&Kjaer (Bild 6.1) akustisch vermessen. Die Motoren wurden ausschließlich in die SHV (Sitzhöhenverstellung) eingebaut. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Messungen an einem Fahrersitz durchgeführt wurden und sich der Motor der SHV bei den verwendeten Sitzen des Typs E90 auf der linken Seite befindet, sodass die Priorität der Auswertung der Fahrzeugmessungen auf das linke Mikrofon gelegt und das rechte Mikrofon vernachlässigt wurde.



Bild 6.1: Messaufbau der Fahrzeugmessung.

6.1.1 Messaufbau

6.1.2 Subjektive Bewertung

Inwieweit ist eine subjektive Bewertung vergleichbar? Damit dieser Frage auf den Grund gegangen werden kann, wurden die aufgezeichneten Rohdaten in ein kalibriertes *.WAV-Format konvertiert und anschließend mit dem Programm „Sound-Quality“ der Fa. Brüel&Kjaer von mehreren Prüfpersonen subjektiv bewertet.

6.1.2.1 Auswertungsbogen

Um auf ein gemeinsam auswertbares Ergebnis zu kommen, wurde der in Bild 6.2 gezeigte Bewertungsbogen erstellt. Auf der rechten Seite sind die festgelegten Bewertungskriterien aufgelistet. Zur Bewertung sind drei Möglichkeiten vorgesehen: 0, 1, 2; wobei 0=i.O. (grün), 1=grenzwertig (gelb) und 2=n.i.O. (rot) bedeutet.

Die Probanden haben die Bewertung unabhängig voneinander durchgeführt.

Auswertung der Motoren 1-6
 Bewertungsart **Subjektiv**
 Messort Fahrzeug

Motor Nr.	Funktion	Last	Richtung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	Σ	Bewertungskriterien		
1	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 1 Laufruhe	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 2 Hochfrequent	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 3 Tieffrequent
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 4 Sirren
2	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 5 Rasseln	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 6 Pfeifen	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 7 Ozilierend
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 8 Geräusch angenehm
3	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 9 Geräuschgleichmäßigkeit	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 10 Lautstärke	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 11 Brummen
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0 i.O.
 1 Grenzwertig
 2 n.i.O.

Bild 6.2: Bewertungsbogen für die subjektive Bewertung.

6.1.2.2 Ergebnisse

Die bearbeiteten Bewertungsbögen sind im Anhang zu finden.

Aus den ausgefüllten Bögen wurde pro Zeile die Summe der Bewertungspunkte gebildet. Aus diesen Daten ergibt sich eine Rangfolge der jeweiligen Motoren pro Zeile.

Anschließend ist die Häufigkeit der Platzierungen des jeweiligen Motors ausgewertet worden (siehe Bild 6.3) (Platz 1= bester Motor; Platz 6 = schlechtester Motor).

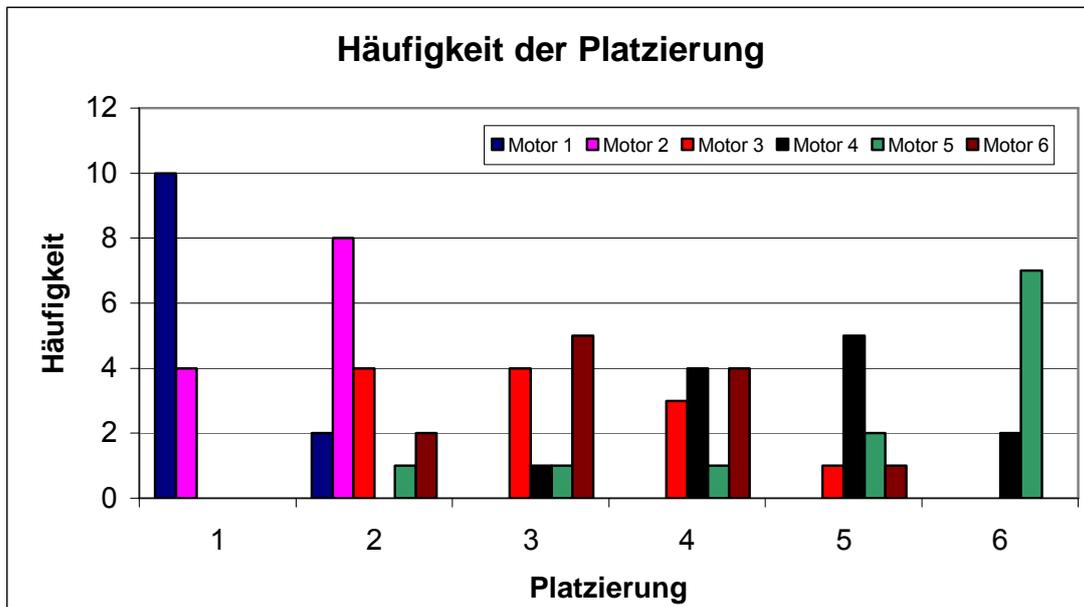


Bild 6.3: Welcher Motor wurde wie oft mit welcher Platzierung bewertet?

Da sich aus dieser Auswertung kein genaues Ergebnis ablesen ließ, ist ein anderes Bewertungsverfahren erarbeitet worden. Proband 1 wurde als Referenz genommen, da er im Umgang mit der Akustik von Gleichstrommotoren die meiste Erfahrung der drei Probanden aufweist. Bild 6.4 zeigt die gewählte Vorgehensweise der Bewertung der subjektiven Beurteilung. Es sind die Summen jeder einzelnen Messung bzw. Spalte (0kg, 100kg, auf, ab) gebildet worden und für jeden Motor ist nochmals aus allen Messungen die Summe gebildet worden.

Motor Nr.	Funktion	Last	Richtung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	Σ	
3	SHV	0 kg	auf	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	grün	gelb	grün	grün	grün	2	
			ab	grün	gelb	grün	1									
		100 kg	auf	grün	gelb	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	gelb	grün	grün	grün	3
			ab	grün	gelb	grün	1									
Summe aller Bewertungspunkte des Motors =															7	

Bild 6.4: Vorgehensweise zur Auswertung des Bewertungsbogens am Beispiel Motor 3.

Aus den Ergebnissen wurde anhand der Bewertung von Proband 1 ein Bewertungsverfahren entwickelt. Die Grenze zwischen einem i.O. Motor und einem n.i.O. Motor wurde bei 8 Gesamtpunkten festgelegt.

Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse der Auswertung. grün hinterlegte Felder bedeuten i.O., rot hinterlegte n.i.O..

Tabelle 6.1: Summe der Bewertungspunkte.

	Proband 1	Proband 2	Proband 3
Motor 1	0	24	5
Motor 2	3	29	6
Motor 3	7	39	14
Motor 4	15	41	23
Motor 5	11	54	32
Motor 6	8	37	18

Das Ergebnis zeigt, dass in den Bewertungen der 3 Probanden teilweise nicht vernachlässigbare Unterschiede zu erkennen sind und wie in der vorhergehenden Auswertung kein einheitliches Ergebnis ablesbar ist. Das zeigt, dass die subjektive Bewertung mit Vorsicht zu behandeln ist und nicht voreilige Schlüsse daraus gezogen werden sollten.

Zu beachten ist, dass diese Bewertungsverfahren darstellen sollen, wie unterschiedlich die Ergebnisse ausfallen können, wenn mehrere Personen ein und denselben Motor unabhängig voneinander bewerten. Die subjektive Bewertung stellt dennoch ein unverzichtbares Instrument für die akustische Auswertung dar, sollte aber immer mit einer objektiven Bewertung gekoppelt sein.

6.1.3 Objektive Bewertung

6.1.3.1 Terzspektrum

Da die Messungen in einem Fahrzeug der Marke BMW durchgeführt wurden, sind die Auswertungen der Mitarbeiter der Abteilung Akustik und Schwingungen nach einer BMW Prüfvorschrift erstellt worden.

Es sind zwei Grenzkurven festgelegt. Wenn die erste im gesamten Spektrum dreimal überschritten oder berührt wird, ist das Messergebnis als n.i.O. zu bewerten. Wird die zweite Grenzkurve einmal überschritten oder berührt, ist das Messergebnis ebenfalls als n.i.O. zu bewerten. Ein Beispiel aus dieser Messreihe zeigt Bild 6.5.

6.1.3.2 FFT

Um die Ergebnisse der Ordnungsanalyse (Abschnitt 6.2) und die dort auffälligen Frequenzen genauer mit denen der Fahrzeugmessung vergleichen zu können, ist eine FFT der Messungen im Fahrzeug durchgeführt worden. Es wurden zur Auswertung die Messdaten der Messreihe „0kg Last auf“ gewählt, da diese bei der subjektiv am schlechtesten bewertet wurde und objektiv (Terzanalyse) ebenfalls schlechter als die sonstigen Messungen abgeschnitten hat.

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der FFT aus den Fahrzeugmessungen. Als Referenz wurde Motor 2 gewählt.

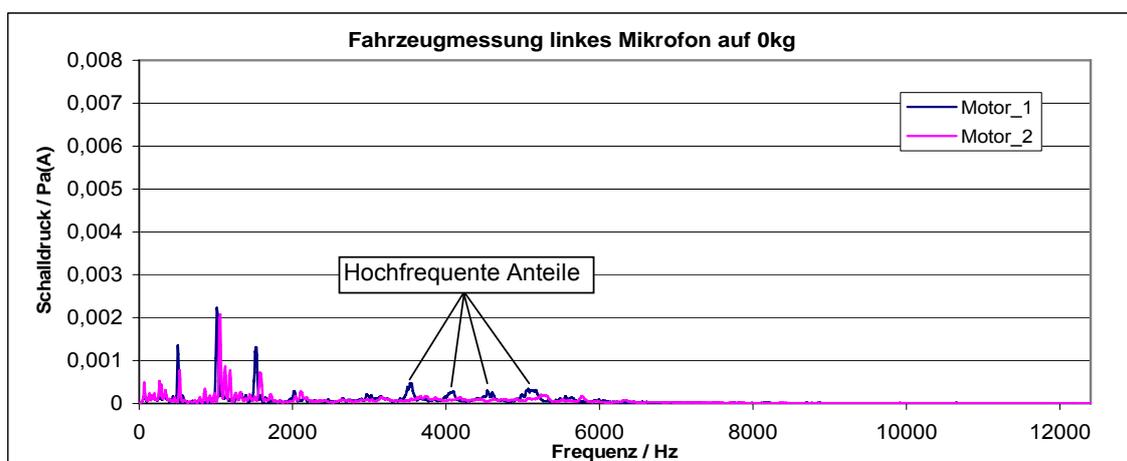


Bild 6.6: Vergleich Motor 2 mit Motor 1.

Motor 1 hat im Vergleich zu Motor 2 einen geringeren Anteil an hohen Frequenzkomponenten. Diese sind subjektiv kaum wahrnehmbar. Keiner der Probanden hat Motor 1 als hochfrequent bewertet.

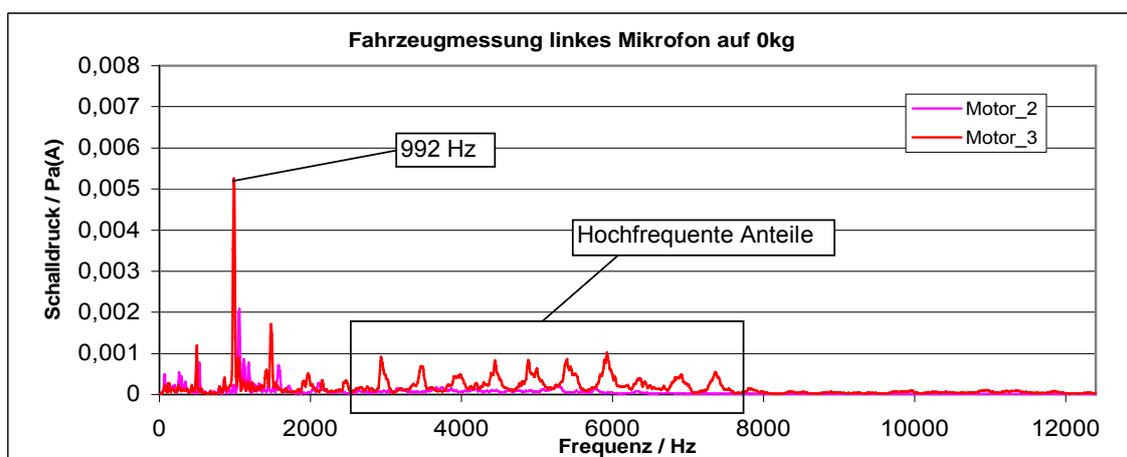


Bild 6.7: Vergleich Motor 2 mit Motor 3.

Motor 3 zeigt, wie schon in der Terzanalyse festgestellt, einen Peak bei 992 Hz. Zusätzlich sind hochfrequente Anteile im Bereich zwischen 3000 und 7000 Hz vorhanden.

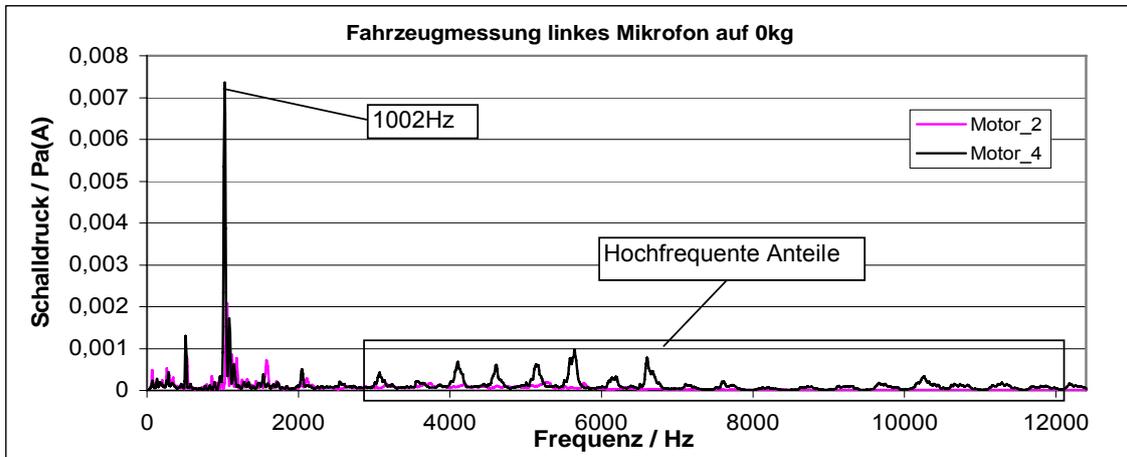


Bild 6.8: Vergleich Motor 2 mit Motor 4.

Motor 4 hat einen stark ausgeprägten Peak bei 1002 Hz (16. Harmonische der Drehfrequenz). Zusätzlich sind hochfrequente Anteile vorhanden.

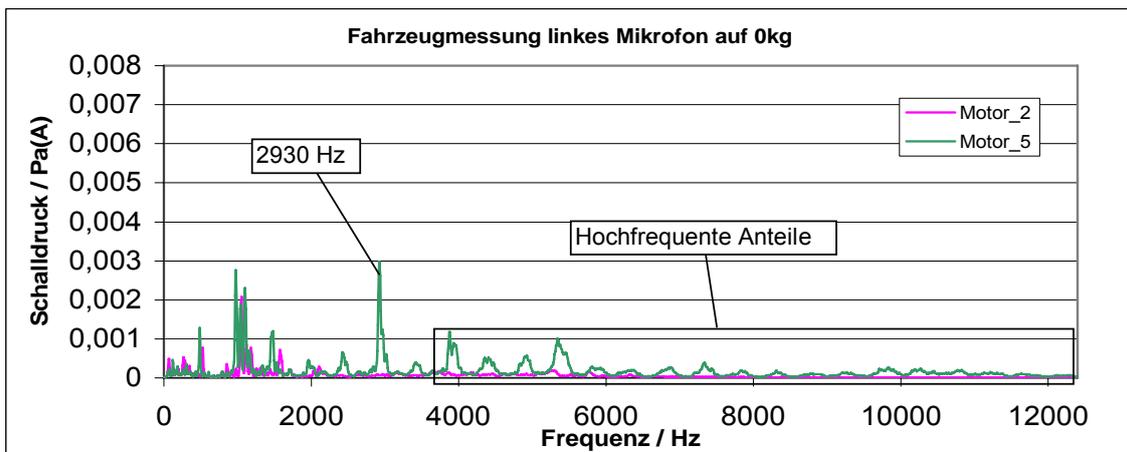


Bild 6.9: Vergleich Motor 2 mit Motor 5.

Motor 5 besitzt einen hohen Peak bei der 48. Harmonischen und starke hochfrequente Anteile.

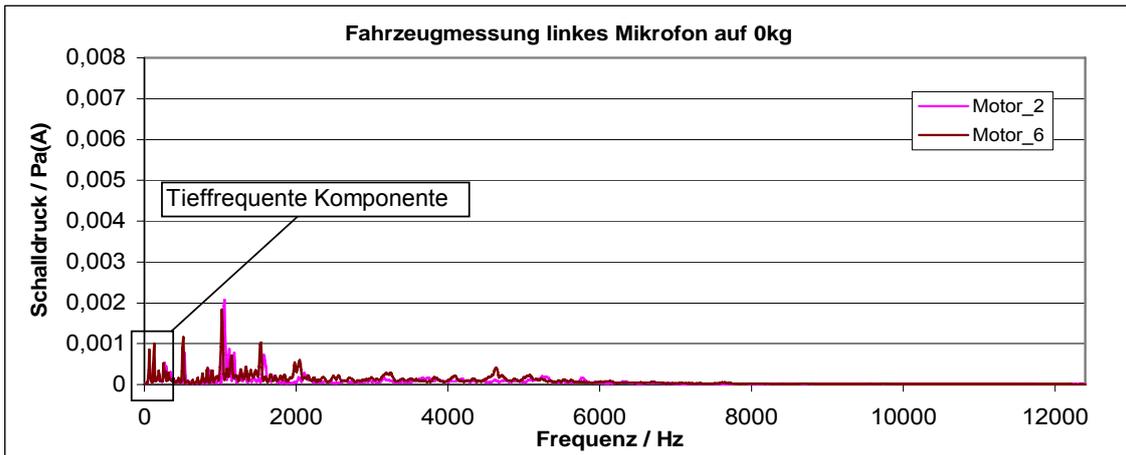


Bild 6.10: Vergleich Motor 2 mit Motor 6.

Die Auffälligkeiten von Motor 6 beschränken sich auf tieffrequente Anteile im Bereich der Drehfrequenz.

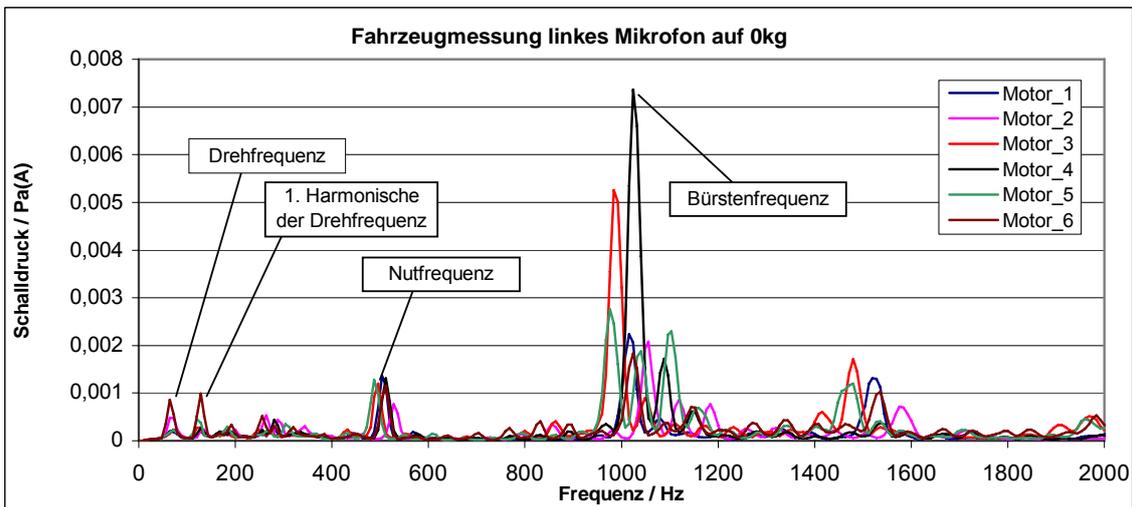


Bild 6.11: Übersicht der Motorspezifischen Frequenzen.

Tabelle 6.4: Drehfrequenz und Motorabhängige Vielfache.

Einfluss	Formel	Ursache
Drehfrequenz	Drehzahl/60	
Nutfrequenz	8*Drehfrequenz	Bei 8-nutigen Motoren
Bürsten	2*Nutfrequenz	2 Bürsten am Motor
Bürstengeräusch	—	Reibung der Bürsten auf dem Kommutator (zwischen 2500 und 4000 Hz)

Aus Tabelle 6.4 lassen sich für die Messwerte folgende Ergebnisse für die motorabhängigen Frequenzen herleiten.

Tabelle 6.5: Drehfrequenz und Vielfache der einzelnen Motoren.

	Drehfrequenz	Nutfrequenz	Bürstenfrequenz	3. Harmonische der Nutfrequenz
Motor 1	68	544	1088	1632
Motor 2	68	544	1088	1632
Motor 3	72	576	1152	1728
Motor 4	72	576	1152	1728
Motor 5	72	576	1152	1728
Motor 6	64	512	1024	1536

Tabelle 6.5 gibt die motorspezifischen Frequenzen bei konstanter Drehzahl an. Da die Drehzahl bei den Motoren während der Messung schwankt, sind teilweise die Amplituden der Vielfachen in den Diagrammen um einige Hz verschoben.

Damit die Eigenschaften der Motoren in den Frequenzbereichen miteinander verglichen werden können, wurde die Skalierung angepasst. Zu beachten ist, dass auch die Ordinate skaliert wurde. Also sind die folgenden Diagramme in ihrer Amplitudenhöhe nicht direkt untereinander vergleichbar.

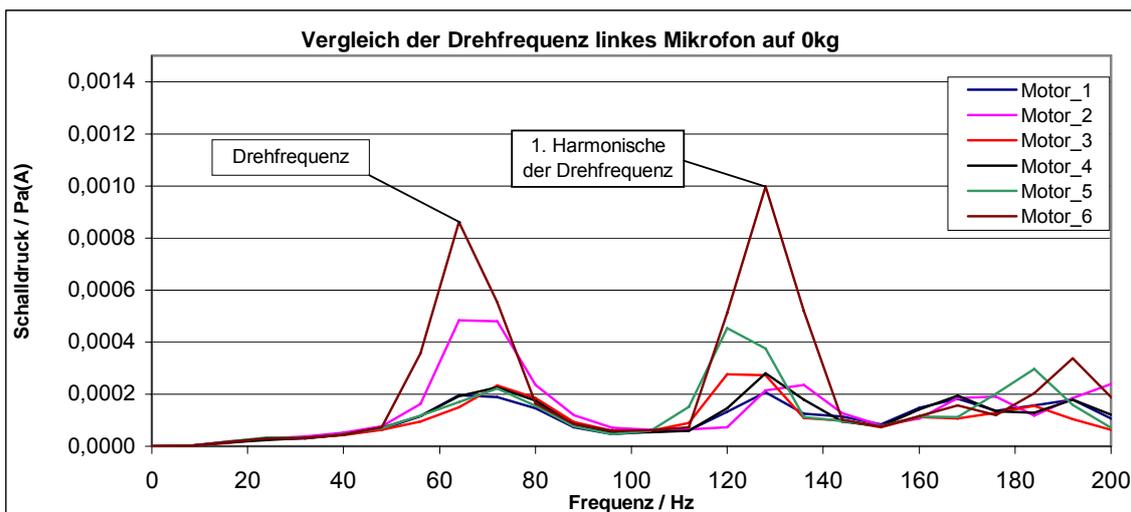


Bild 6.12: Vergleich der Drehfrequenzen im Bereich 0-200Hz; max. Skalierung bei 0,0014 Pa(A).

Es sind in Bild 6.12 bei Motor 2 und 6 erhöhte Amplituden bei der Drehfrequenz zu erkennen. Zusätzlich ist die 1. Harmonische bei Motor 6 stark ausgeprägt, außerdem ist die Amplitude von Motor 5 im Gegensatz zu den restlichen Motoren verdoppelt. Die tieffrequenten Anteile von Motor 6 sind subjektiv wahrnehmbar (siehe Abschnitt 6.1.2).

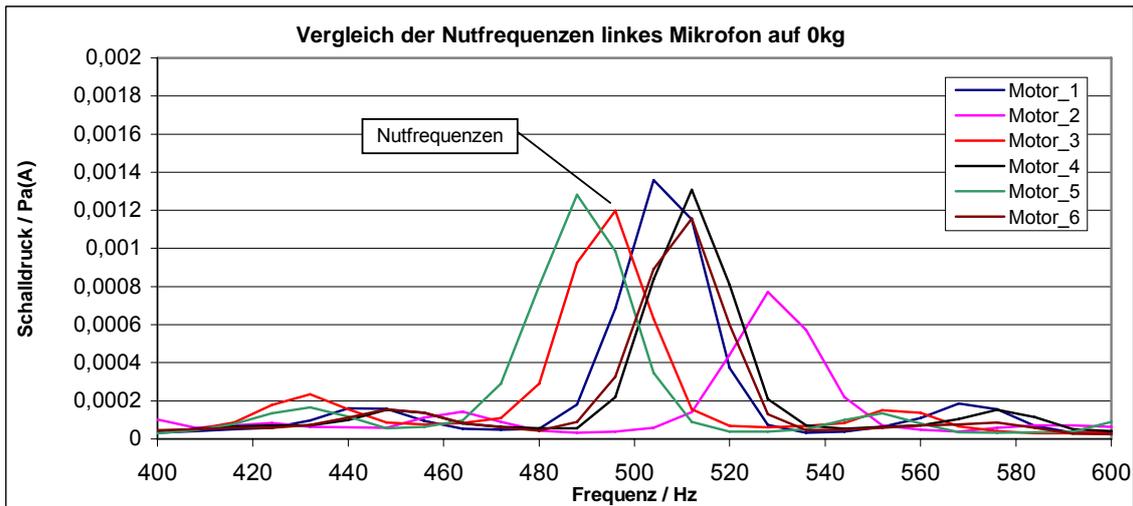


Bild 6.13: Vergleich der Nutfrequenzen im Bereich 400-600 Hz; max. Skalierung bei 0,002 Pa(A).

Die Nutfrequenzen sind, eine Ausnahme bildet Motor 2 der ca. die halbe Amplitudenhöhe besitzt, von der Amplitude her auf einem Level (Bild 6.13).

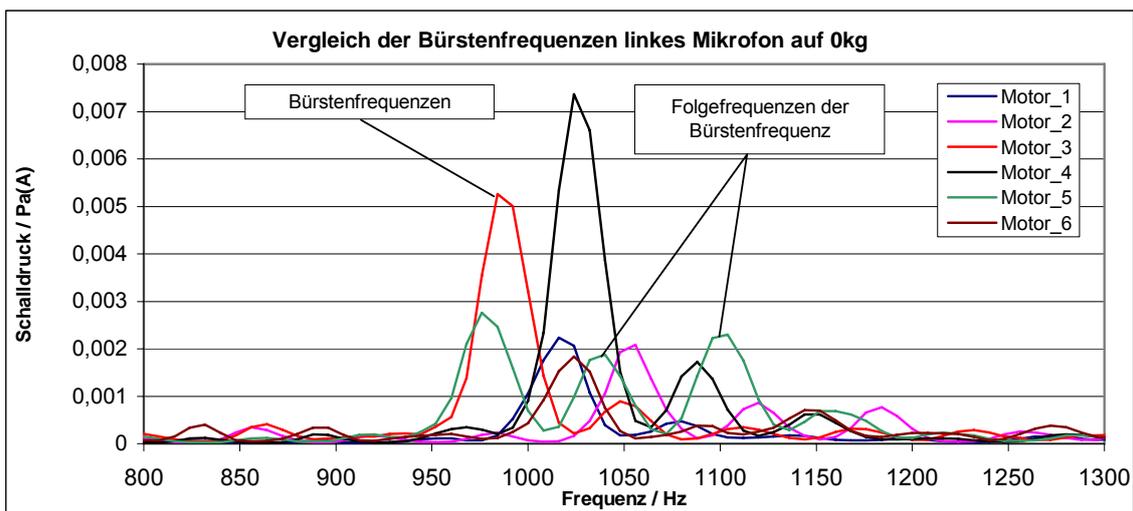


Bild 6.14: Vergleich der Bürstenfrequenzen im Bereich 800-1300; max. Skalierung bei 0,08 Pa(A).

Bild 6.16 zeigt, dass sich die Bürstenfrequenzen der Motoren 1, 2 und 6 auf einem Level befinden. Die beiden höchsten Amplituden sind Motor 4 und 3 zuzuweisen. Die Amplitude der Bürstenfrequenz von Motor 5 ist leicht höher als die der Motoren 1, 2 und 6. Zusätzlich sind aber zwei Folgefrequenzen mit relativ hoher Amplitude zu erkennen, die eventuell auf einen Bürstenschaden oder schlecht verarbeitete Nutübergänge zurückzuführen sind.

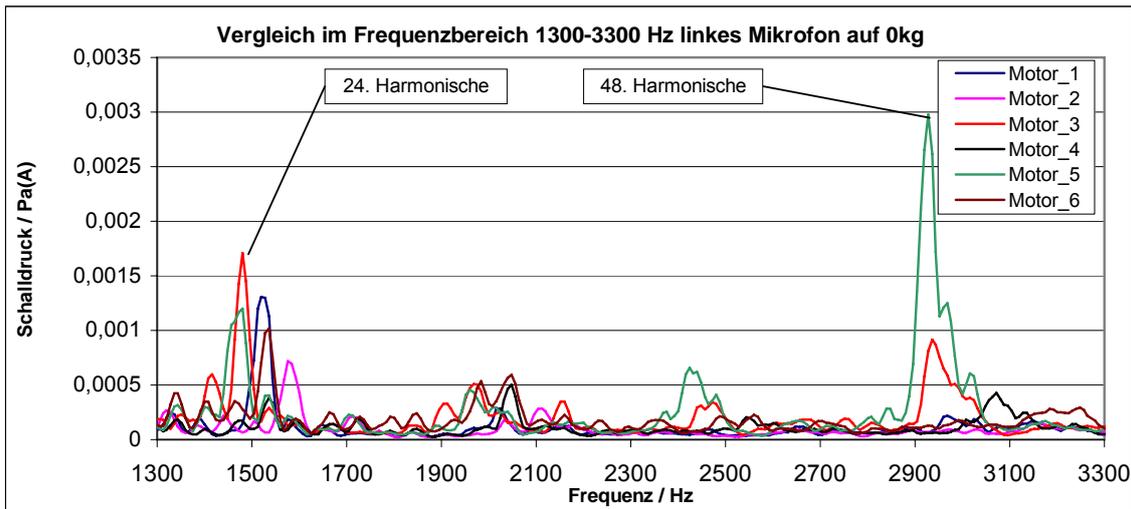


Bild 6.15: Vergleich im Bereich 1300-3300Hz; max. Skalierung bei 0,0035 Pa(A).

Die 48. Harmonische (= 3. Harmonische der Bürstenfrequenz) ist besonders bei Motor 5 ausgeprägt. Motor 3 hat ebenfalls eine höhere Amplitude als die Motoren 1, 2 und 6. Motor 4 besitzt eine leicht angehobene Amplitude. Die 24. Harmonische (= 3. Harmonische der Nutzfrequenz) zeigt, dass Motor 3 die höchste Amplitude besitzt. Motor 5 und 1 sind auf einem Level. Motor 6 ist leicht höher als die niedrigste Amplitude von Motor 2 (Bild 6.15).

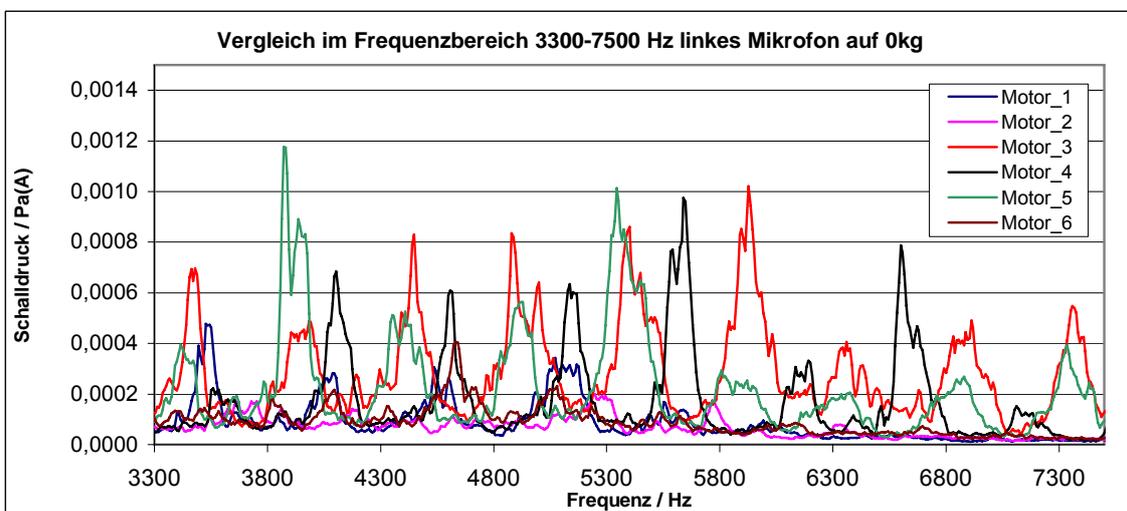


Bild 6.16: Vergleich im Bereich 3300-7500Hz; max. Skalierung bei 0,0014 Pa(A).

Wie in Bild 6.16 zu sehen, haben Motor 3, 4 und 5 in diesem Frequenzbereich die höchsten Amplituden. Motor 1, 2 und 6 haben geringe Ausschläge.

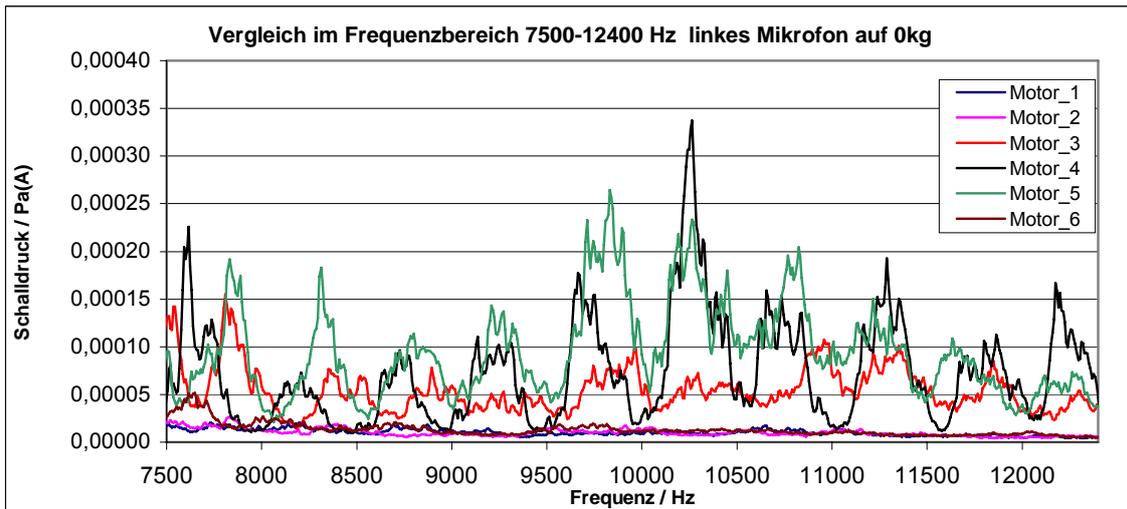


Bild 6.17: Vergleich im Bereich 7500-12400Hz; max. Skalierung bei 0,0004 Pa(A).

Im höchsten, ausgewerteten, Frequenzbereich, den Bild 6.17 darstellt, ist zu erkennen, dass die Motoren 4 und 5 die höchsten Amplituden besitzen. Motor 3 befindet sich im Mittelfeld. Die Motoren 1, 2 und 6 haben keine nennenswerten Ausschläge, d.h. keine Frequenzanteile in diesem Frequenzbereich.

6.2 Messungen am Prüfstand / Ordnungsanalyse

Die Messungen wurden am Prüfstand durchgeführt. Eine genaue Beschreibung des Prüfstandes ist in Kapitel 5 nachzulesen. Der Vorteil gegenüber den Fahrzeugmessungen ist, dass an dem Prüfstand ausschließlich die Einflüsse des Motors gemessen werden (ausgenommen die Eigenfrequenzen des Prüfstands) und nicht wie im Fahrzeug noch zusätzlich die Einflüsse des Getriebes, der Sitz- und der Fahrzeugstruktur.

6.2.1 Vorgehensweise

Die Motoren wurden in zwei Durchgängen gemessen. Je Durchgang wurde pro Motor eine Drehrichtung (CW/CCW) gemessen. Das heißt, dass jeder Motor zweimal an- und wieder abgeschraubt worden ist. Diese zwei Durchgänge sind nicht unbedingt notwendig, doch sie wurden präventiv durchgeführt, damit die Möglichkeit, dass die Motoren sich überhitzen könnten, von vornherein ausgeschlossen werden konnte.

Der Prüfling wurde auf Leerlaufdrehzahl hochgefahren und mit Hilfe der Wirbelstrombremse auf ca. 800 1/min heruntergebremst.

6.2.2 Mögliche Fehlerbilder

Bestimmte Ordnungen und deren Harmonische treten bei Motoren immer auf. Bei den hier verwendeten Motoren zum Beispiel die achte Ordnung, die der Nutzfrequenz äquivalent ist. Aus Ordnungen mit besonderen Ausschlägen können Fehler am Motor herausgelesen werden. Tabelle 6.6 zeigt eine Übersicht darüber, welche Ordnung welchem Ereignis zugeordnet werden kann. Tabelle 6.6 beschränkt sich auf die hier möglicherweise auftretenden Fehler und Ordnungen.

Tabelle 6.6: Zuweisung der Ordnungen.

Ursache	Richtung	Ordnung	Bemerkung
Drehfrequenz		1.	Bei jeder drehenden Maschine vorhanden
Unwucht an rotierenden Teilen	Radial	1.	
Fluchtfehler & verbogene Welle	Radial & Axial	Normal: 1. Oft auch: 2. Seltener: 3.	Häufig auftretende Fehlerquelle
Angerissene Welle	Radial	1., 2.	
Mechanisches Spiel		2.	Auch Harmonische
Nutfrequenz		8.	Auch Harmonische (16., 24.)
Bürsten		16.	

(Teilweise aus [II], [VII], [VIII])

Eine nähere Beschreibung der Fehler ist im Folgenden aufgelistet.

1. Unwucht

Eine Unwucht entsteht durch ungleichmäßige Gewichtsverteilung an der Welle und erhöht die Schwingung exakt mit der Drehzahl (1. Ordnung). [VII]

2. Fluchtfehler der Welle oder der Lager

Ein Fluchtfehler tritt auf, wenn die Lager zueinander versetzt sind. Er tritt einmal pro Umdrehung auf (1. Ordnung). [II]

3. Verbogene Welle

Die verbogene Welle erzeugt drehfrequente Schwingungen mit Auftreten niedriger Harmonischen (1. Ordnung und niedrige Harmonische).

4. Angerissene Welle

Auf eine angerissene Welle weist ein Anstieg der Drehfrequenz und der ersten Harmonischen hin. (1. und 2. Ordnung) [VII]

5. Mechanisches Spiel

Werden die Lagertoleranzen nicht eingehalten, tritt mechanisches Spiel auf. (1. und 2. Ordnung). [II]

6. Nutung

Die Nutfrequenz berechnet sich aus der Anzahl der Nuten mal der Drehfrequenz. Somit wird die Nutfrequenz immer in der Ordnung zu finden sein, die der Anzahl von Nuten äquivalent ist, hier die 8. Ordnung. Es können durch unsaubere Verarbeitung der Nutschlitzes Sirengeräusche auftreten.

7. Bürstenfrequenz

Die Bürstenfrequenz ergibt sich aus der Nutfrequenz mal zwei. Somit ist sie in unserem Fall in der 16. Ordnung vorhanden.

Die oben aufgelisteten Fehler- und Geräuschquellen regen bei der Runterfahrt und dem damit einhergehenden Durchlauf aller im Drehzahlbereich befindlichen Frequenzen durch ihre Schwingungen die Strukturresonanzen an und werden durch Erhöhung der Amplitude im Resonanzbereich sichtbar. Ist keine Resonanzstelle in der jeweiligen Ordnung vorhanden, wirken sich die Fehler teilweise als konstante Erhöhung des gesamten Verlaufs der Ordnung aus.

6.2.3 Auswertung

Es wurden die Ordnungsspektren aufgezeichnet und zusätzlich „Slices“ der markanten Ordnungen (1, 2, 8, 16, 32) erstellt. Zur Überprüfung, ob in den nicht berücksichtigten Ordnungen Auffälligkeiten vorhanden sind, wurden die 7. und die 9. Ordnung ausgewertet. Um ein Ergebnis vorweg zu nehmen, die Ordnungen sieben und neun weisen keine Auffälligkeiten auf und werden deshalb im Folgenden nicht mehr beachtet. Wie oben schon erwähnt, bezieht sich die Auswertung ausschließlich auf die CW-Drehrichtung.

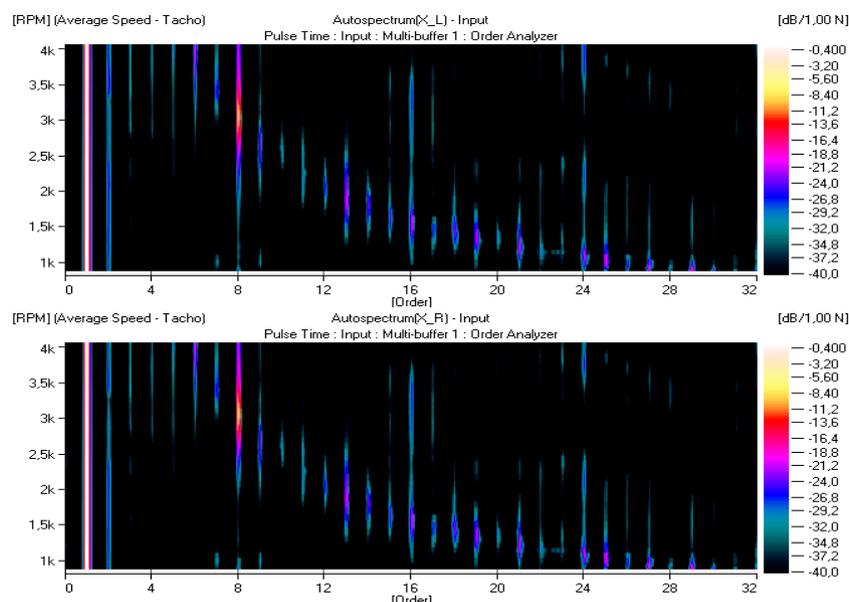


Bild 6.18: Vergleich rechter und linker Sensor(oben links, unten rechts).

Die folgenden Spektren und Slices sind eine Auswahl, es wurde die Beschränkung auf die X-Richtung gelegt. Zusätzlich wird ausschließlich der linke Sensor ausgewertet. Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Sensoren sind kaum zu erkennen (siehe Bild 6.18). Alle anderen Spektren und Slices sind im Anhang zu finden.

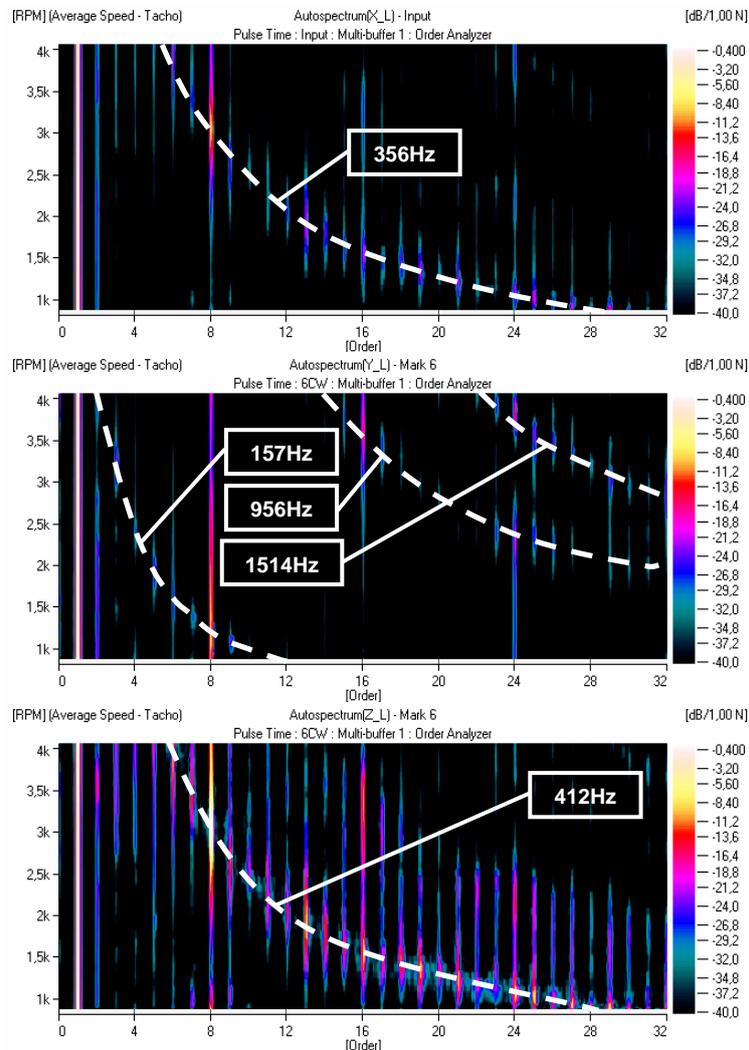


Bild 6.19: Vergleich X, Y, Z am Beispiel Motor 6 linker Sensor CW mit Definition der nicht drehzahlveränderlichen Frequenzen.

Die in Bild 6.19 erkennbaren Eigenfrequenzen weichen im geringen Maße von den ermittelten Werten der experimentellen Eigenfrequenzermittlung aus Kapitel 5.2.3 ab. In Tabelle 6.7 ist eine Übersicht darüber zu finden.

Tabelle 6.7: Vergleich der drehzahlunabhängigen Frequenzen aus den Ordnungsspektren mit den ermittelten Eigenfrequenzwerten.

Eigenfrequenz	Experimentelle Ermittlung	Ordnungsspektrum	Differenz
1	120 Hz	157 Hz	37 Hz
2	356 Hz	356 Hz	0 Hz
3	471 Hz	412 Hz	59 Hz
4	996 Hz	956 Hz	40 Hz
5	1675 Hz	1514 Hz	161 Hz

Die Differenzen in den festen Frequenzen sind damit zu begründen, dass die Eigenfrequenzermittlung mit einem größeren und somit schwereren Motor durchgeführt worden ist. Durch die unterschiedlichen Massen ergeben sich die Abweichungen.

Die X-Richtung wurde zur Auswertung ausgewählt, da, wie in Bild 6.19 zu sehen ist, sich die 356Hz Linie über fast alle relevanten Ordnungen (8, 16, 24) erstreckt und somit an den Stellen, an denen die Ordnungen die Frequenzlinien schneiden, Resonanzen entstehen. Zusätzlich sind für jeden Motor einzeln die Slices in allen Raumrichtungen sowie der linke und der rechte Sensor ausgewertet und die markanten Stellen dokumentiert worden. Die Ergebnisse der Auswertung sind ab Kapitel 6.2.3.1 zu lesen.

6.2.3.1 Spektren

Die Auswertung ist bis zur 32. Ordnung durchgeführt worden. In diesem Bereich befinden sich für die geprüfte Art von Motoren alle relevanten Ordnungen. Auf der folgenden Seite sind die Spektren der 6 Prüfmotoren zu sehen.

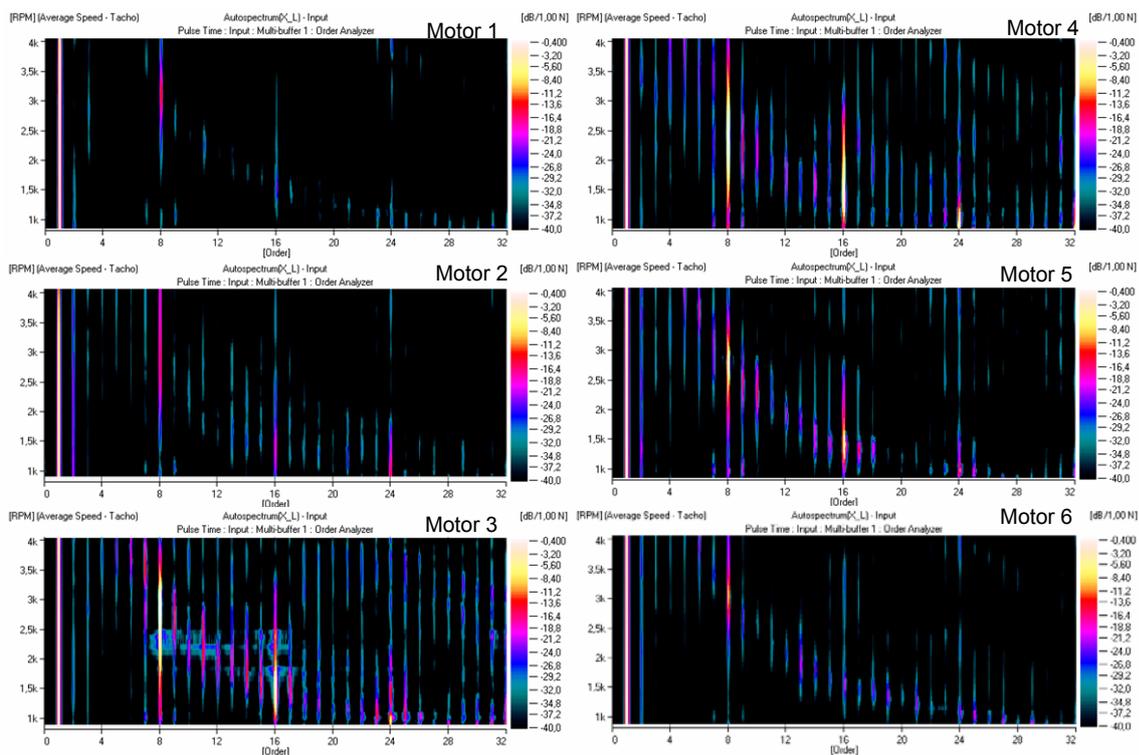


Bild 6.20: Ordnungsspektren Motor 1-6 (X-Richtung, CW, linker Sensor).

Wie zu erkennen ist, sind die Intensität der Resonanzen sowie die Amplitude der Ordnungen, an denen die Frequenzlinien die Ordnungen schneiden, von Motor zu Motor unterschiedlich. Um diese Eigenschaft auszunutzen, sind für die Ordnungen 1,

2, 7, 8, 9, 16, 24 Slices erstellt worden. Die Ordnungen 7, 9 sind, wie oben schon erwähnt, nicht relevant.

6.2.3.2 Slice

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Motoren bewertet. Für jede relevante Ordnung folgen eine Zuweisung der markanten Stellen und eine Analyse der möglichen Fehler. Standardmäßig wird der linke Sensor ausgewertet, da keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem linken und rechten Sensor zu erkennen sind.

6.2.3.2.1 1. Ordnung

Die 1. Ordnung bezieht sich im Wesentlichen auf die Drehfrequenz. Zusätzlich kann eine konstante Erhöhung der 1. Ordnung ein Indiz für eine Unwucht, einen Fluchtfehler oder eine verbogene Welle sein.

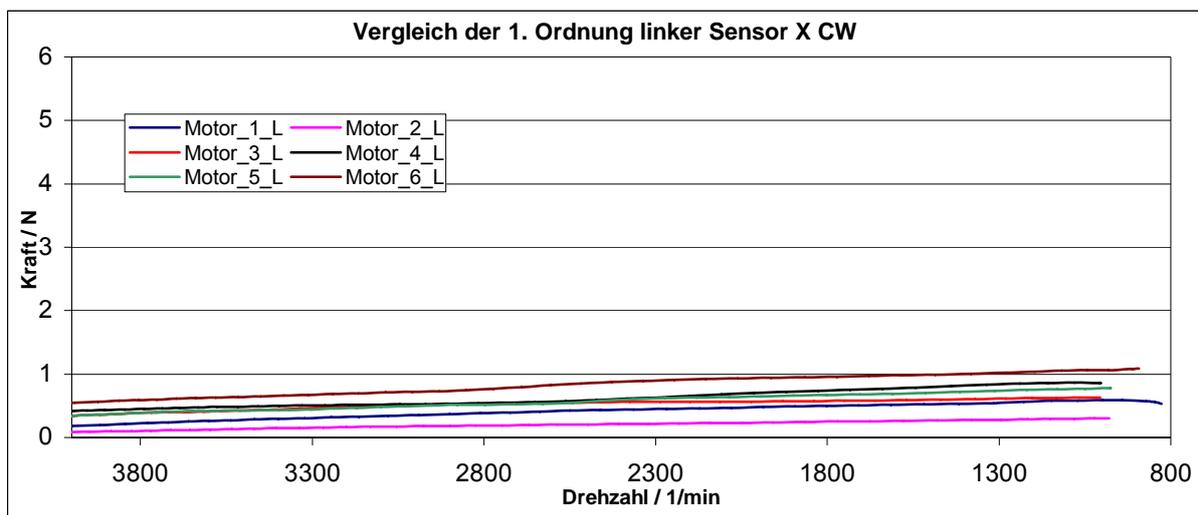


Bild 6.21: 1. Ordnung in X-Richtung.

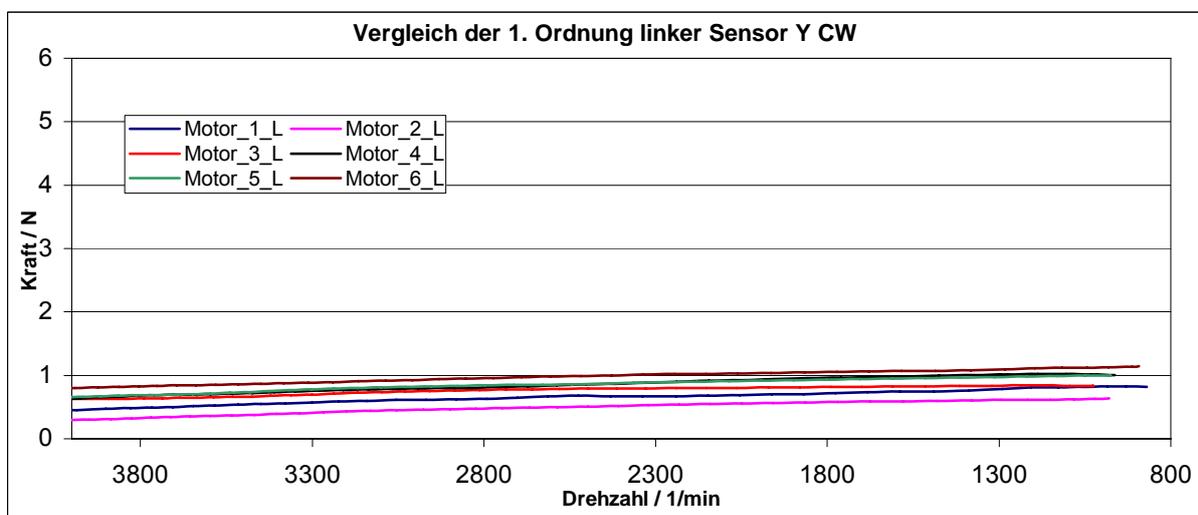


Bild 6.22: 1. Ordnung in Y-Richtung.

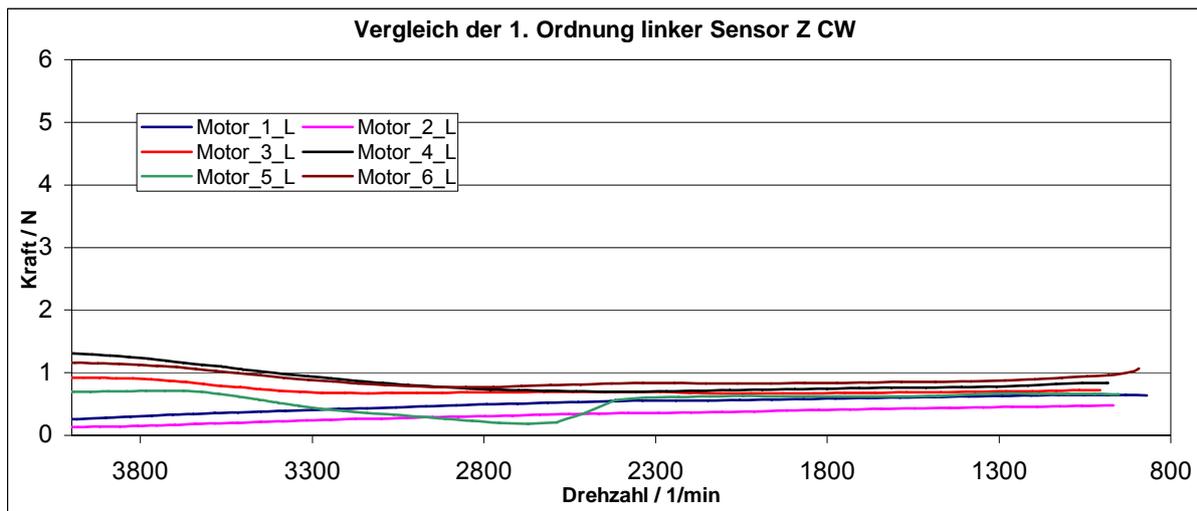


Bild 6.23: 1. Ordnung in Z-Richtung.

Auffällig an der 1. Ordnung ist, dass die nach subjektiver und objektiver Bewertung im Fahrzeug als i.O. beurteilten Motoren 1 und 2 (siehe Tabelle 6.1 und Tabelle 6.3) generell im unteren Bereich zu finden sind. Zusätzlich ist auffällig, dass Motor 2, der subjektiv wie objektiv der bessere Motor ist, immer die niedrigste Amplitude besitzt. Da Motor 6 objektiv und, teilweise, subjektiv ebenfalls als i.O. eingestuft wurde, scheint es auf den ersten Blick seltsam, dass Motor 6 generell die höchste Amplitude besitzt. Der Motor ist in der subjektiven Bewertung aber allgemein als sehr brummig bewertet worden. Eine Unwucht des Rotors, ein Fluchtfehler der Lager oder eine verbogene Welle wird für die Erhöhung der Amplitude verantwortlich sein, da die Frequenz, mit der die genannten Fehler generell auftreten, gleich der Drehfrequenz ist. Motor 3,4 und 5 befinden sich von der Amplitude her fast über den gesamten Verlauf auf einem Niveau.

6.2.3.2.2 2. Ordnung

Mechanisches Spiel oder eine verbogene Welle werden in der 2. Ordnung sichtbar.

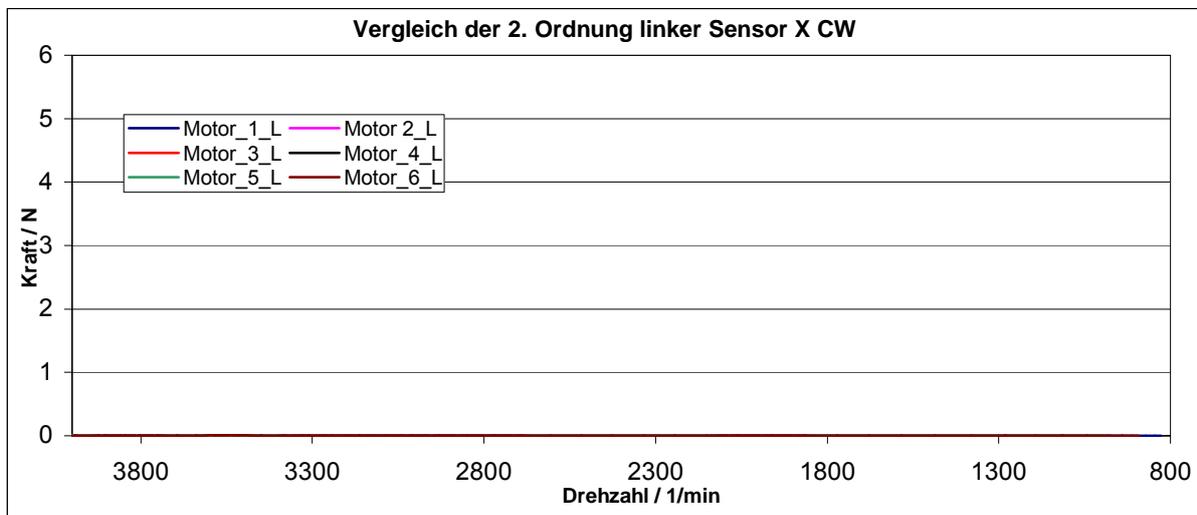


Bild 6.24: 2. Ordnung in X-Richtung.

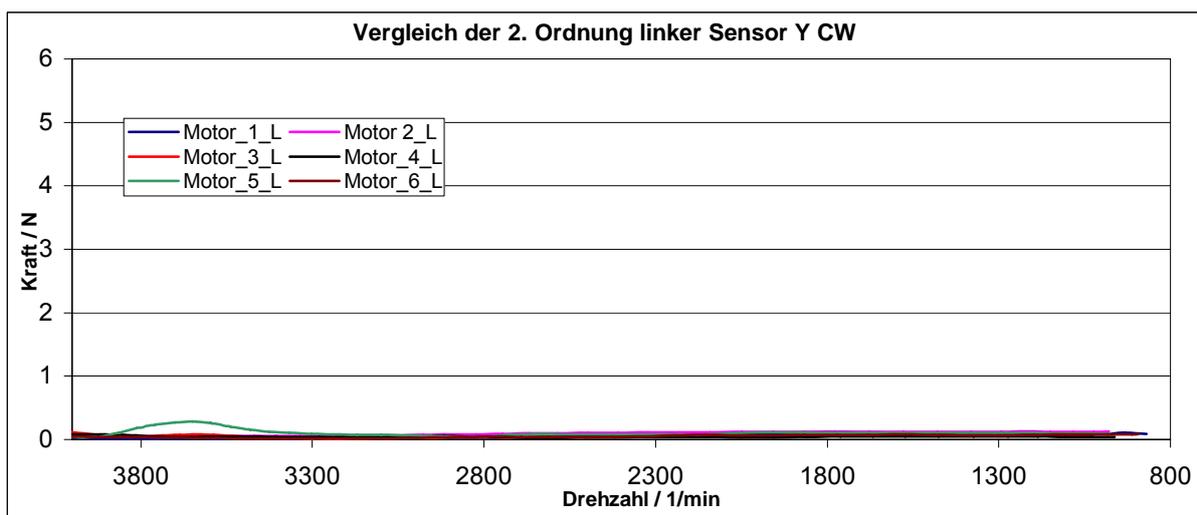


Bild 6.25: 2. Ordnung in Y-Richtung.

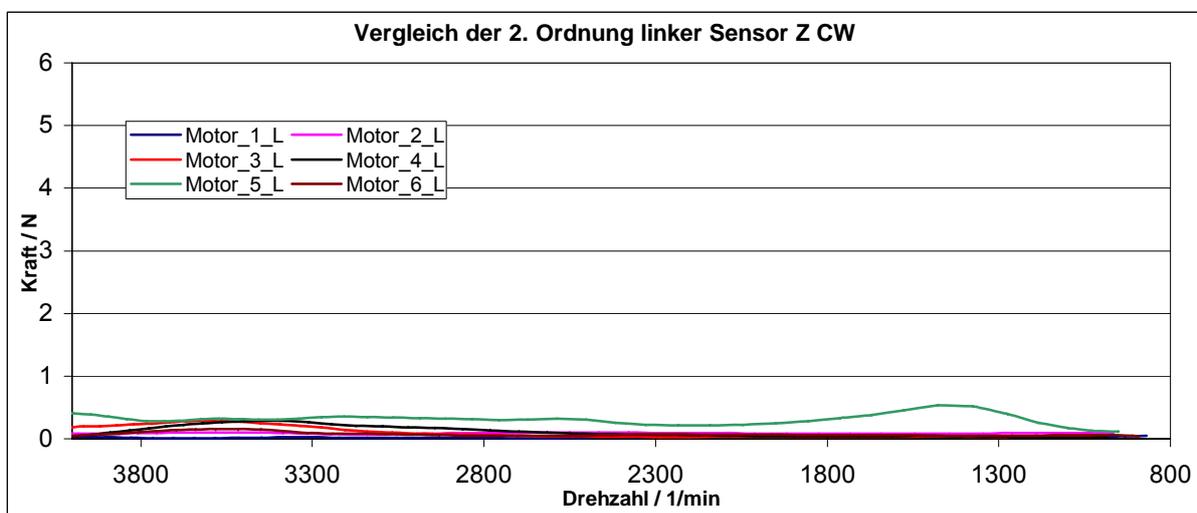


Bild 6.26: 2. Ordnung in Z-Richtung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass Motor 5 die 2. Ordnung dominiert. Dies lässt vermuten, da Motor 5 in der subjektiven und objektiven Bewertung der Fahrzeugmessungen als n.i.O. bewertet wurde und zusätzlich ein unangenehmes hochfrequentes Geräusch aufweist, dass die 2. Ordnung hierfür ein Indiz sein könnte. Vermutlich ist mechanisches Spiel die Ursache. In X-Richtung ist kein Ausschlag vorhanden.

6.2.3.2.3 8. Ordnung

Die 8. Ordnung ist der Nutfrequenz zuzuweisen.

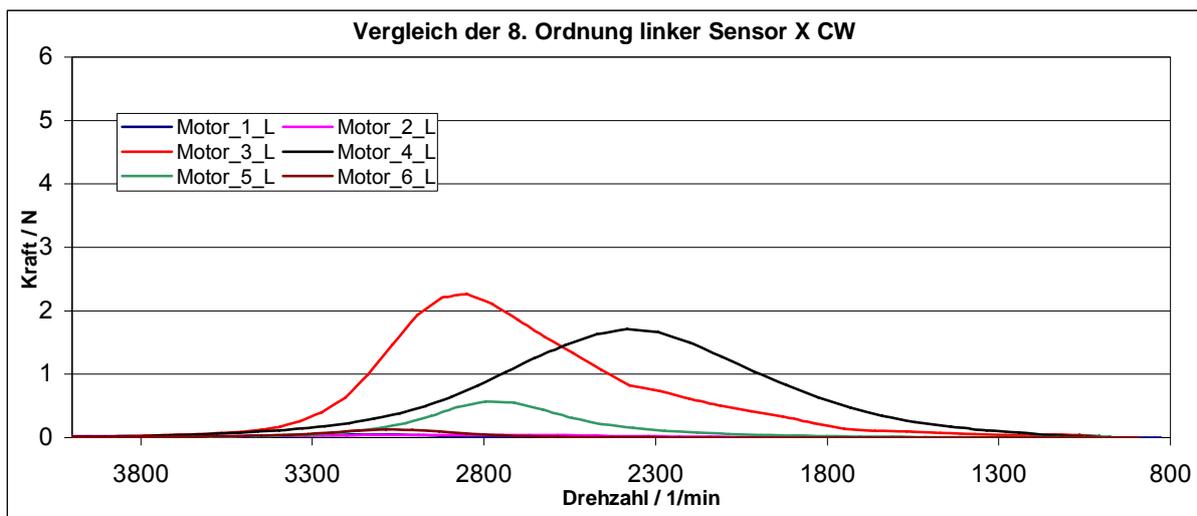


Bild 6.27: 8. Ordnung in X-Richtung.

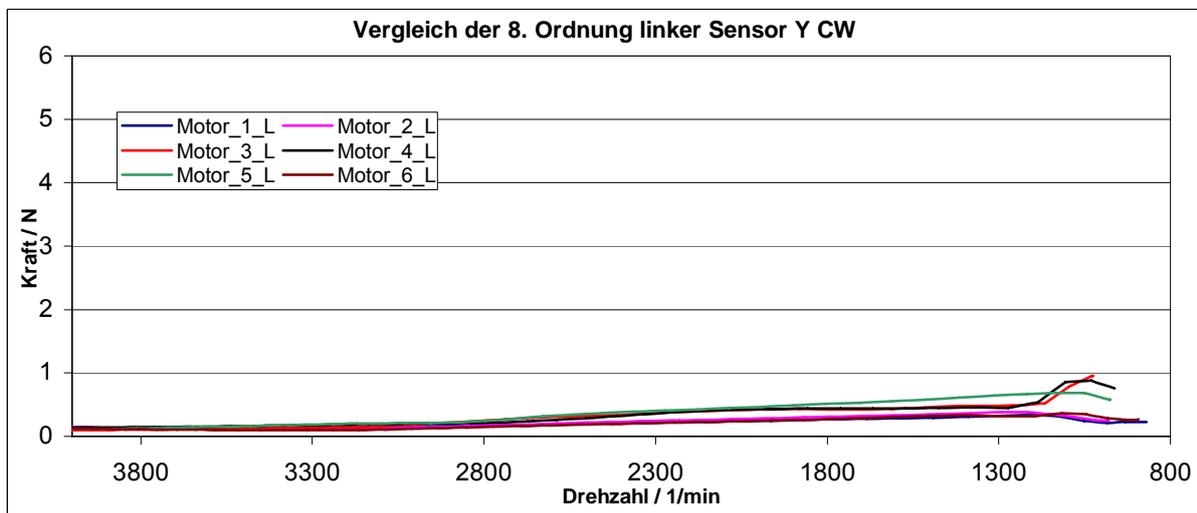


Bild 6.28: 8. Ordnung in Y-Richtung.

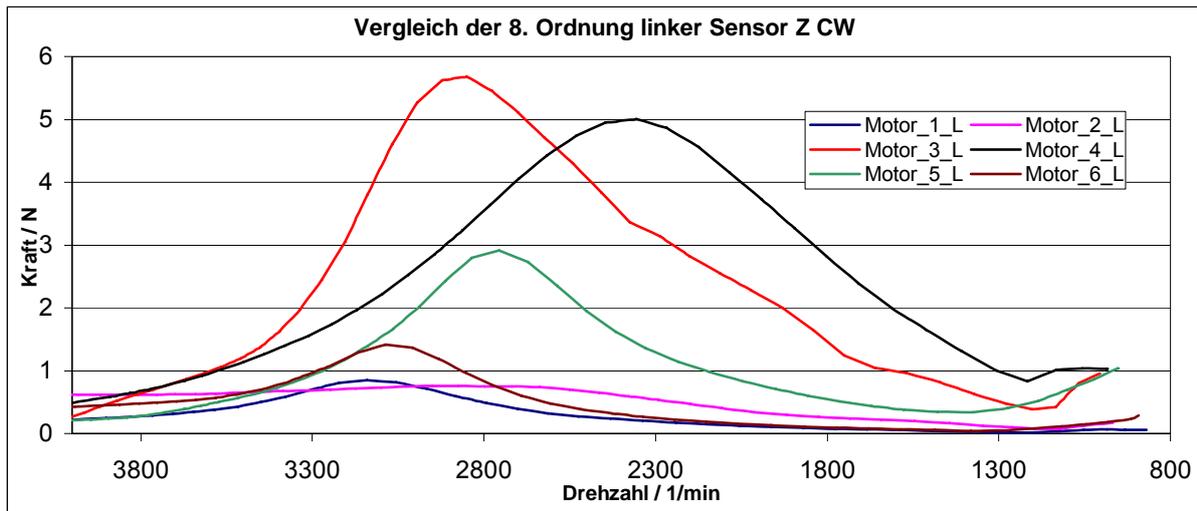


Bild 6.29: 8. Ordnung in Z-Richtung.

Auffällig an der 8. Ordnung ist, dass alle Motoren (3, 4, 5) die in der subjektiven Bewertung als sehr hochfrequent beurteilt wurden, sehr hohe Amplituden besitzen.

6.2.3.2.4 16. Ordnung

Die 16. Ordnung ist äquivalent mit der Bürstenfrequenz (Nutfrequenz * 2)

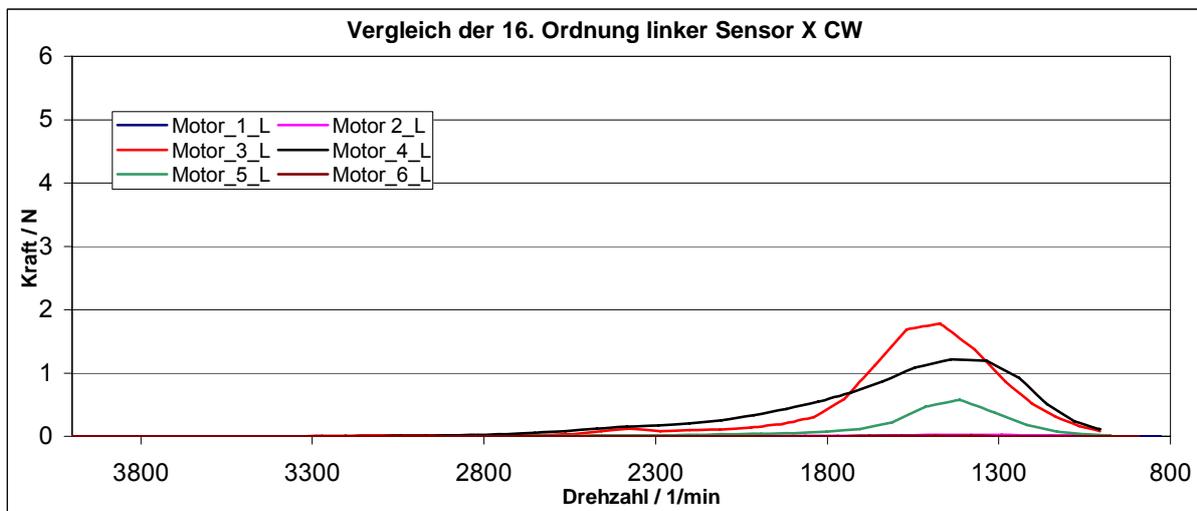


Bild 6.30: 16. Ordnung in X-Richtung.

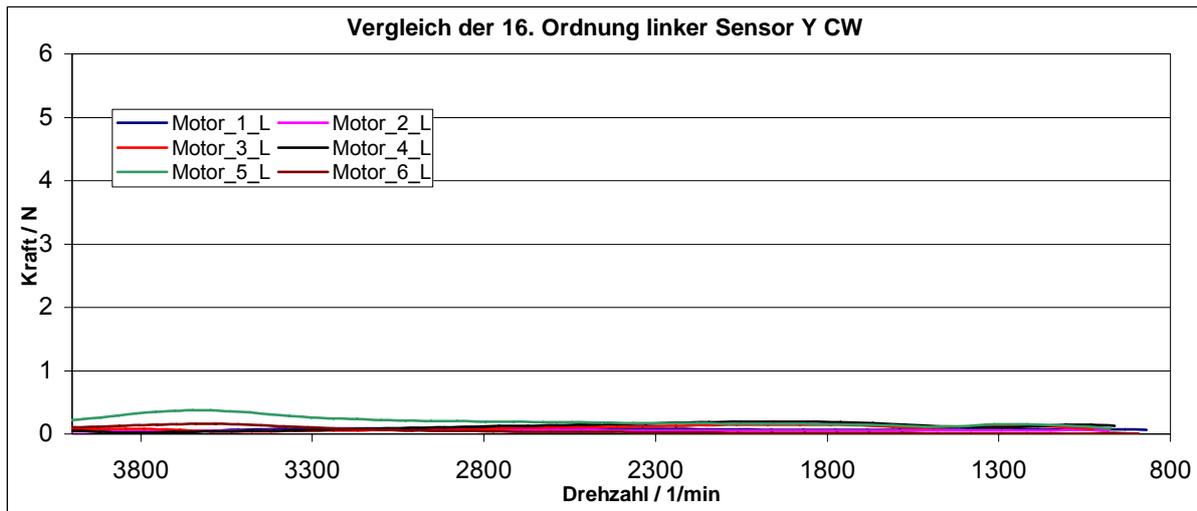


Bild 6.31: 16. Ordnung in Y-Richtung.

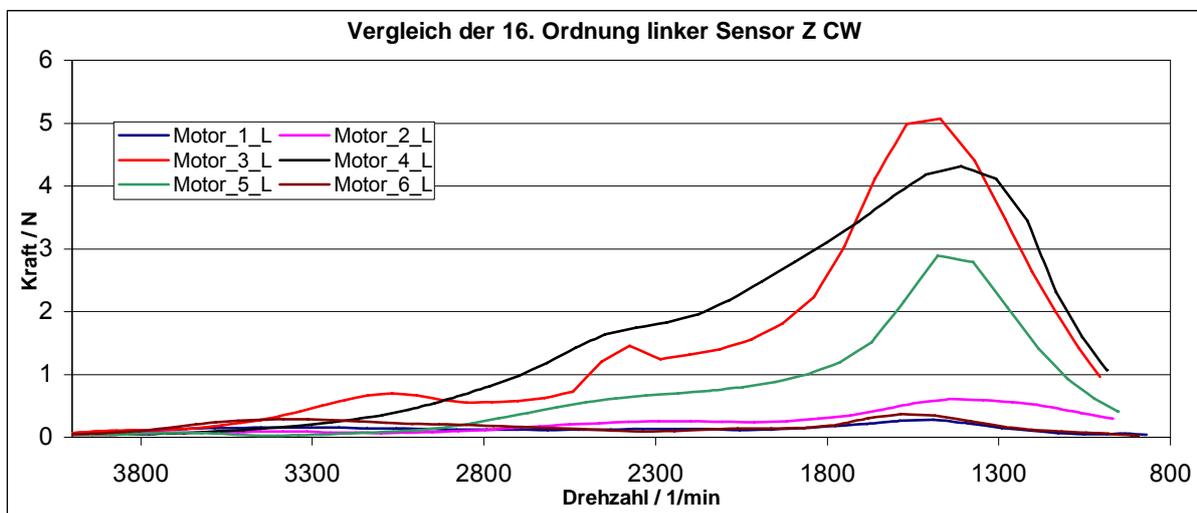


Bild 6.32: 16. Ordnung in Z-Richtung.

In der 16. Ordnung fällt besonders in Y-Richtung auf, dass Motor 5 einen Peak zwischen 4000 und 3300 1/min hat. Zusätzlich fällt ins Auge, dass in X- und Z-Richtung die Motoren 3, 4, 5, wie auch schon in der 8. Ordnung, hohe Peaks besitzen. Dies könnte ein Indiz für einen Bürstenfehler sein. Die Motoren 1, 2 und 6 weisen dagegen vernachlässigbar kleine bis gar keine Peaks auf.

6.2.3.2.5 24. Ordnung

Die 24. Ordnung korreliert mit der 8. Ordnung und ist die zweite Harmonische der 8. Ordnung. Die Diagramme sind im Anhang zu finden.

6.2.3.2.6 Ergebnisse

Die Erkenntnisse, die aus der Ordnungsanalyse gewonnen wurden, sind in Tabelle 6.8 aufgelistet.

Tabelle 6.8: Auswertung der Ordnungsanalyse.

Motor 1	Eventuell leichte Unwucht, Fluchtfehler oder eine verbogene Welle da die 1. Ordnung leicht erhöht ist, aber im i.O.-Bereich.
Motor 2	Keine Fehler.
Motor 3	Unsaubere Verarbeitung der Bürsten oder der Nutschlitze, da die 8. und 16. Ordnung erhöhte Peaks aufweist. (generell die höchsten Amplituden in der 8. und 16. Ordnung).
Motor 4	Wie 3., jedoch mit geringerer Amplitudenhöhe.
Motor 5	Wie 4., jedoch mit geringerer Amplitudenhöhe und zusätzlich noch mechanisches Spiel oder eine stark verbogene Welle da, in der 2. Ordnung in Y-Richtung eine erhöhte Amplitude vorhanden ist.
Motor 6	Definitiv eine Unwucht, Fluchtfehler oder eine verbogene Welle, da die 1. Ordnung in allen Richtungen die höchste Amplitude hat.

Am Ende der Arbeit sind die, von der Fa. Bosch die an den Motoren durchgeführten Manipulationen mitgeteilt worden. Diese sind in Tabelle 6.9 zu finden.

Tabelle 6.9: Manipulationen der Motoren.

Motor 1	Gutmuster
Motor 2	Gutmuster
Motor 3	Modifizierte Bürsten
Motor 4	Modifizierte Bürsten
Motor 5	Modifizierte Bürsten
Motor 6	Unwucht

Wie der Vergleich von Tabelle 6.8 und Tabelle 6.9 erkennen lässt, sind die von Bosch eingebauten Fehler alle selektiert worden. Das heißt, dass mit dem vorhandenen Auswertverfahren Fehler an Motoren genau selektiert werden können.

6.3 Korrelation zwischen Prüfstands- und Fahrzeugmessungen

In diesem Abschnitt sind die Analogien zwischen der Ordnungsanalyse und den subjektiven und objektiven Ergebnissen aus den Fahrzeugmessungen enthalten.

6.3.1 Motor 1 und 2

Motor 1 und 2 sind subjektiv und objektiv in den Fahrzeugmessungen als i.O. bewertet worden. Die FFT aus den Fahrzeugmessungen zeigt bei Motor 1 leichte hochfrequente Anteile (Bild 6.33). Motor 2 hat fast keine hochfrequenten Anteile. Motor 1 und 2 sind in allen ausgewerteten Ordnungen die Motoren mit der niedrigsten Amplitude. Dabei sind die Amplituden von Motor 2 generell kleiner als die Amplituden von Motor 1 (siehe Diagramme in den Abschnitten 6.2.3.2.1 bis 6.2.3.2.5). Diese Erkenntnis kann als Parameter für eine i.O./n.i.O.-Bewertung verwendet werden.

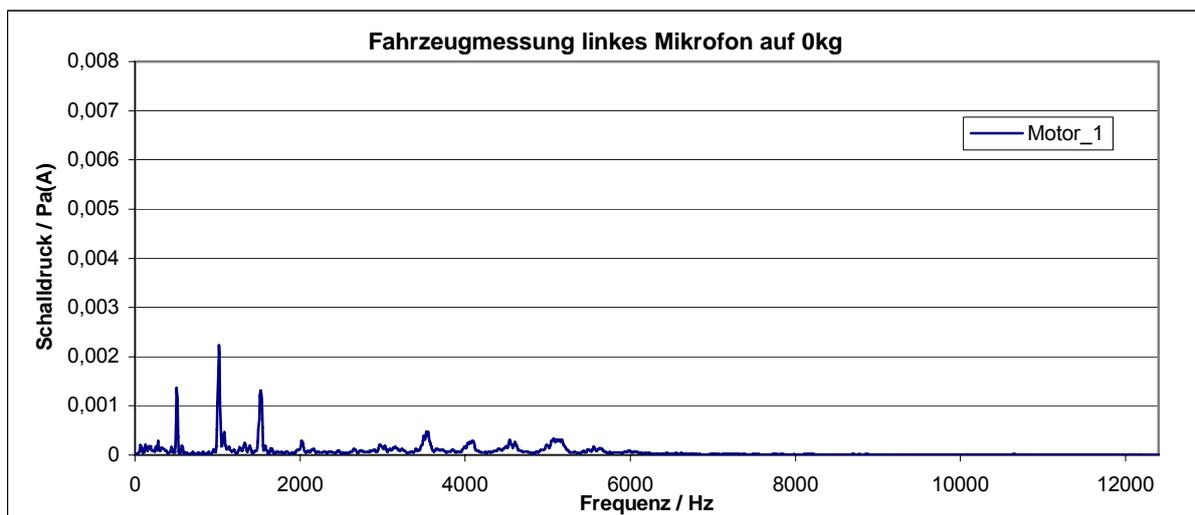


Bild 6.33: FFT aus den Fahrzeugmessungen Motor 1.

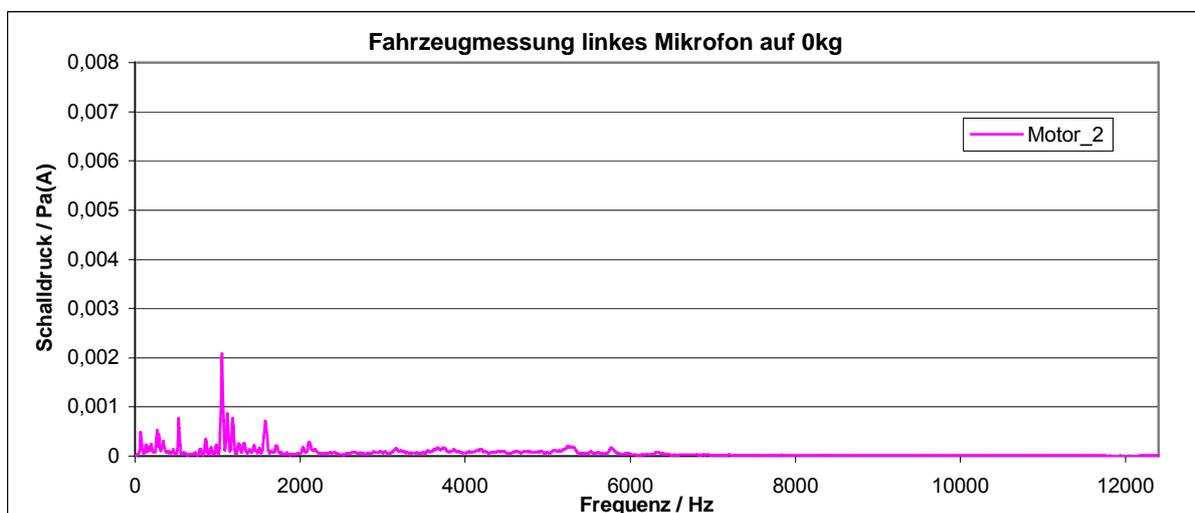


Bild 6.34: FFT aus den Fahrzeugmessungen Motor 2.

6.3.2 Motor 3

Motor 3 hat subjektiv ein hochfrequenten Geräusch und ist in der Fahrzeugmessung subjektiv wie objektiv n.i.O. (vergleiche Tabelle 6.1 und Tabelle 6.3). In der FFT der Fahrzeugmessung sind die 16. Harmonische der Drehfrequenz (Bürstenfrequenz) sowie die erste Harmonische stark ausgeprägt (Bild 6.35). Motor 3 hat in den Ordnungen acht und sechzehn (ebenfalls den Bürsten und der Nutung zuzuweisen) die höchste Amplitude aller Motoren (Bild 6.36). Zusätzlich hat Motor 3 in der FFT aus den Fahrzeugmessungen markante hochfrequente Anteile bis 8000 Hz. (Bild 6.35)

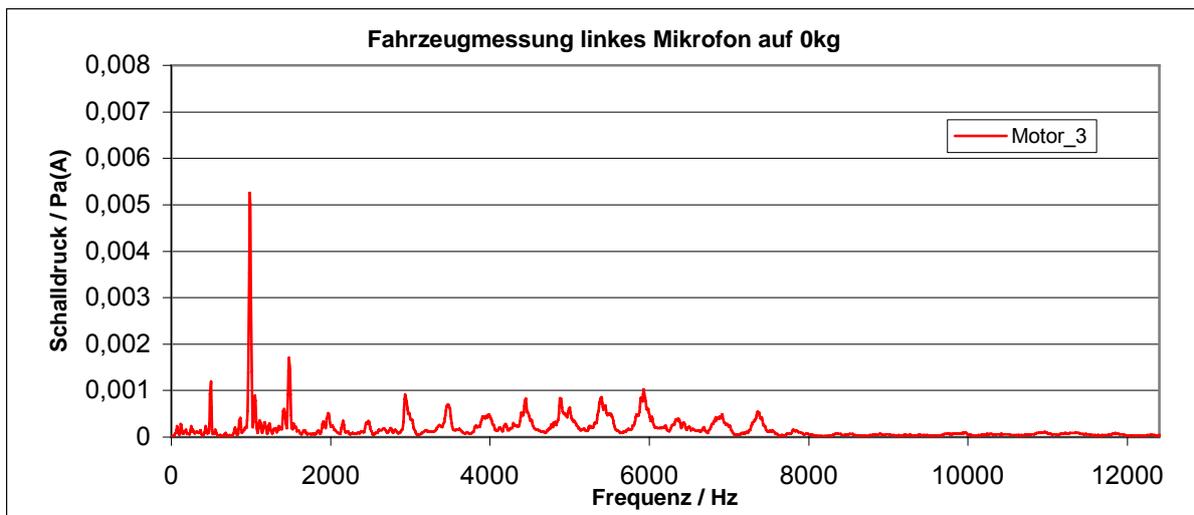


Bild 6.35: FFT aus den Fahrzeugmessungen Motor 3.

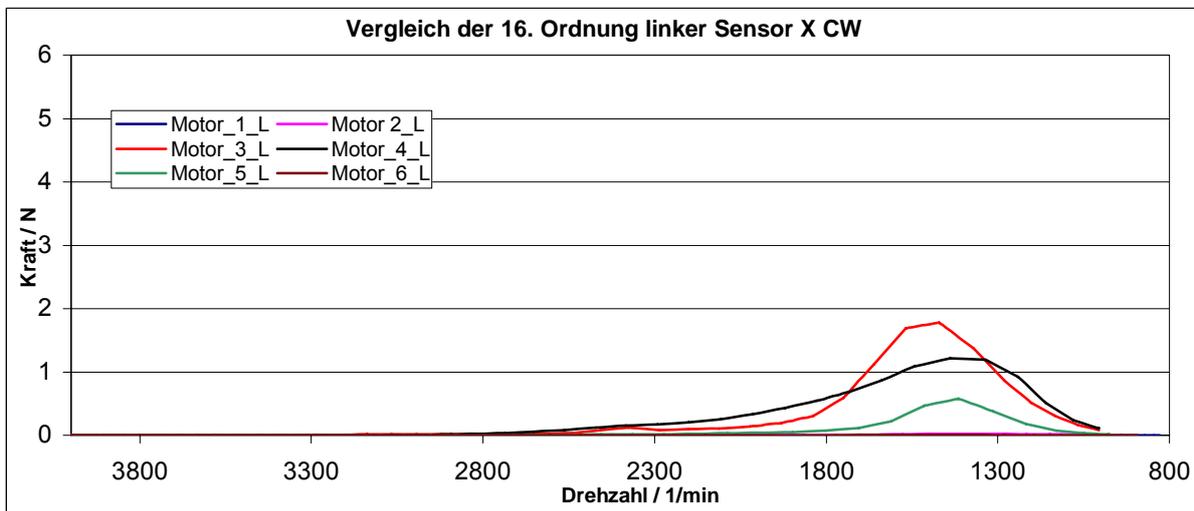


Bild 6.36: 16. Ordnung in Y-Richtung.

6.3.3 Motor 4

Motor 4 hat im Vergleich zu Motor 3 in der FFT eine höhere Amplitude bei der 16. Harmonischen. Nach logischer Überlegung sollte die Amplitude von Motor 4 auch in der 8. und 16. Ordnung die höchste Amplitude haben. Dies ist aber nicht der Fall

(Bild 6.36). Ein Grund dafür könnte sein, dass in der FFT die zweite Harmonische der Nutzfrequenz bei Motor 3 stärker ausgeprägt ist, als bei Motor 4 (Bild 6.37) und daher die Amplitudenerhöhung von Motor 3 in der 8. und 16. Ordnung kommt.

Motor 4 wurde ebenfalls objektiv wie subjektiv als n.i.O. bewertet und hat auch ein sehr hochfrequentes Geräusch. Was sich auch in der FFT in den hochfrequenten Anteilen bis 12400 Hz widerspiegelt.

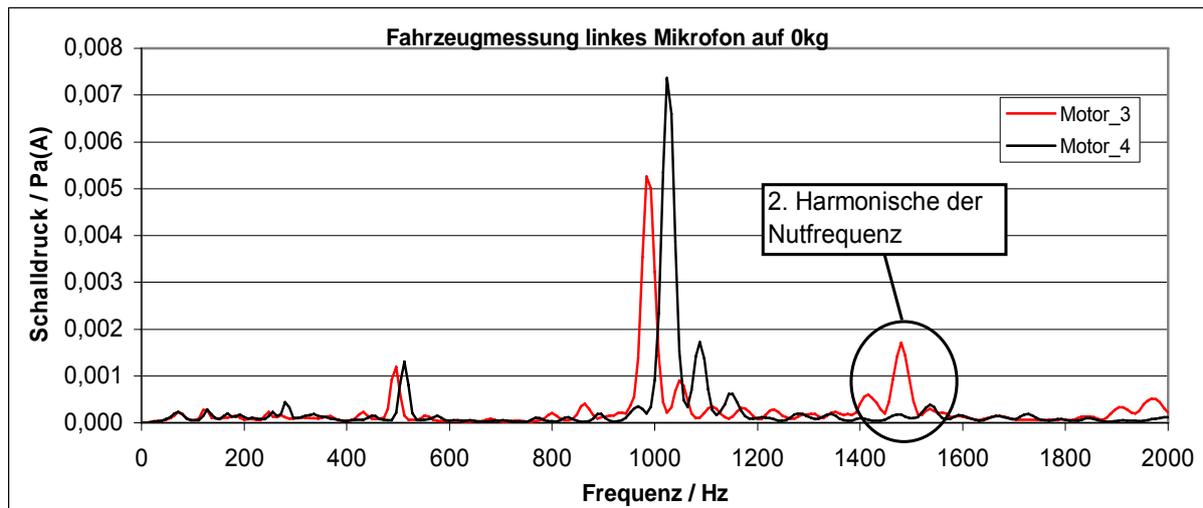


Bild 6.37: Vergleich der 2. Harmonischen der Nutzfrequenz Motor 3 und 4.

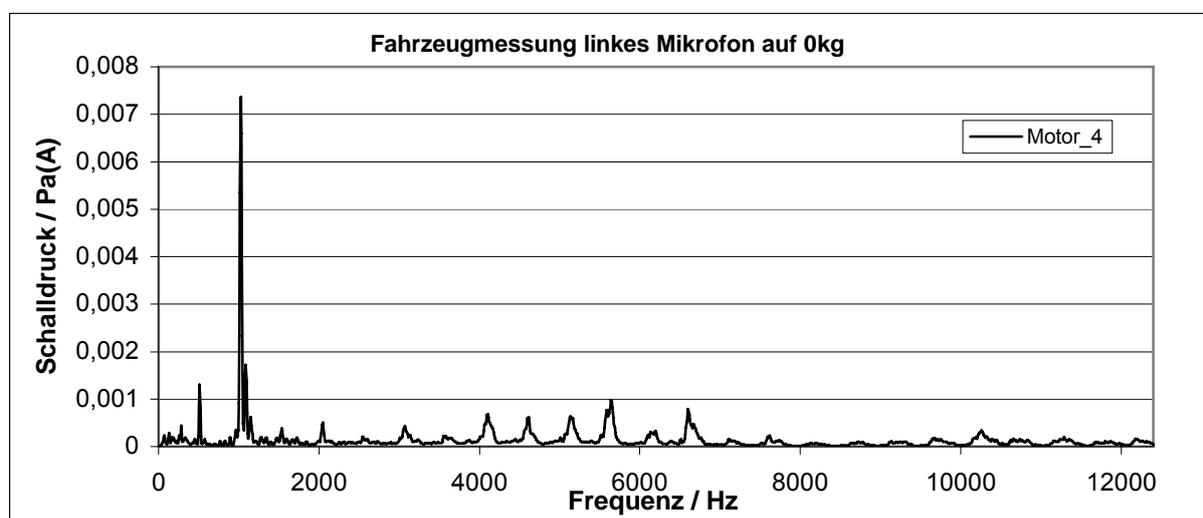


Bild 6.38: FFT aus den Fahrzeugmessungen Motor 4.

6.3.4 Motor 5

Motor 5 ist aus den Ergebnissen der Fahrzeugmessungen subjektiv wie objektiv als schlechtester Motor bewertet worden. Er weist ein sirenenartiges, grelles Geräusch auf. Wie in Bild 6.39 zu sehen, ist der Betrag der Bürstenfrequenz nicht so hoch wie zum Beispiel bei Motor 3, dafür ist die Breite der Amplitude erheblich größer als bei

Motor 3 und 4, was auf eine höhere Energie des Geräuschs hinweist. Die Amplitude in den Ordnungen 8 und 16 ist, äquivalent den Harmonischen 8 und 16 aus der FFT, niedriger als die von Motor 3 und 4 zeigt (Bild 6.36). Zusätzlich ist eine hohe Amplitude bei der dritten Harmonischen der Bürstenfrequenz zu erkennen. Wie bei Motor 4 sind hochfrequente Anteile bis 12400 Hz in der FFT vorhanden. Außerdem fällt in der zweiten Ordnung Motor 5 besonders auf, da er als einziger Motor eine Amplitude in Y-Richtung aufweist. (Bild 6.40)

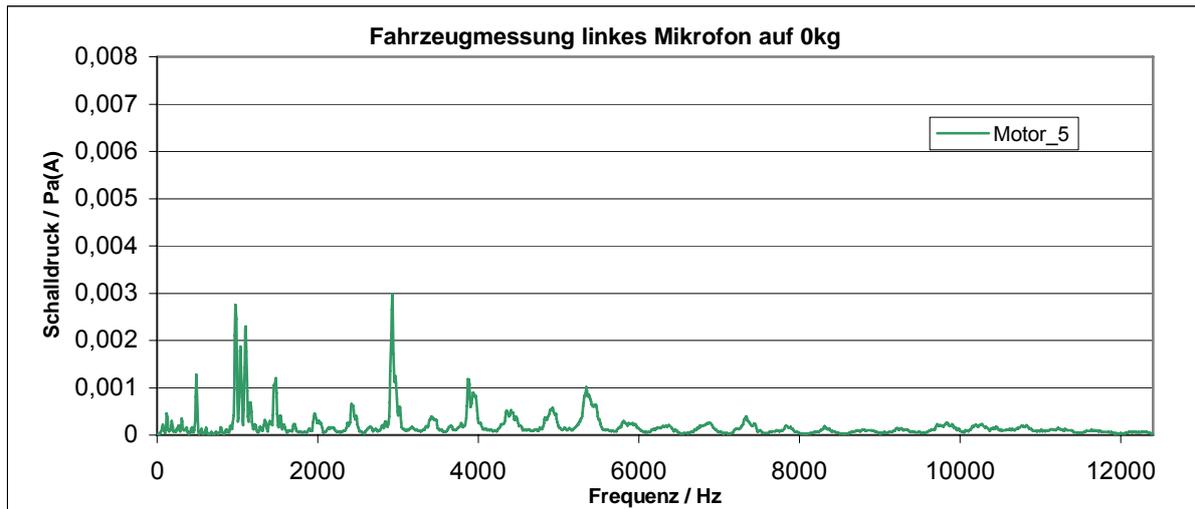


Bild 6.39: FFT aus den Fahrzeugmessungen Motor 5.

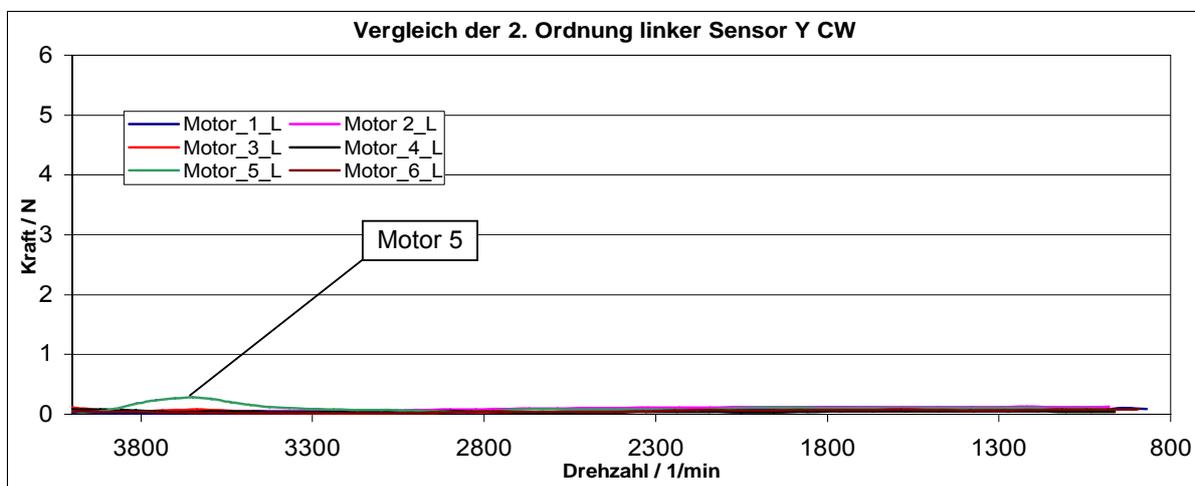


Bild 6.40: Auffälligkeit von Motor 5 in der 2. Ordnung.

6.3.5 Motor 6

Da Motor 6 ausschließlich Auffälligkeiten im tieffrequenten Bereich in der FFT besitzt und die subjektive Bewertung durchweg mit brummig bewertet wurde, ist der Vergleich auf die 1. Ordnung und den Bereich der Drehfrequenz beschränkt worden. Wie in Bild 6.41 zu sehen, sind die Drehfrequenz und die erste Harmonische stark ausgeprägt. Korrelierend dazu besitzt Motor 6 in allen drei Messrichtungen in der 1.

Ordnung den Verlauf mit dem höchsten Betrag. Als Beispiel ist die X-Richtung in Bild 6.42 gewählt worden. Y und Z Richtung sind im Abschnitt 6.2.3.2.1 abgebildet.

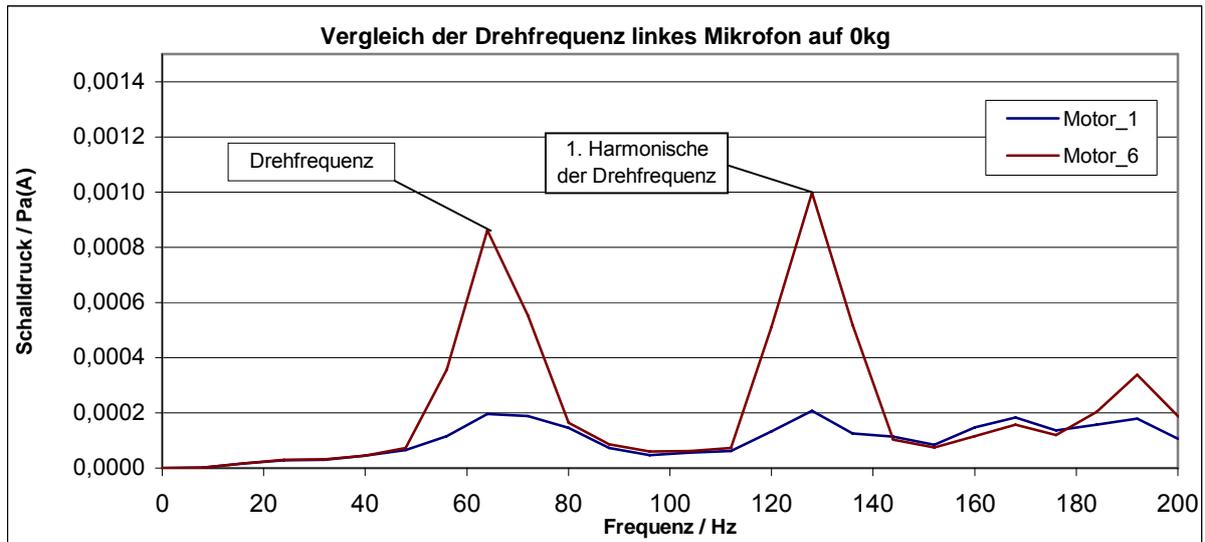


Bild 6.41: Drehfrequenz und erste Harmonische des 6. Motors. Zum Vergleich Motor 1.

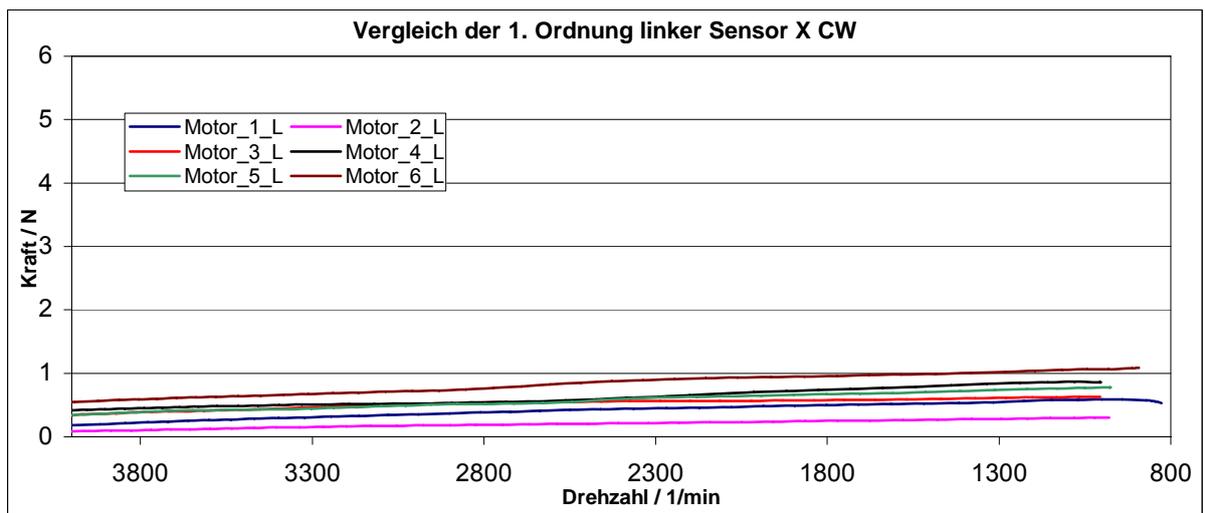


Bild 6.42: 1. Ordnungen im Vergleich.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass, wenn die 1. Ordnung konstant erhöht ist, tieffrequente Anteile im Motorgeräusch vorhanden sind und dass eine Unwucht, ein Fluchtfehler oder eine verbogene Welle am Motor vorhanden ist.

6.4 Ordnungsanalyse vs. Leerlaufmessung

Wie schon in Kapitel 1 erwähnt, war es bisher üblich, Gleichstrommotoren im Leerlauf subjektiv wie objektiv zu bewerten. Der große Nachteil der Leerlaufmessung gegenüber der Ordnungsanalyse mit Runterfahrt durch das gesamte motorspezifische Drehzahlenspektrum wird bei genauerer Betrachtung der als Beispiel gewählten 8. Ordnung der Motoren deutlich.

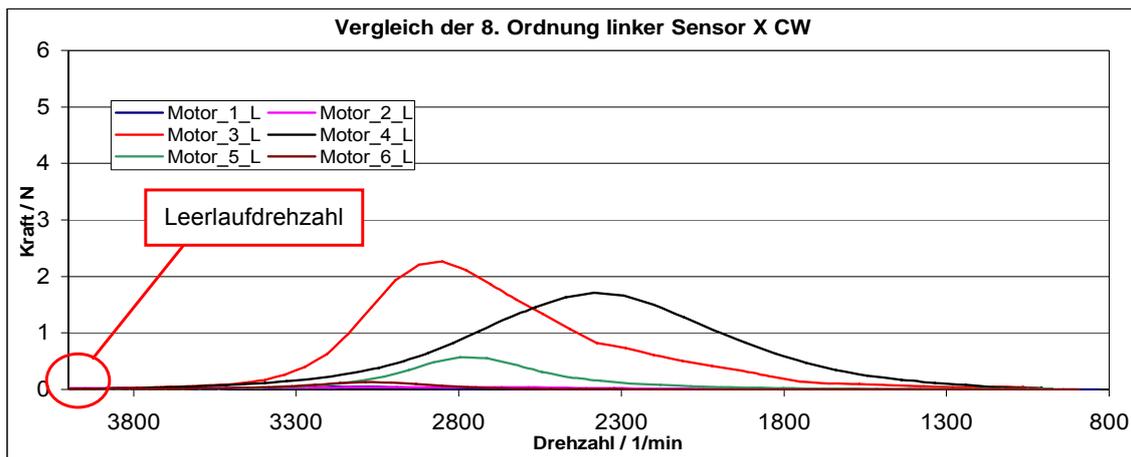


Bild 6.43: Ordnungsanalyse vs. Leerlaufmessung.

In Bild 6.43 ist deutlich der Vorteil der Runterfahrt zu erkennen. Die kritischen Stellen die bei den Motoren 3,4 und 5 zwischen 3300 und 1300 1/min auftreten, werden bei der Leerlaufmessung nicht erfasst. Wären die in dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse auf Basis der Leerlaufmessung erstellt worden, hätten ausnahmslos alle Motoren als i.O. bewertet werden müssen. Da die Betriebsdrehzahl im Sitzversteller sich im Bereich der Peaks befindet, ist auf die Leerlaufmessung weitestgehend zu verzichten, da mit dieser Messung eventuelle Fehler der Motoren nicht erfasst werden können.

6.5 Problemlösung

Im Verlauf der Messungen traten einige Probleme auf, deren Lösungen im Folgenden beschrieben werden.

6.5.1 50 Hz Fehlerfrequenz

Während der ersten Messdurchläufe bildete sich in einigen Spektren mehr oder weniger stark eine Frequenzlinie bei 50 Hz aus. Zusätzlich kamen noch die Harmonischen 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz usw. hinzu. Da während der Bremsung des Motors von Höchstzahl auf ca. 900 1/min die 50 Hz und deren Harmonische durchlaufen

werden ($50 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{60 \cdot s}{1 \cdot \text{min}} = 3000 \frac{1}{\text{min}}$), ist diese Störung nicht zu vernachlässigen. Ein

zusätzliches Problem ergibt sich dadurch, dass im Fahrzeug der Bereich, in dem der Motor stationär dreht, sich die Drehzahl um die 3000 1/min bewegt. Es ist also ein wichtiger Auswertpunkt von einer Störfrequenz überlagert und kann so nicht ausgewertet werden. Dieser Fehler konnte also nicht vernachlässigt werden.

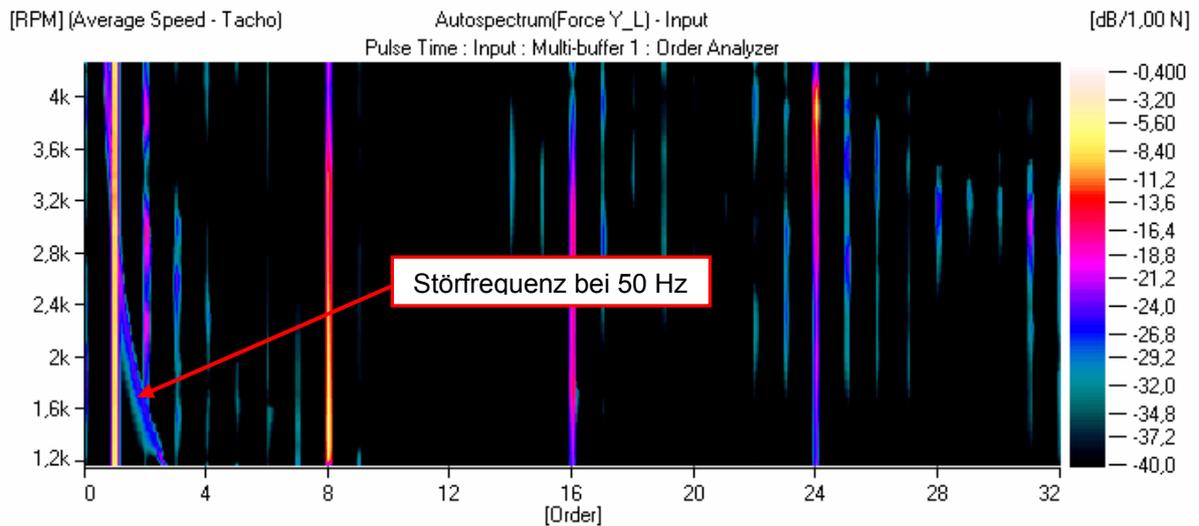


Bild 6.44: Ordnungsspektrum des linken Sensors in X-Richtung der ersten Messreihe.

Die erste Vermutung, dass es sich um eine Erdschleife handeln könnte, bestätigte sich nach Überprüfung sämtlicher Eingangsstromquellen und Erdung des Prüfstandes nicht.

Die ersten Messungen wurden mit einem 5-kanaligem Frontend der Fa. Bruel&Kjaer durchgeführt. Also wurden, um die Signale aller 6 Anschlüsse der Kraftsensoren und das Drehzahlsignal aufzeichnen zu können, zwei Messreihen durchgeführt. Dadurch war immer ein Anschlusskabel jedes Sensors nicht an das Messerfassungssystem angeschlossen. Dieses offene Kabel führte zu der 50 Hz Störung.

7 Zusammenfassung

- Der neue Prüfstand weist durch die Verwendung eines Kreuzsupports ein verbessertes Handling auf. (Abschnitt 5.2.2)
- Die Sensoren können vom Prüfstand demontiert werden, ohne die Vorspannkraft zu lösen. Was einen erheblichen Flexibilitäts- und Zeitvorteil bringt. (Abschnitt 5.2.2 und 5.3.1)
- Die Eigenfrequenz des neukonstruierten Prüfstandes ist rechnerisch um 800 Hz höher als die Eigenfrequenz des alten Prüfstandes. Was dazu führt, dass der genaue Messbereich des Prüfstandes erhöht wurde. (Abschnitt 5.2.3)
- Die Sensoren haben einen auswertbaren Frequenzmessbereich von 1050 Hz in Y-Richtung, 1600 Hz in X und Z-Richtung. (Abschnitt 5.4)
- Mit Hilfe der definierten Parameter aus der Ordnungsanalyse ist es möglich, an Gleichstrommotoren Fehler zu lokalisieren und so eine drehzahlbezogene Bewertung über den Motor abzugeben. (Abschnitt 6.2)
- Die Ordnungsanalyse hat einen klaren Vorteil gegenüber der bisher verwendeten Leerlaufmessung. Fehler in niedrigeren Drehzahlbereichen können gegenüber der Leerlaufdrehzahl mit Hilfe der Ordnungsanalyse selektiert werden. Dagegen wird bei der Leerlaufmessung nur eine feste Drehzahl ausgewertet. (Abschnitt 6.4)
- Es bestehen Verbindungen zwischen Fahrzeugmessung und Ordnungsanalyse (Abschnitt 6.3)
- Die ermittelten Fehler decken sich mit den Modifikationen die von Bosch an den Probemustern durchgeführt worden sind. Das bedeutet, dass mit dem vorhandenen Auswertverfahren Fehler an Motoren genau selektiert werden können. (Abschnitt 6.2.3.2.6)

8 Ausblick

- Der Motor sollte noch während eines Runterfahrvorgangs mit einem Laser-Scanning auf sein Schwingverhalten hin überprüft werden.
- Ein Adapter zur Messung von Motor-Getriebe-Einheiten sollte konstruiert werden, damit eine drehzahlabhängige Analyse von Getrieben durchgeführt werden kann.
- Feste Parameter zur i.O./ n.i.O. Bewertung mit Hilfe der Ordnungsanalyse sollten definiert werden, damit am Prüfstand Motoren selektiert werden können.

9 Literatur

9.1 Fachbücher

- [I] Decker – Maschinenelemente 14. Auflage – Hanser-Verlag
- [II] Josef Kulerus – Zustandsüberwachung von Maschinen 3. Auflage – Expert Verlag
- [III] Helmut Tschöke – Motor- und Aggregateakustik – Expert Verlag 2003
- [IV] Brüel&Kjaer - Frequency Analysis – 3rd Edition 1987
- [V] Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau 18. Auflage Springer-Verlag
- [VI] N.Weichert/ M.Wülker – Messtechnik und Messdatenerfassung – Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2000
- [VII] Alfred Hederer u.A. – Elektromotorenprüfung – Expert-Verlag 1999
- [VIII] Helmut Moczala u.A. – Elektrische Kleinmotoren – 2.Auflage 1993 Expert-Verlag
- [IX] Stöcker – Taschenbuch der Physik – Verlag Harri Deutsch
- [X] Jörg Hoffmann – Taschenbuch der Messtechnik – 1. und 3. Auflage – Fachbuchverlag Leipzig
- [XI] Ivar Veit – Technische Akustik – 5. Auflage 1996 – Vogel Verlag

9.2 Tagungsunterlagen und Fachberichte

- [XII] Brüel&Kjaer – Pulse Anwenderschulung (2004)
- [XIII] Brüel&Kjaer – Strukturen Prüfen Teil 1: Mechanische Beweglichkeitsmessung (1989)
- [XIV] Brüel&Kjaer – Strukturen Prüfen Teil 2: Modalanalyse und Simulation (1989)
- [XV] Brüel&Kjaer – Schwingprüfung (1985)
- [XVI] S. Backhaus – Lärminderung setzt an der Quelle an – Schallquellenidentifikation mit Hilfe der Ordnungsanalyse – erschienen in IMW Institutmitteilung Nr. 25 S.133-136 (2000)
- [XVII] Dipl.-Ing. H. Groppe, Dipl.-Ing. H. Jonuscheit, Dipl.-Ing. O. Strama, Prof. Dr.-Ing. R. Thomä – Ordnungsanalyse - erschienen in Bonfig: Meßtechnik und Signalverarbeitung, Band 2, S.122-127 – MESSCOMP, '96
- [XVIII] Uchtmann, Kai; Wirth, Rainer – Maschinendiagnose an drehzahlveränderlichen Antrieben mittels Ordnungsanalyse – erschienen in Lift-Report Heft 25, H, 4 1999 S. 120-122
- [XIX] Grundlagen der dynamischen Signalanalyse – HP Application Note 243
- [XX] B. Virnich – Einfluss der Drehzahlerfassung auf die Genauigkeit der Ordnungsanalyse oder Grad- Kurbelwinkel-Darstellung – erschienen in „Motor- und Aggregateakustik“ Hrsg. Helmut Tschöke – Expert Verlag 2003

9.3 Skripte

- [XXI] Kameier, F., Berger,C. – Computerunterstützte Messdatenerfassung und –verarbeitung – FH-Düsseldorf 2004

9.4 Betriebsanleitungen

- [XXII] Kistler 3-Komponenten-Kraftsensor Typ 9017A,9018A,9016A4
- [XXIII] Brüel&Kjaer – Charge to DeltaTron Converters Types 2647, 2647 A, 2647 B and 2647 C
- [XXIV] Magtrol / Vibro-Meter – Wirbelstrom- und Magnetpulverbremse WB/PB 43 Ausgabe 4

9.5 Webseiten

[XXV] <http://www.quality.de/lexikon/messkette.htm>

[XXVI] <http://www.matweb.com>

Beilage zur Abschlussarbeit

Name: Hübner
Vorname: Christian
Matr. Nr.: 409939

Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorgelegte Abschlussarbeit selbständig angefertigt und keine anderen Hilfsmittel und ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

.....

Datum

.....

Unterschrift

10 Anhang

10.1 Rechnerische Berechnung der Eigenfrequenzen

10.1.1 FEM-Modelle des vorhandenen Prüfstandes

Die Modelle und Auswertungen der Eigenfrequenzanalyse befinden sich auf der zur Arbeit gehörenden DVD.

10.1.2 Modellparameter

10.1.2.1 Definition „1.4542“

Tab. 10.10: Eigenschaften

Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$2,01 \times 10^{11}$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,27
Massendichte	Temperaturunabhängig	7.780,0 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	0,0 1/°C
Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	0,0 J/kg·°C

Tab. 10.11: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$1,07 \times 10^9$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$1,17 \times 10^9$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$1,07 \times 10^9$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.2 Definition von „1.4305“

Tab. 10.12: Eigenschaften

Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$1,93 \times 10^{11}$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,25
Massendichte	Temperaturunabhängig	8.000,0 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	0,0 1/°C
Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	0,0 J/kg·°C

Tab. 10.13: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,4 \times 10^8$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$6,2 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,4 \times 10^8$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.3 Definition von "Aluminiumlegierung"**Tab. 10.14: Eigenschaften**

Name	Typ	Wert	Temperatur
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$7,1 \times 10^{10}$ Pa	
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,33	
Massendichte	Temperaturunabhängig	2.770,0 kg/m ³	
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	$1,7 \times 10^{-5}$ 1/°C	
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturabhängig	114,0 W/m·°C	-100,0 °C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturabhängig	144,0 W/m·°C	0,0 °C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturabhängig	165,0 W/m·°C	100,0 °C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturabhängig	175,0 W/m·°C	200,0 °C
Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	875,0 J/kg·°C	

Tab. 10.15: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,8 \times 10^8$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$3,1 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,8 \times 10^8$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.4 Definition von "API"**Tab. 10.16: Eigenschaften**

Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$1,93 \times 10^{11}$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,31
Massendichte	Temperaturunabhängig	4.182,36 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	$1,36 \times 10^{-5}$ 1/°C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturunabhängig	15,1 W/m·°C

Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	480,0 J/kg·°C
-------------------	----------------------	---------------

Tab. 10.17: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,07 \times 10^8$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$5,86 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,07 \times 10^8$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.5 Definition von "PA 6.6 GF25"**Tab. 10.18: Eigenschaften**

Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$7,2 \times 10^9$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,3
Massendichte	Temperaturunabhängig	1.210,0 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	$8,0 \times 10^{-7}$ 1/°C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturunabhängig	0,28 W/m·°C
Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	296,0 J/kg·°C

Tab. 10.19: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$5,5 \times 10^7$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$1,1 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	0,0 Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.6 Definition von "Bremse"**Tab. 10.20: Eigenschaften**

Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$2,0 \times 10^{11}$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,3
Massendichte	Temperaturunabhängig	2.320,53 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	$1,2 \times 10^{-5}$ 1/°C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturunabhängig	60,5 W/m·°C

Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	434,0 J/kg·°C
-------------------	----------------------	---------------

Tab. 10.21: Spannungsgrenzen

Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,5 \times 10^8$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$4,6 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,5 \times 10^8$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.1.2.7 Definition von "Baustahl"**Tab. 10.22: Eigenschaften**

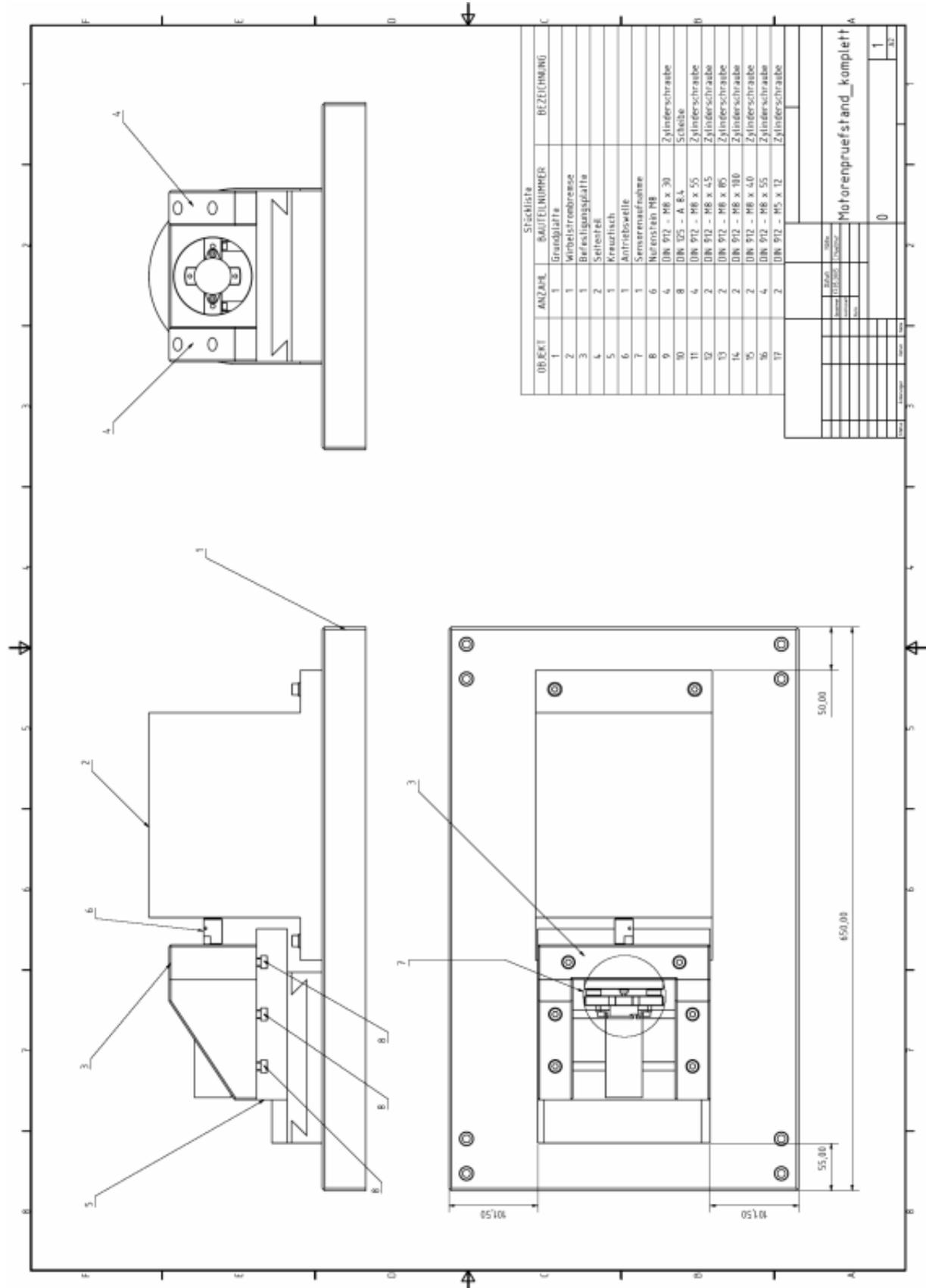
Name	Typ	Wert
Elastizitätsmodul	Temperaturunabhängig	$2,0 \times 10^{11}$ Pa
Poissonzahl	Temperaturunabhängig	0,3
Massendichte	Temperaturunabhängig	7.850,0 kg/m ³
Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	Temperaturunabhängig	$1,2 \times 10^{-5}$ 1/°C
Wärmeleitfähigkeit	Temperaturunabhängig	60,5 W/m·°C
Spezifische Wärme	Temperaturunabhängig	434,0 J/kg·°C

Tab. 10.23: Spannungsgrenzen

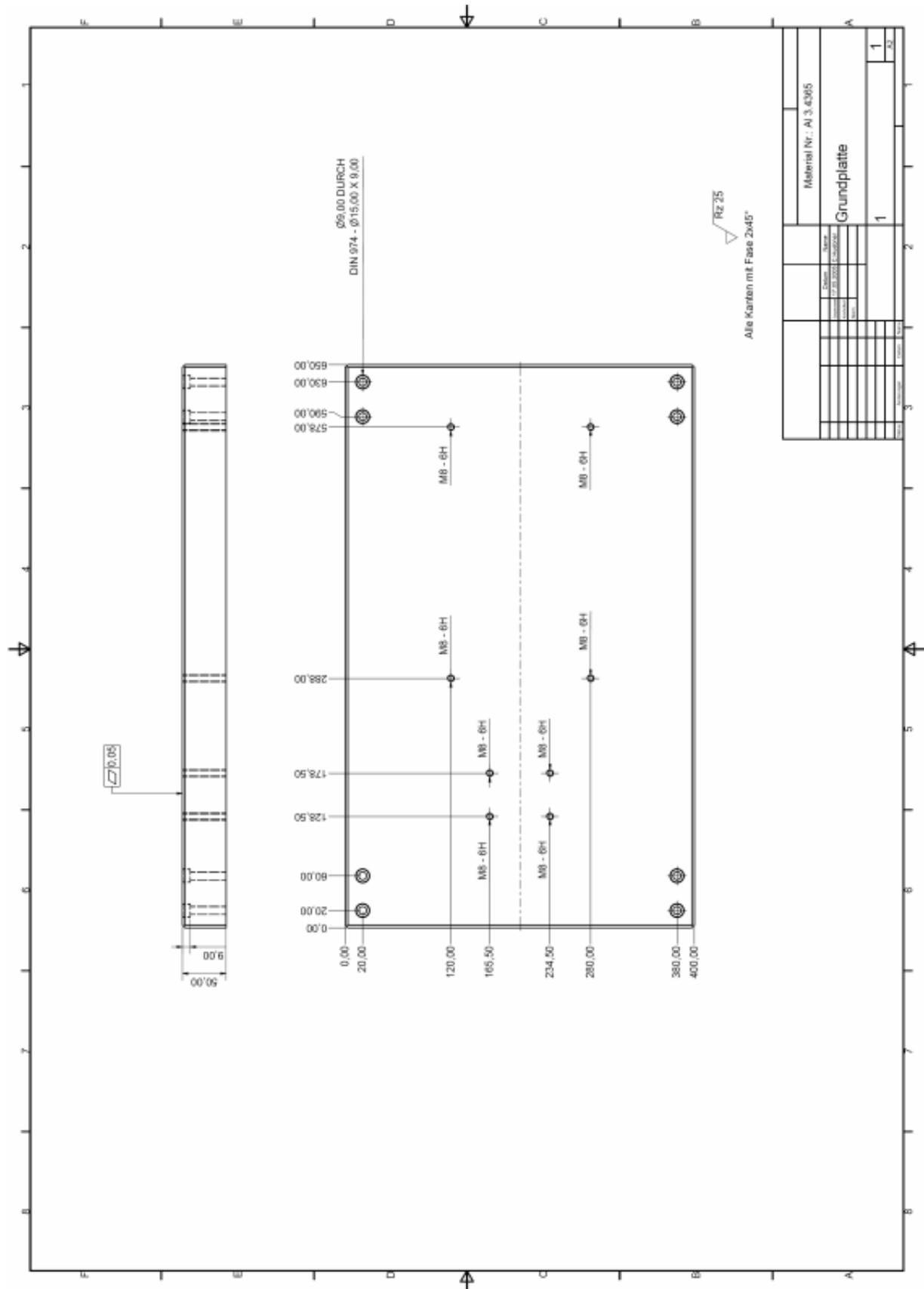
Name	Typ	Wert
Zug-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,5 \times 10^8$ Pa
Max. Zugfestigkeit	Temperaturunabhängig	$4,6 \times 10^8$ Pa
Druck-Streckgrenze	Temperaturunabhängig	$2,5 \times 10^8$ Pa
Max. Druckfestigkeit	Temperaturunabhängig	0,0 Pa

10.2 Zeichnungen des neu konstruierten Prüfstandes

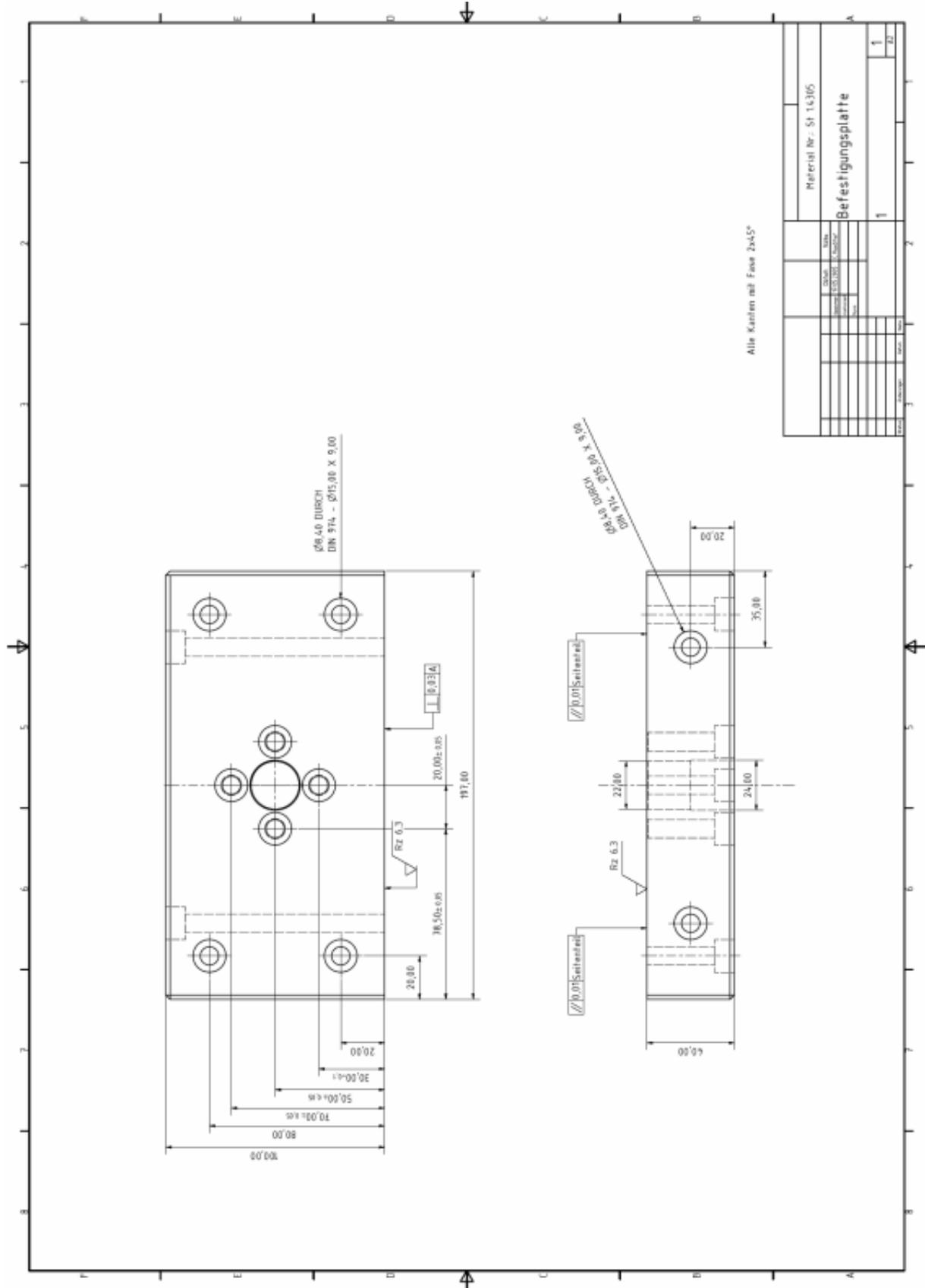
10.2.1 Prüfstand komplett



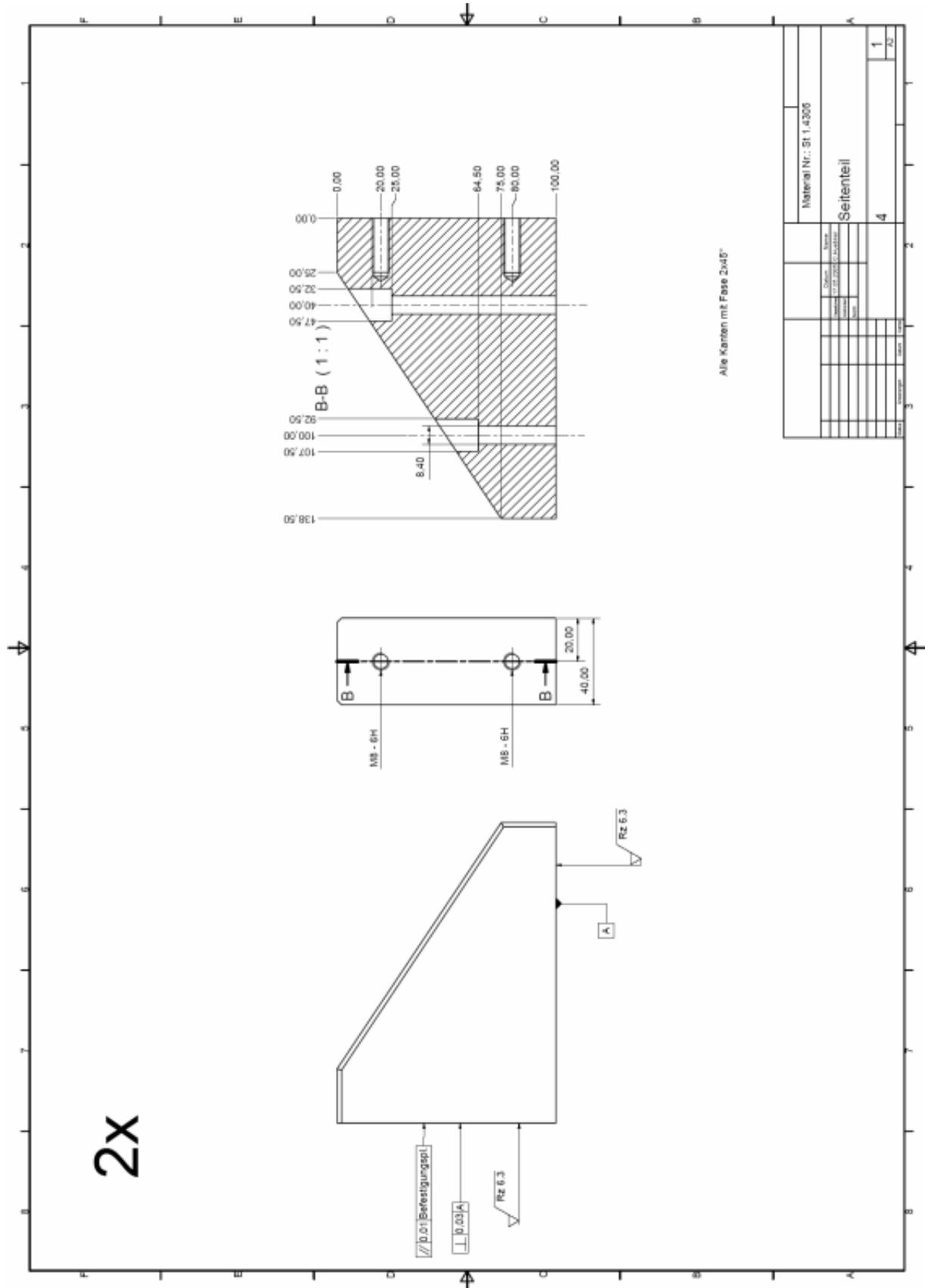
10.2.2 Grundplatte



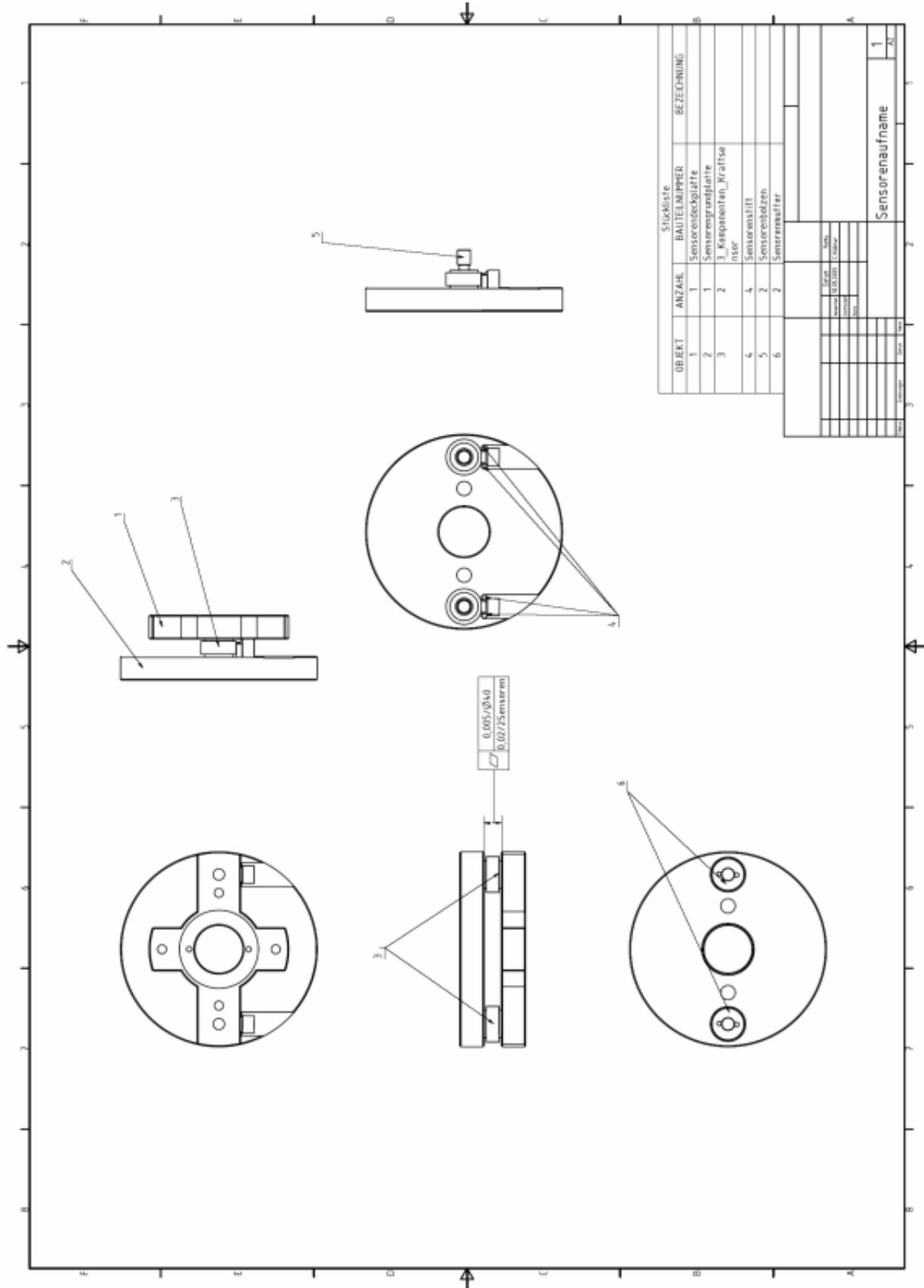
10.2.3 Befestigungsplatte



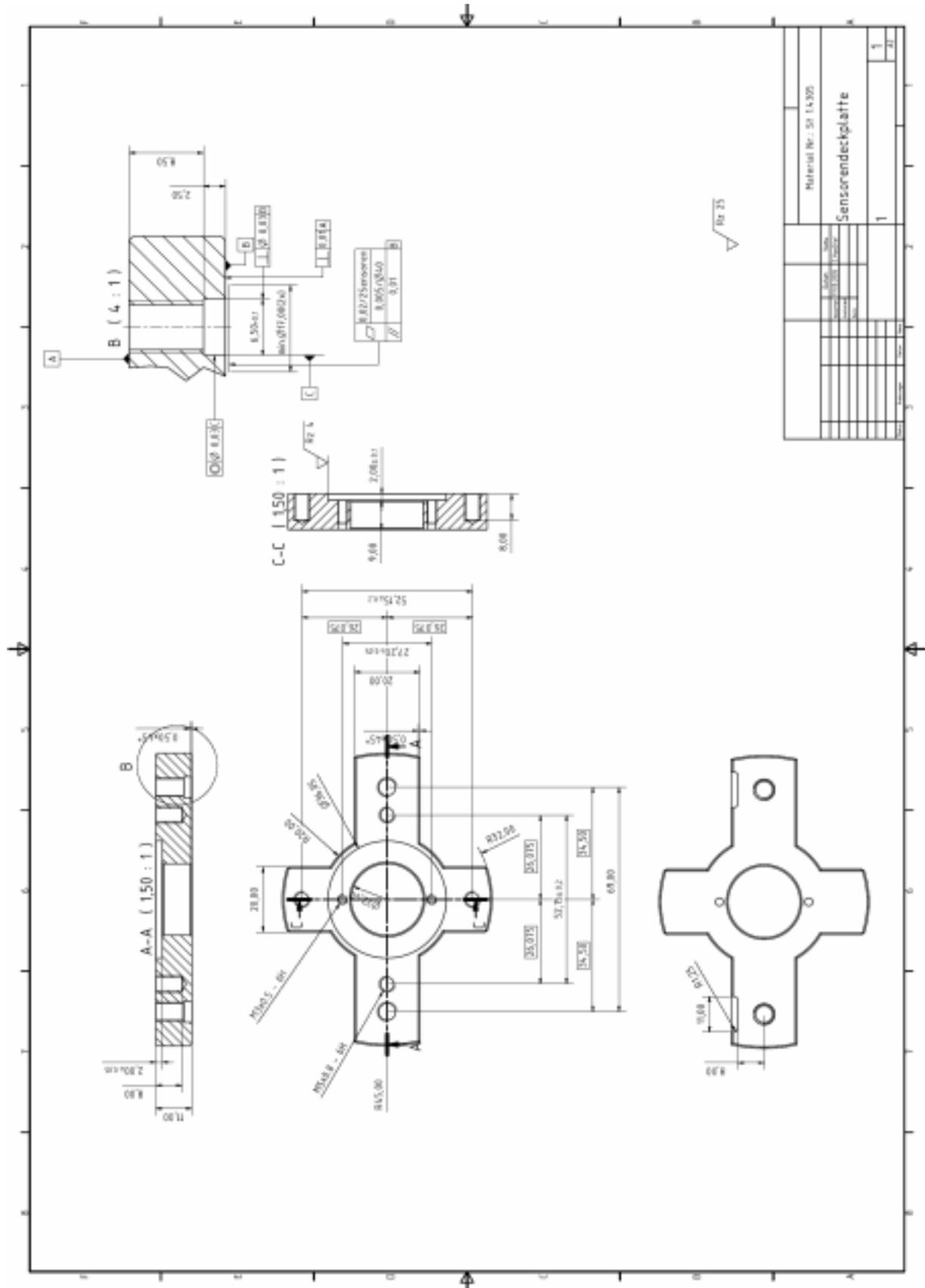
10.2.4 Seitenteil



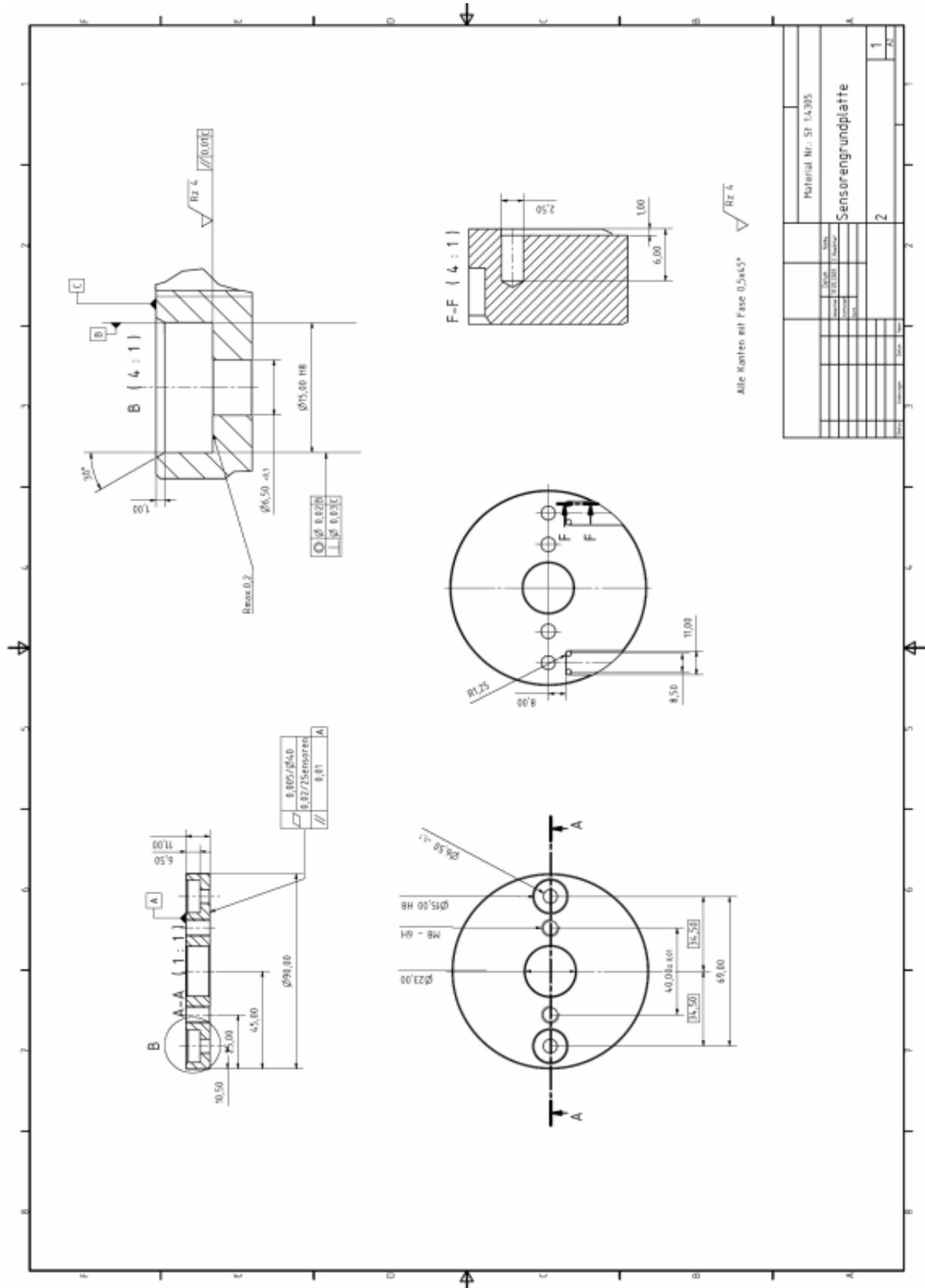
10.2.5 Sensorenaufnahme



10.2.6 Sensorendeckplatte



10.2.7 Sensorengrundplatte



10.3 Fahrzeugmessung

10.3.1 Subjektive Bewertung

10.3.1.1 Bewertungsbögen

Proband 1

Auswertung der Motoren 1-6
 Bewertungsart **Subjektiv**
 Messort Fahrzeug

Motor Nr.	Funktion	Last	Richtung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	Σ	Bewertungskriterien	
1	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 1 Laufruhe
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 3 Tieffrequent
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	SHV	0 kg	auf	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1 5 Rasseln
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1 6 Pfeifen
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	SHV	0 kg	auf	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1 9 Geräuschgleichmäßigkeit
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 11 Brummen
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	SHV	0 kg	auf	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	SHV	100 kg	auf	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
5	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	SHV	100 kg	auf	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	11
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
6	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Proband 2

Auswertung der Motoren 1-6
 Bewertungsart **Subjektiv**
 Messort Fahrzeug

Motor Nr.	Funktion	Last	Richtung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	Σ	Bewertungskriterien	
1	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2 Hochfrequent
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
2	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4 Sirren
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	6 Pfeifen
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
3	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	8 Geräusch angenehm
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	10 Lautstärke
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
4	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
5	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	54
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
6	SHV	0 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	37
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	SHV	100 kg	auf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	
			ab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9

Proband 3

Auswertung der Motoren 1-6
 Bewertungsart **Subjektiv**
 Messort Fahrzeug

Motor Nr.	Funktion	Last	Richtung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	Σ	Bewertungskriterien		
1	SHV	0 kg	auf													0		
			ab														1	1 Laufruhe
		100 kg	auf														3	2 Hochfrequent
			ab														1	3 Tieffrequent
2	SHV	0 kg	auf													2	4 Sirren	
			ab													1	5 Rasseln	
		100 kg	auf													1	6 Pfeifen	
			ab													2	7 Ozillierend	
3	SHV	0 kg	auf													4	8 Geräusch angenehm	
			ab													3	9 Geräuschgleichmäßigkeit	
		100 kg	auf													3	10 Lautstärke	
			ab													4	11 Brummen	
4	SHV	0 kg	auf													6		
			ab													6		
		100 kg	auf													6		
			ab													5		
5	SHV	0 kg	auf													7		
			ab													8		
		100 kg	auf													9	32	
			ab													8		
6	SHV	0 kg	auf													6	18	
			ab													3		
		100 kg	auf													6		
			ab													3		

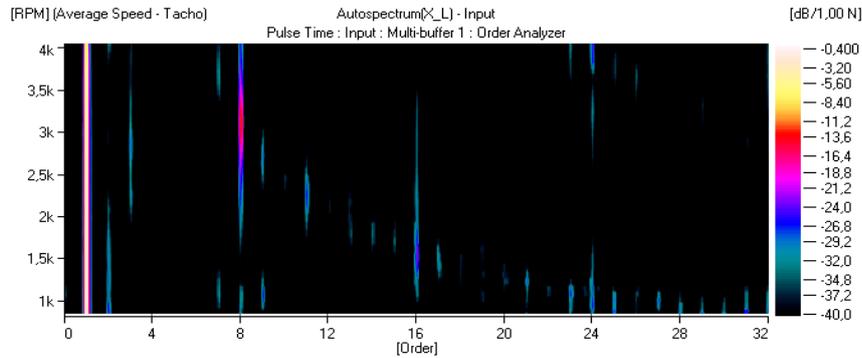
0 i.O.
 1 Grenzwertig
 2 n.i.O

10.4 Ordnungsanalyse

10.4.1 Ordnungsspektren

10.4.1.1 X-Richtung bis zur 32. Ordnung CW

Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

Musterdaten

Musternr. : 1
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter

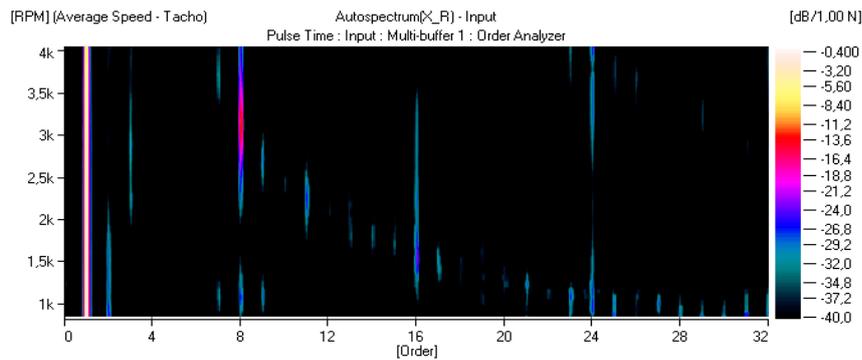
Prüfvorschrift :
 Messort :

Belastung

Sitzschale :
 Lehne :

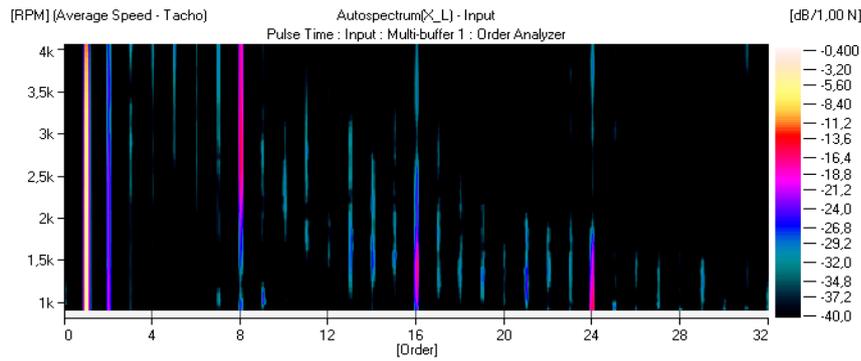
Bemerkung

Nr. 1 CW
 32. Ordnungen



Prüfer : Hübner
 Datum : 24.08.05

Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

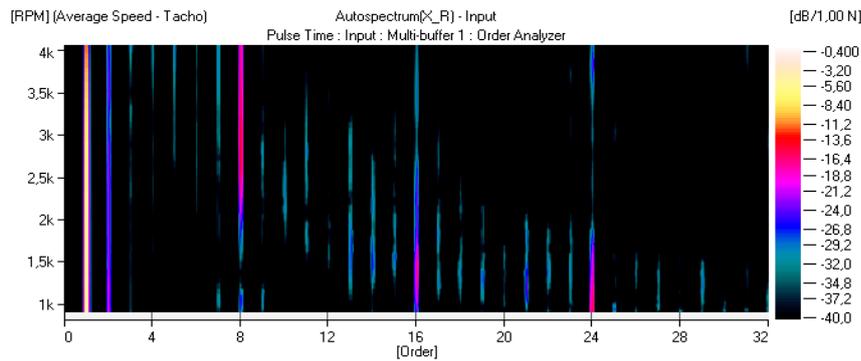
Musterdaten
 Musternr. : 2
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

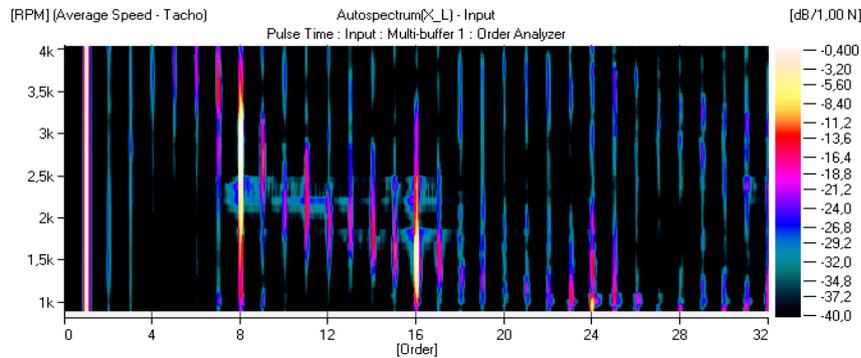
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 2 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

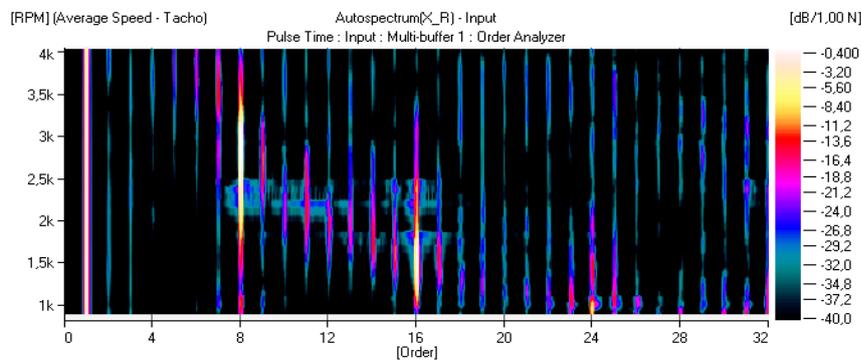
Musterdaten
 Musternr. : 3
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

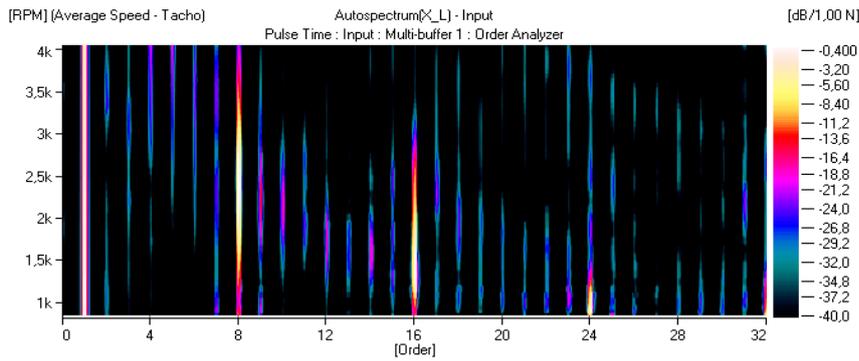
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 3 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

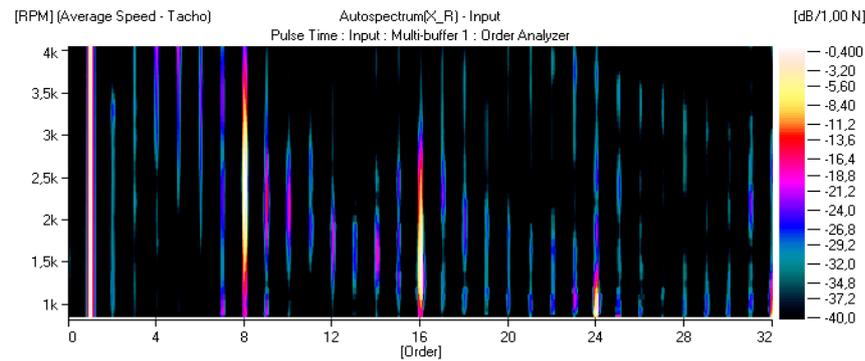
Musterdaten
 Musternr. : 4
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

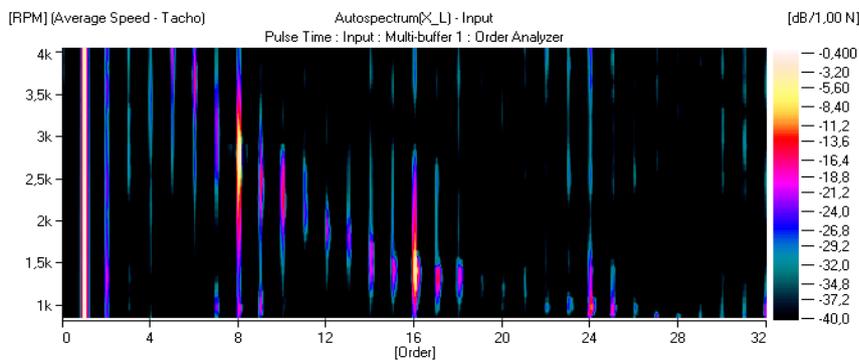
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 4 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

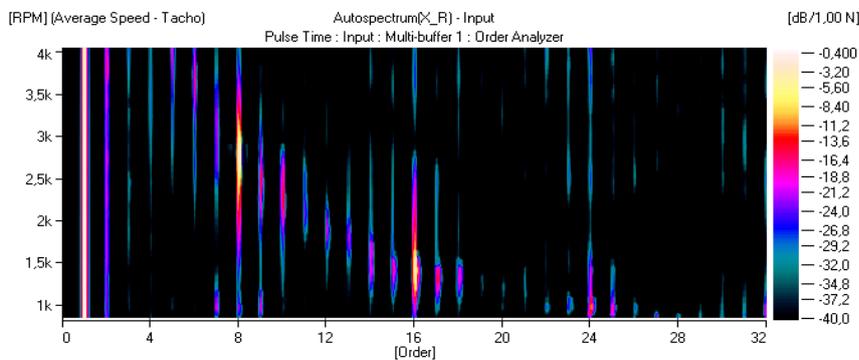
Musterdaten
 Musternr. : 5
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

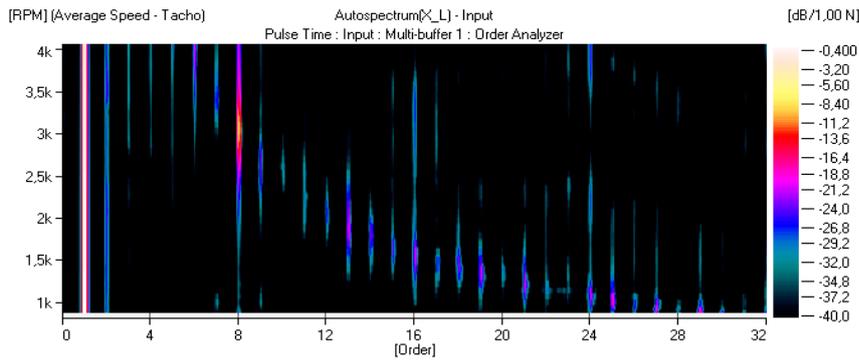
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 5 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

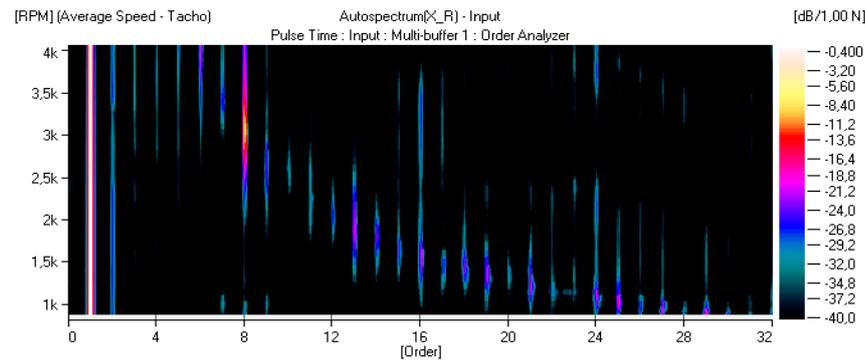
Musterdaten
 Musternr. : 6
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

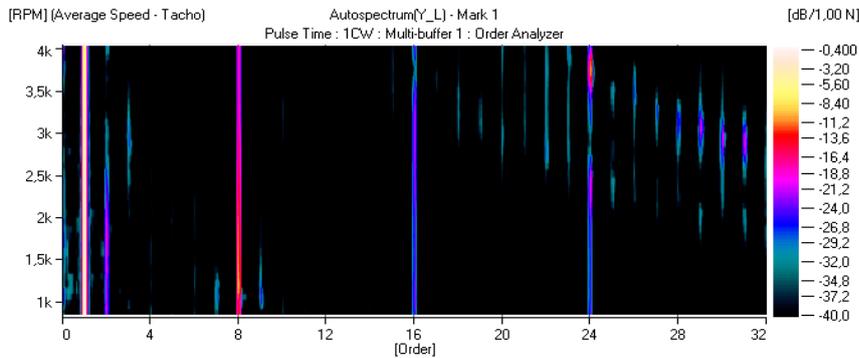
Bemerkung
 Nr. 6 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



10.4.1.2 Y-Richtung bis zur 32. Ordnung CW

Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

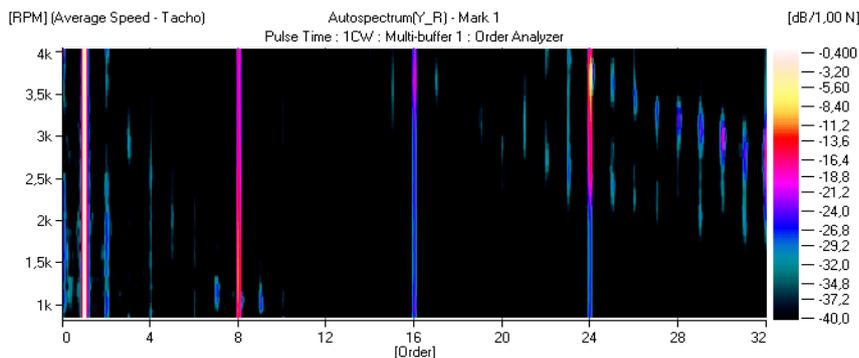
Musterdaten
 Musternr. : 1
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

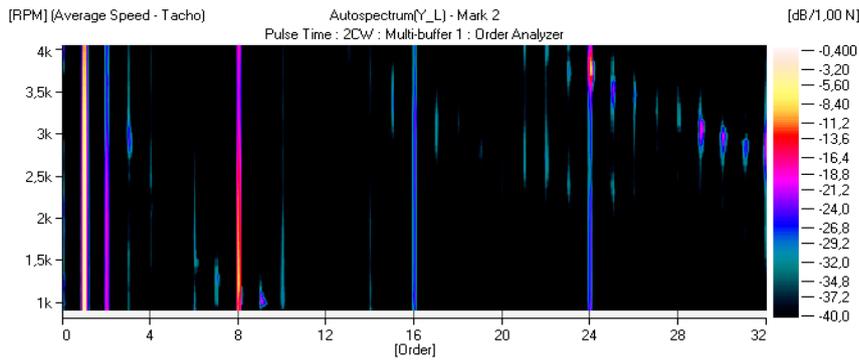
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 1 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

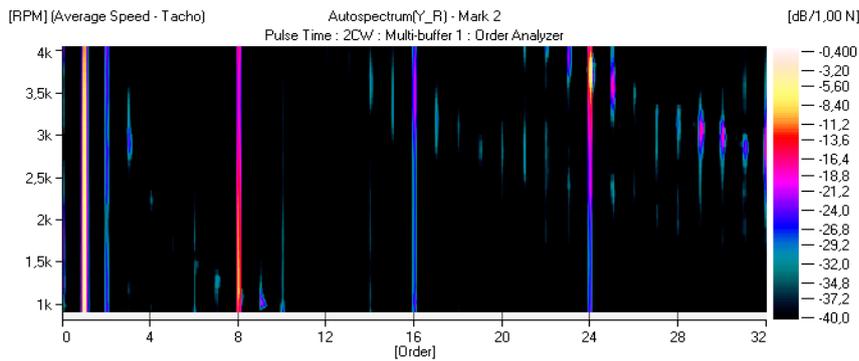
Musterdaten
 Musternr. : 2
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

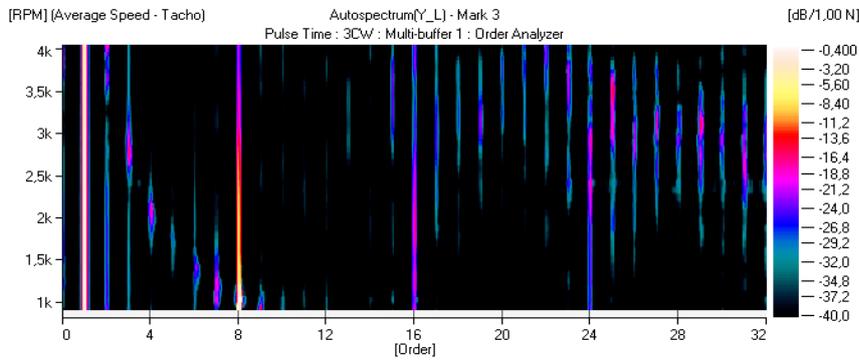
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 2 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

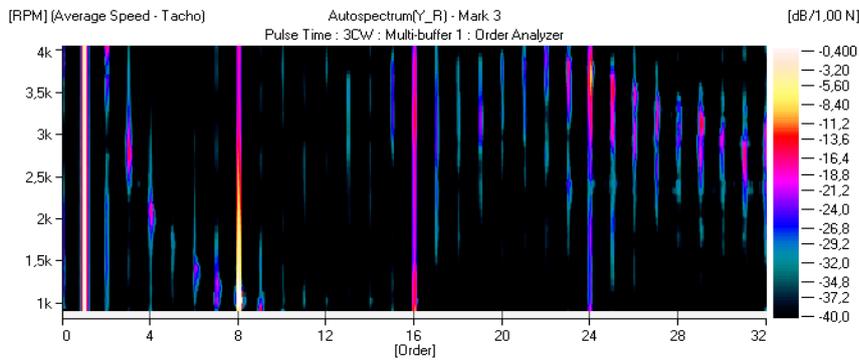
Musterdaten
 Musternr. : 3
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

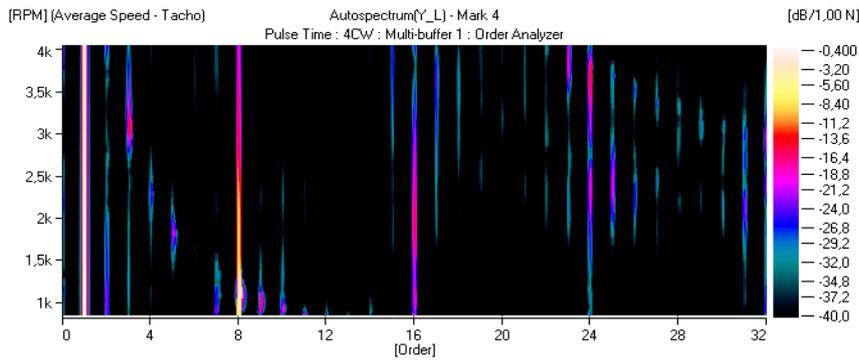
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 3 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

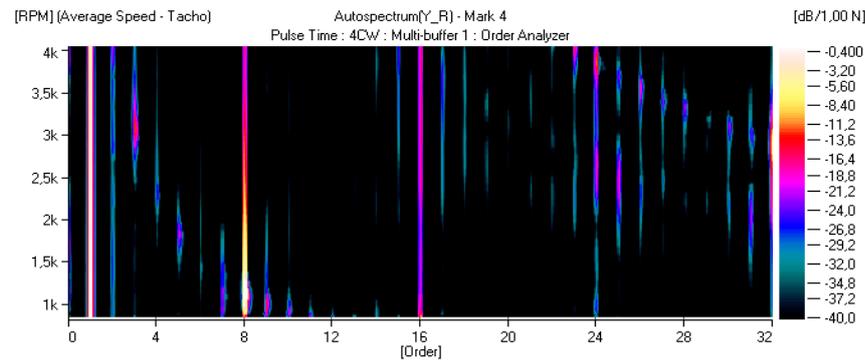
Musterdaten
 Musternr. : 4
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

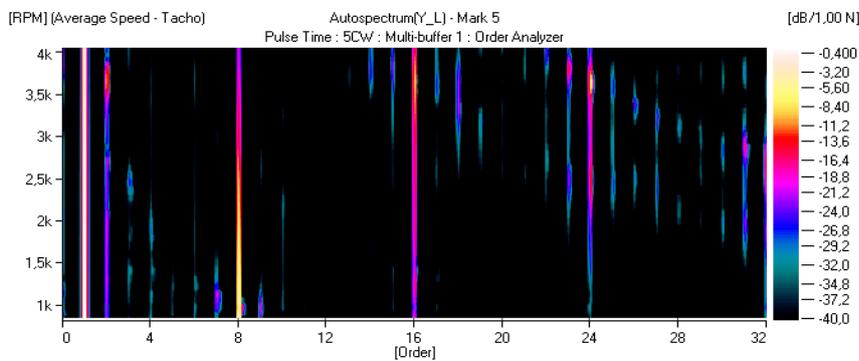
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 4 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

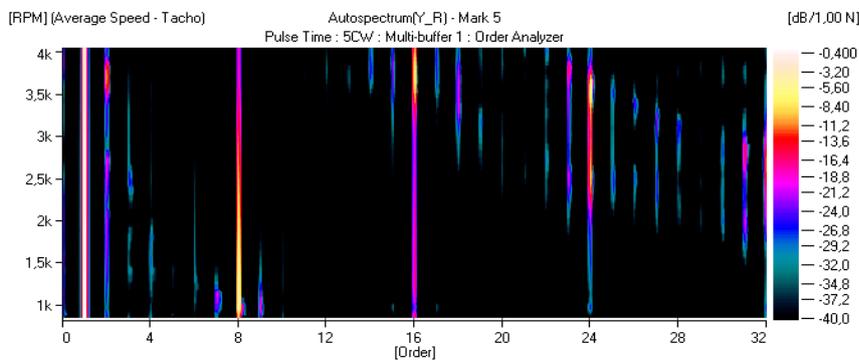
Musterdaten
 Musternr. : 5
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

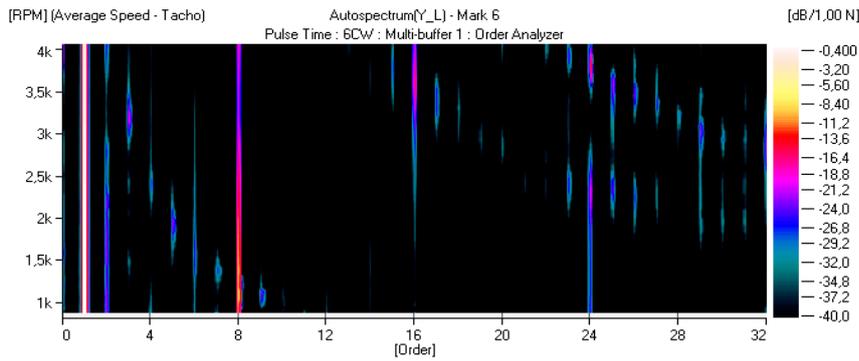
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 5 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

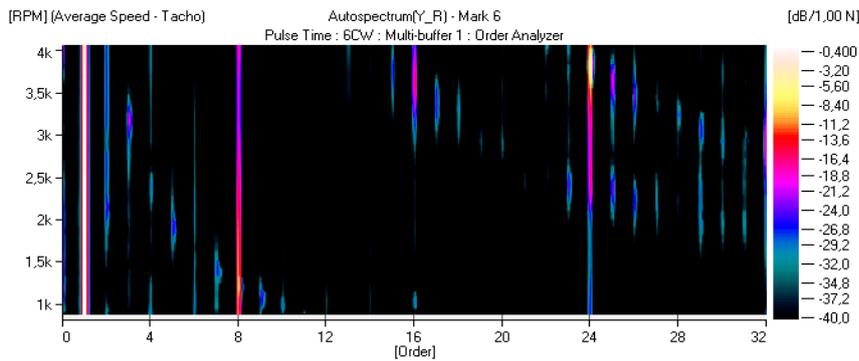
Musterdaten
 Musternr. : 6
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

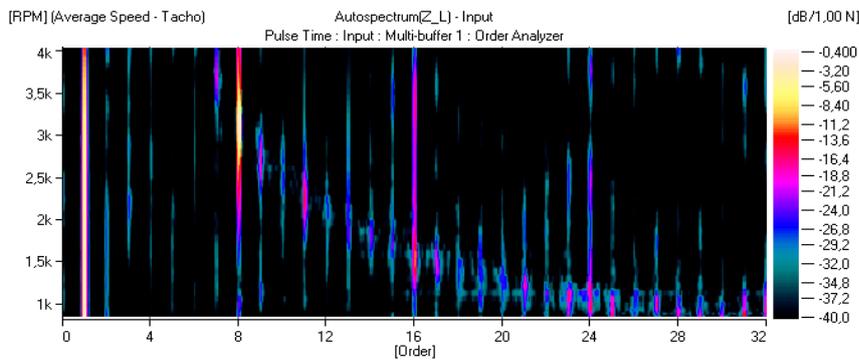
Bemerkung
 Nr. 6 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



10.4.1.3 Z-Richtung bis zur 32. Ordnung CW

Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

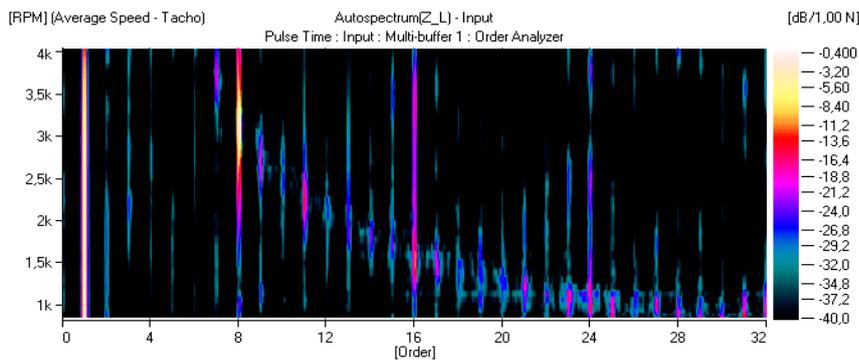
Musterdaten
 Musternr. : 1
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

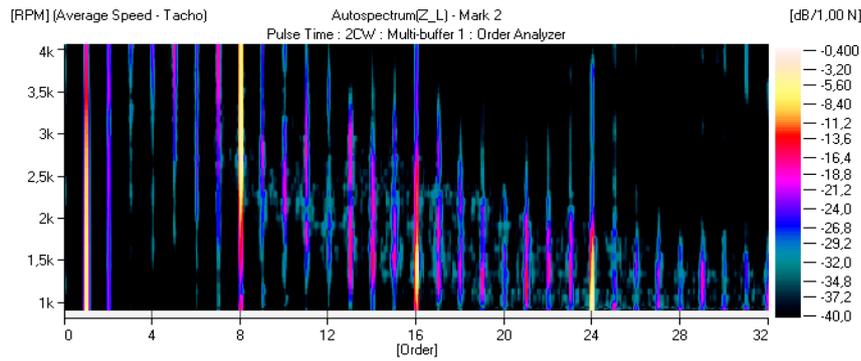
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 1 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

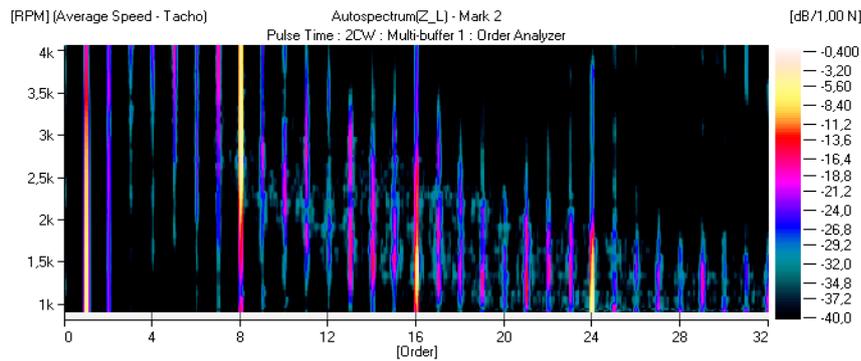
Musterdaten
 Musternr. : 2
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

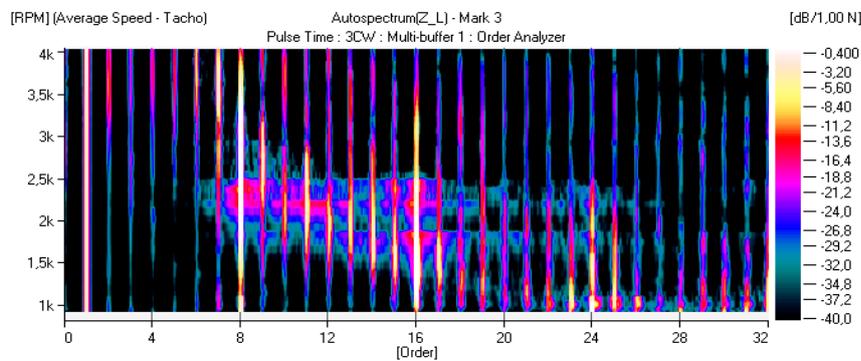
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 2 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

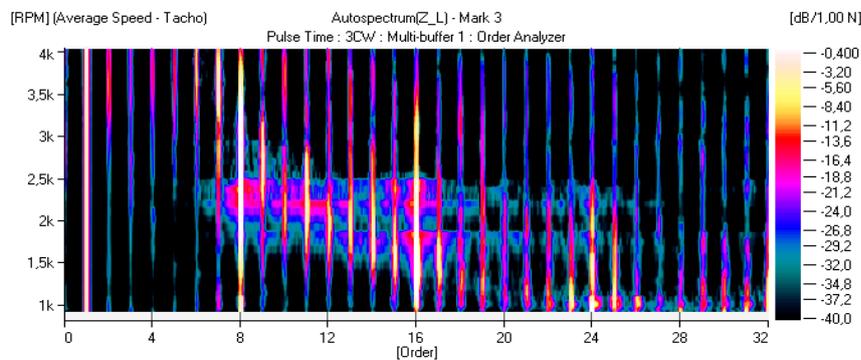
Musterdaten
 Musternr. : 3
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

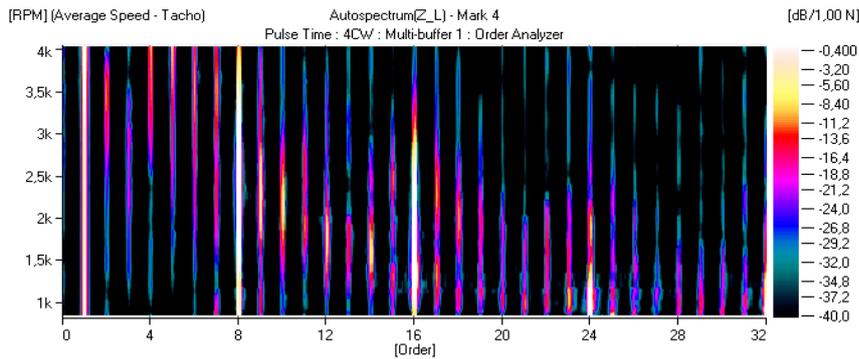
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 3 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

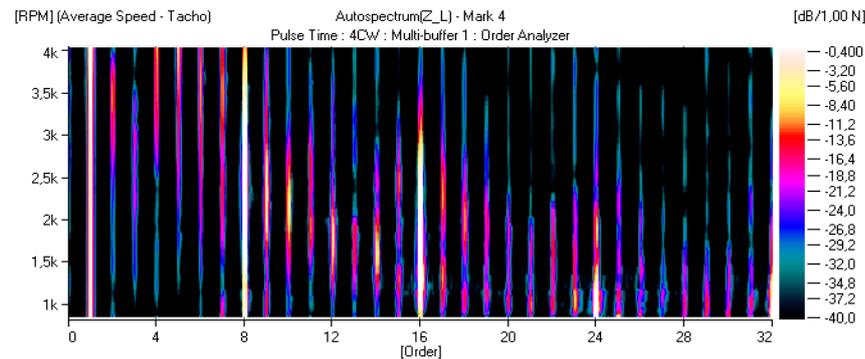
Musterdaten
 Musternr. : 4
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

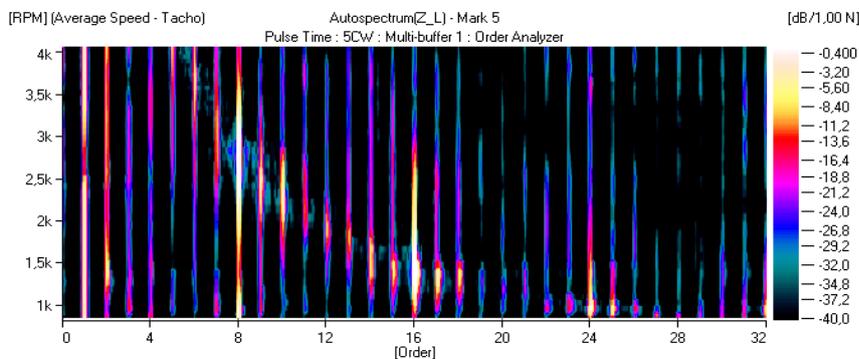
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 4 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

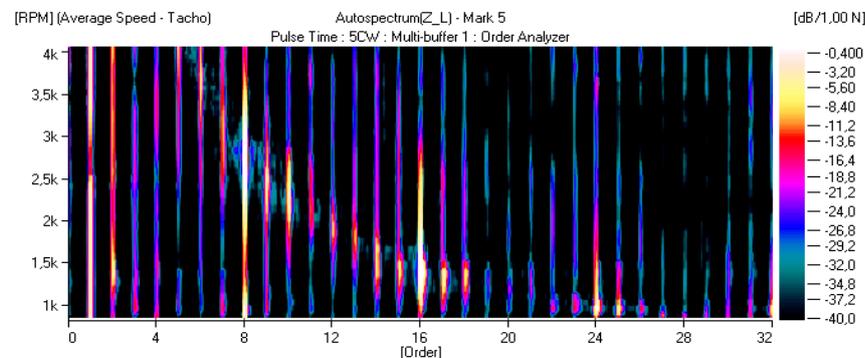
Musterdaten
 Musternr. : 5
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

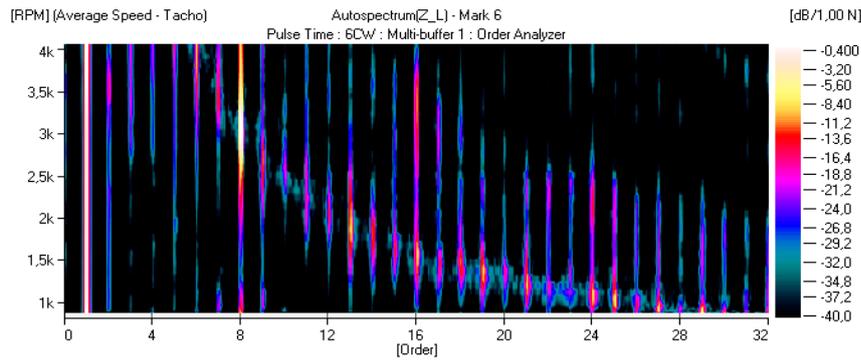
Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

Bemerkung
 Nr. 5 CW
 32. Ordnungen

Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05



Projekt : Versuchsnr. : Messung :
 ZSB-Nr. : Versuchsdatum : Funktion :



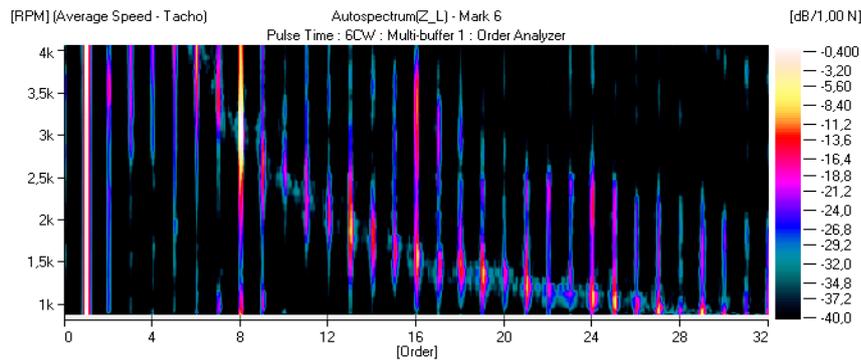
Akustik & Schwingung
GH-RD 4.3

Musterdaten
 Musternr. : 6
 Index :
 Ausführung :
 Versuchsstand :

Messparameter
 Prüfvorschrift :
 Messort :

Belastung
 Sitzschale :
 Lehne :

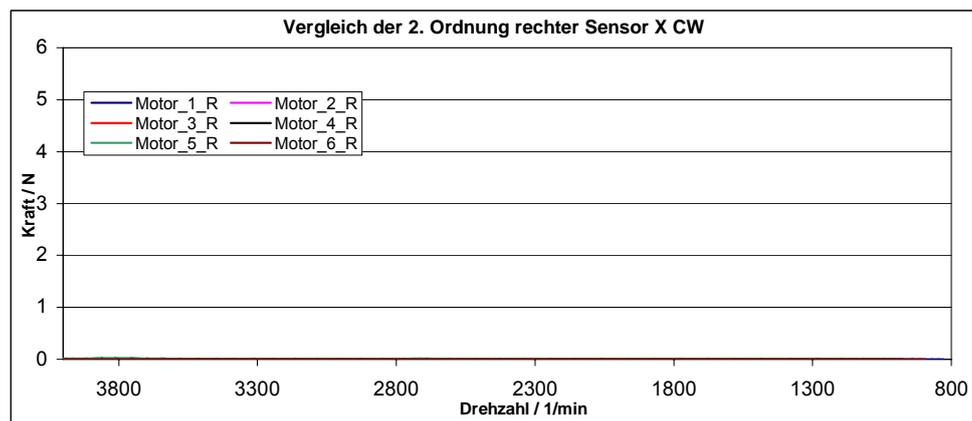
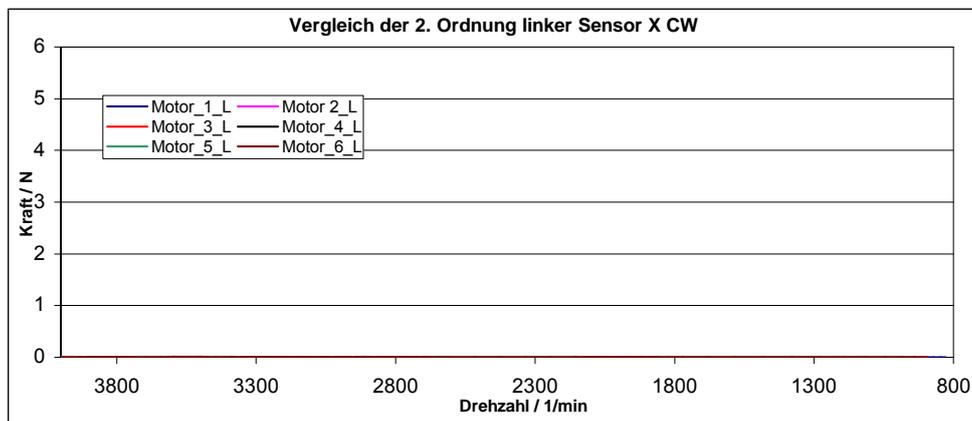
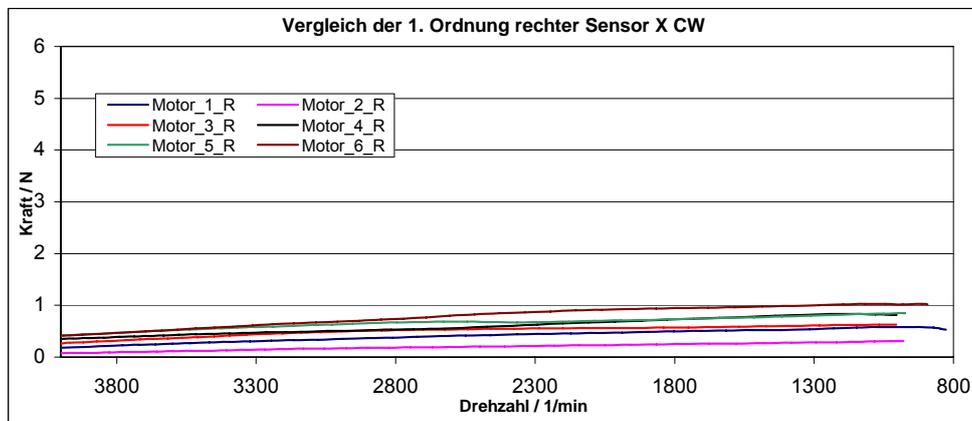
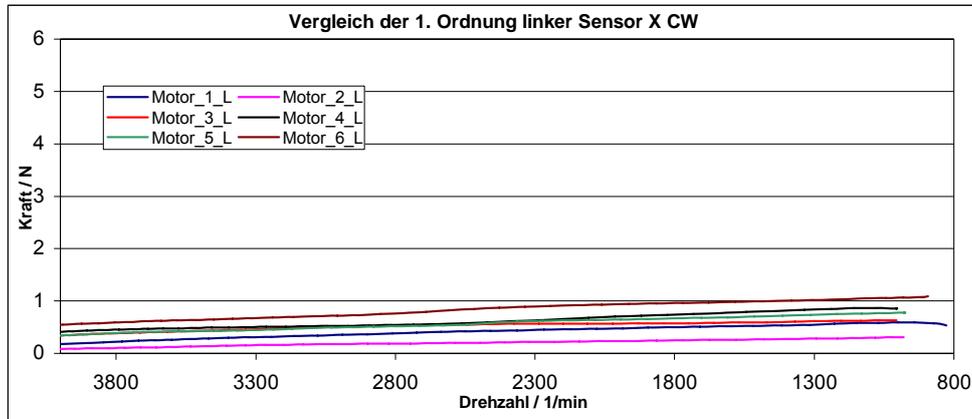
Bemerkung
 Nr. 6 CW
 32. Ordnungen

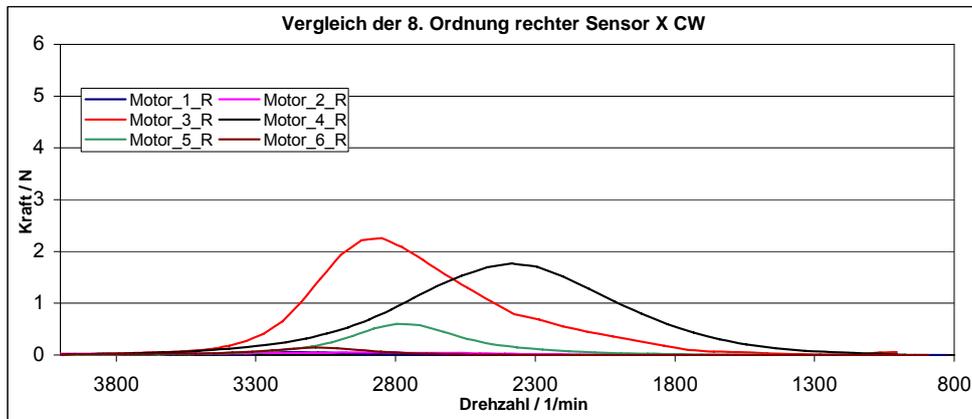
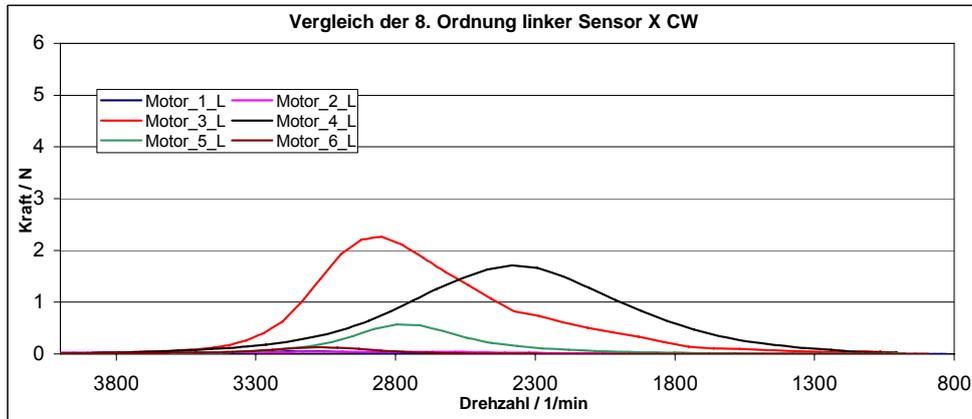
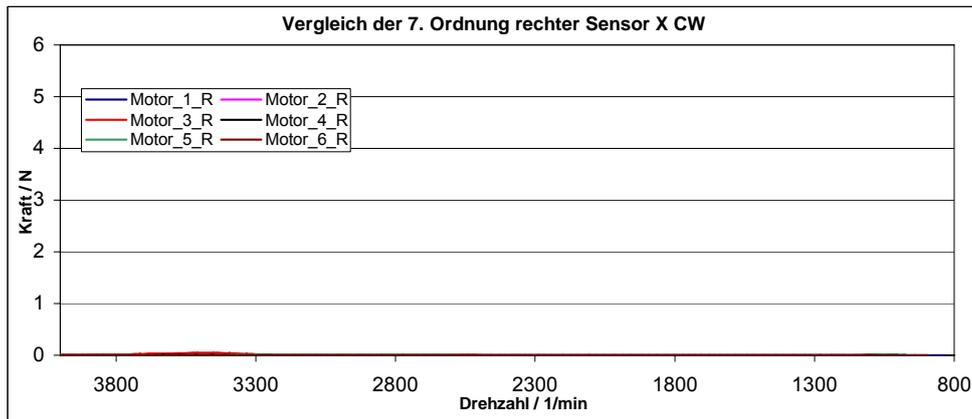
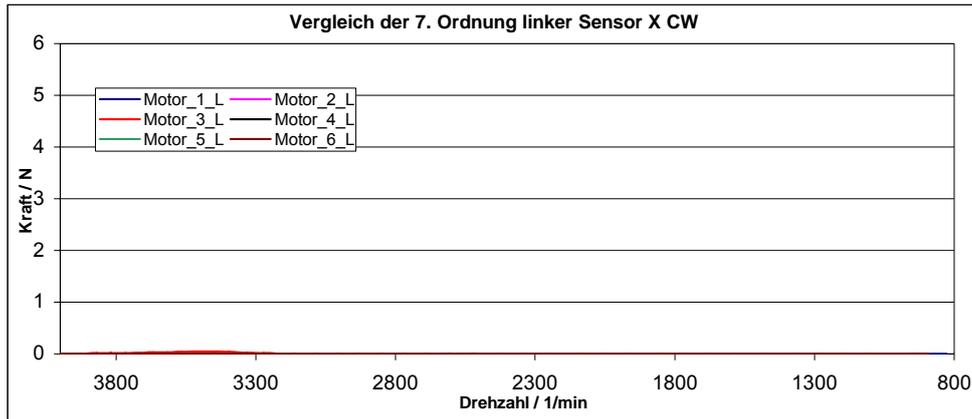


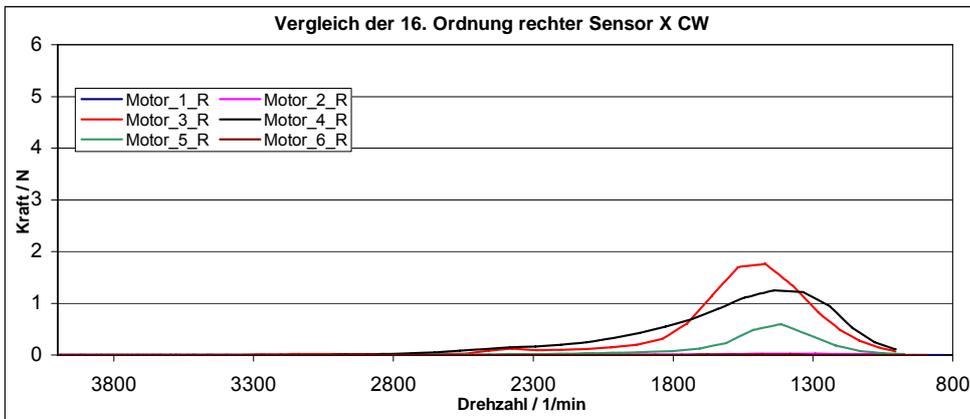
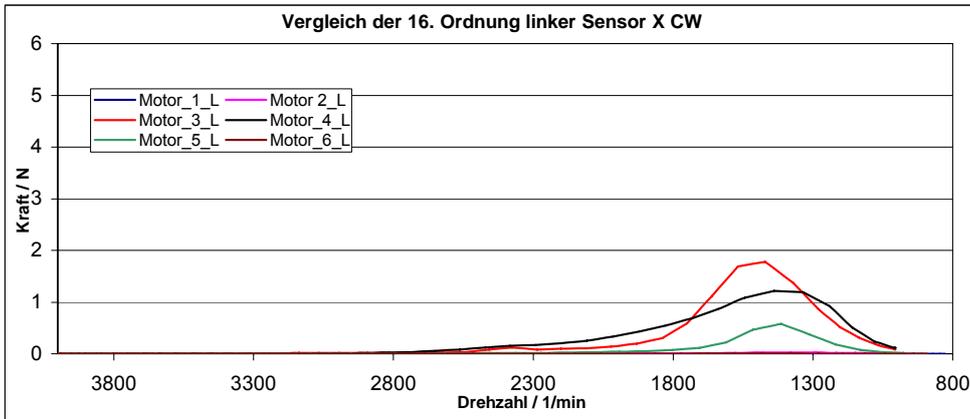
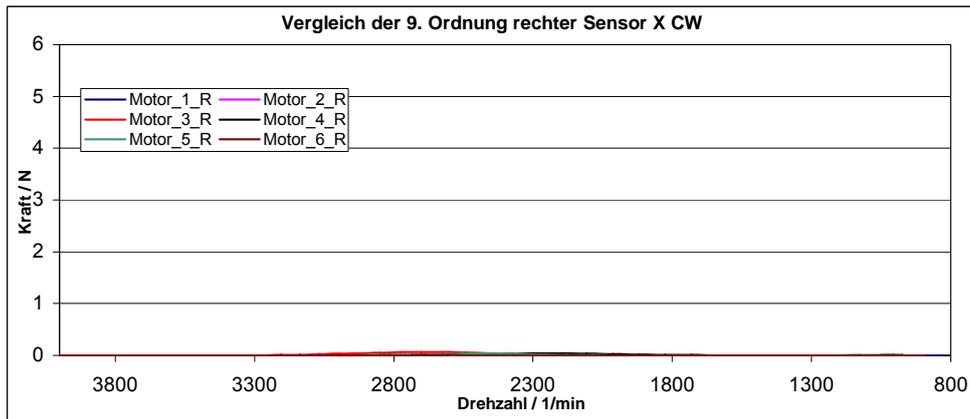
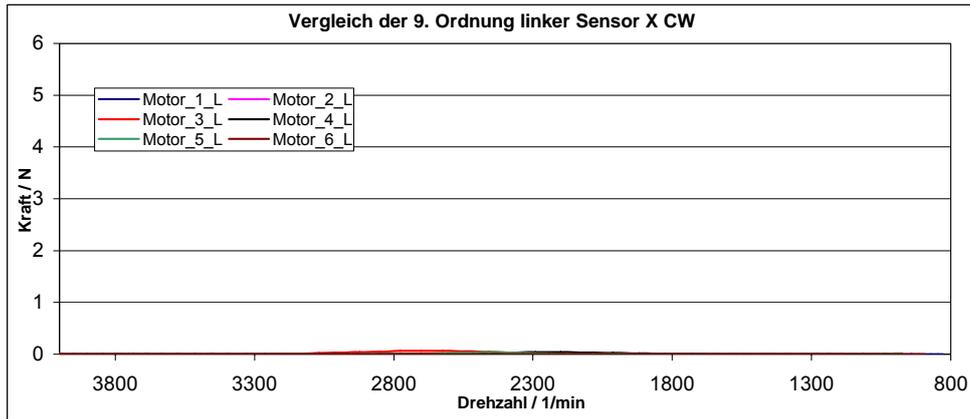
Prüfer : Hübner
Datum : 24.08.05

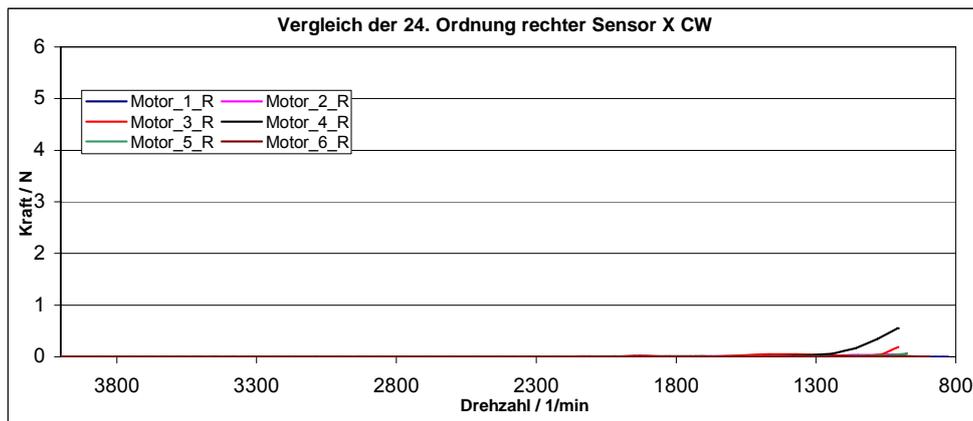
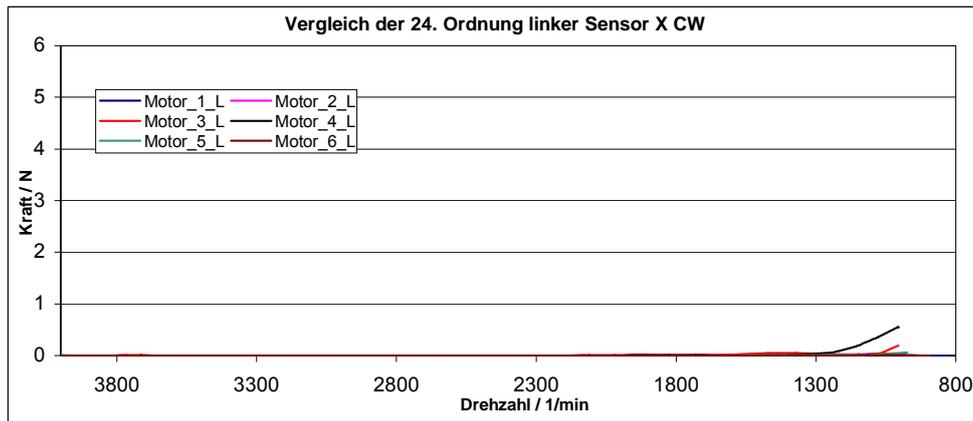
10.4.1.4 Slice

10.4.1.4.1 X-Richtung

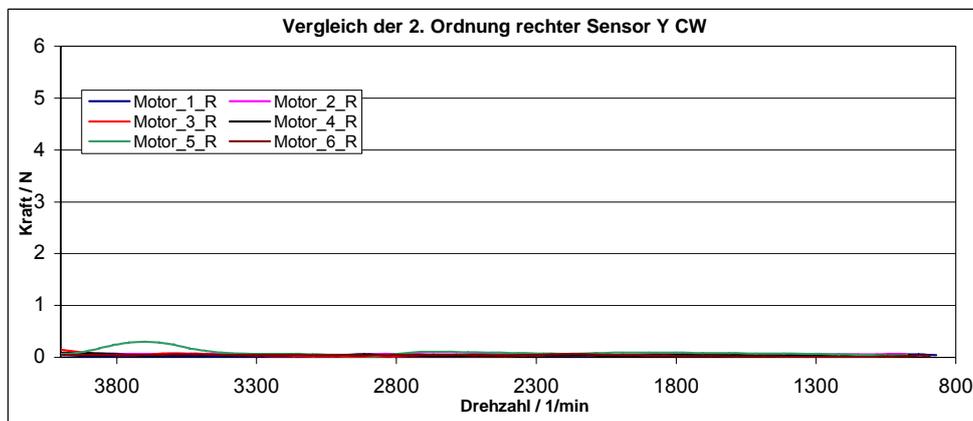
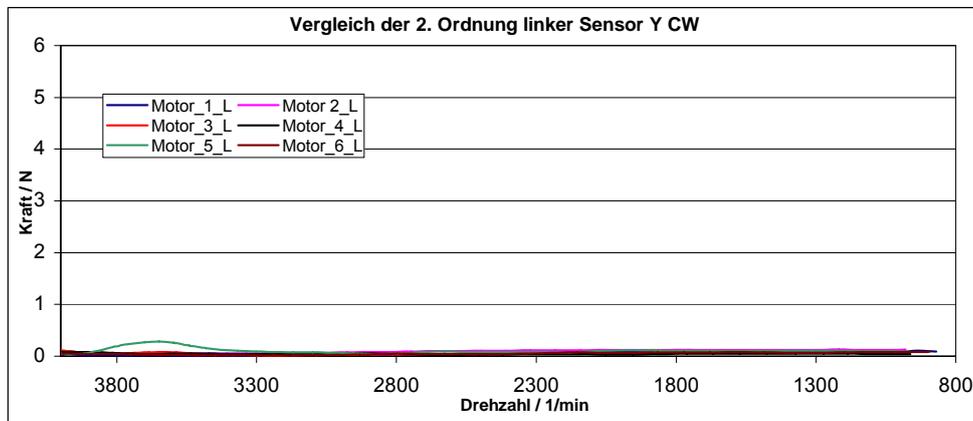
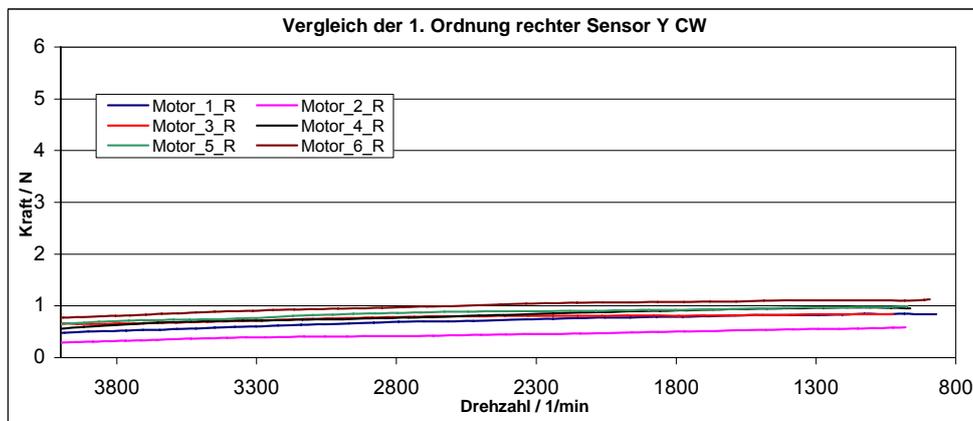
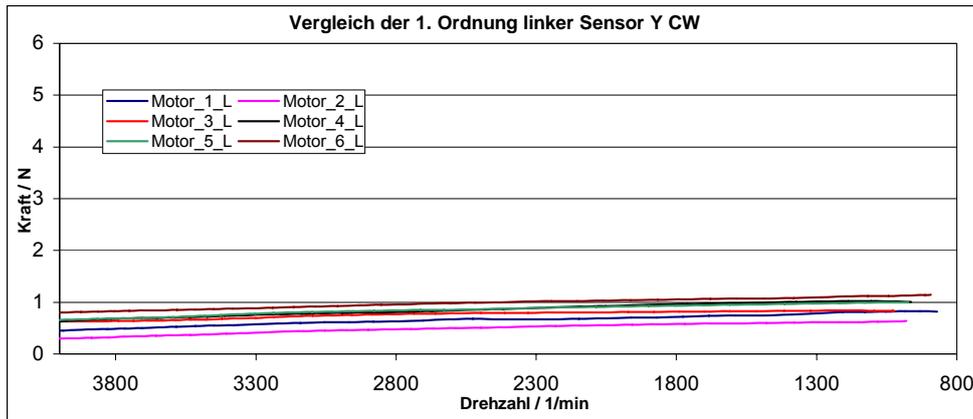


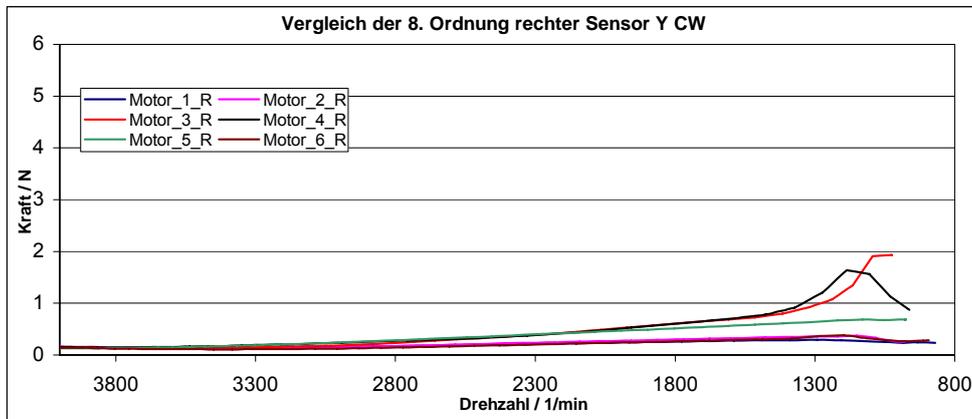
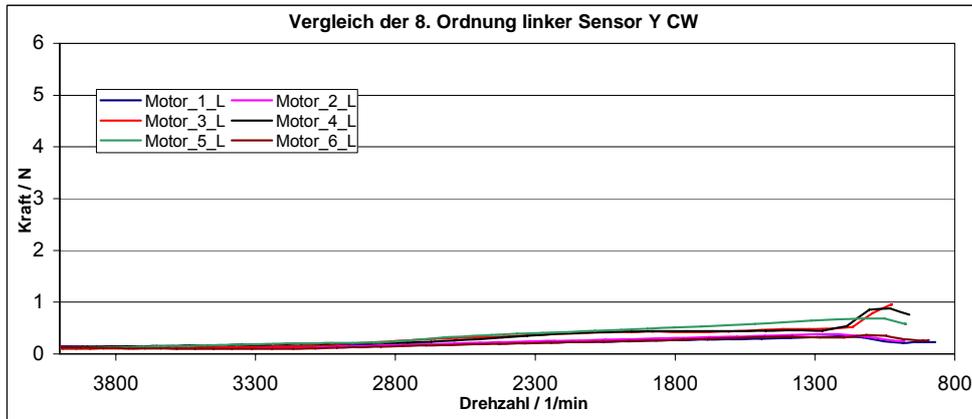
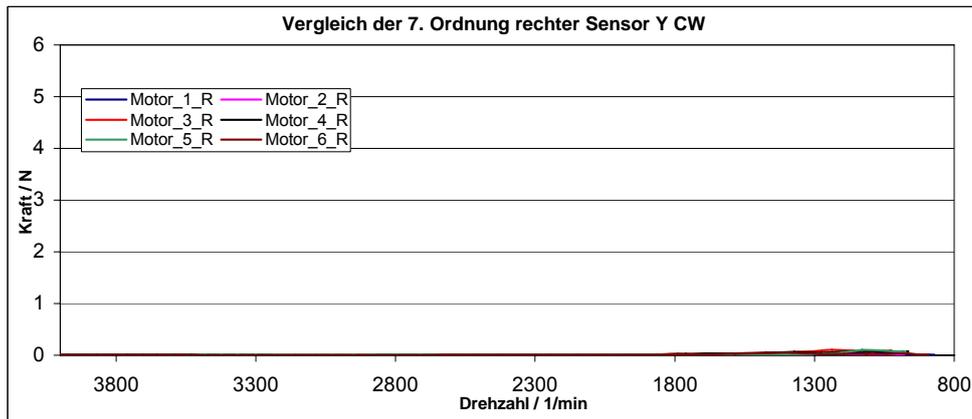
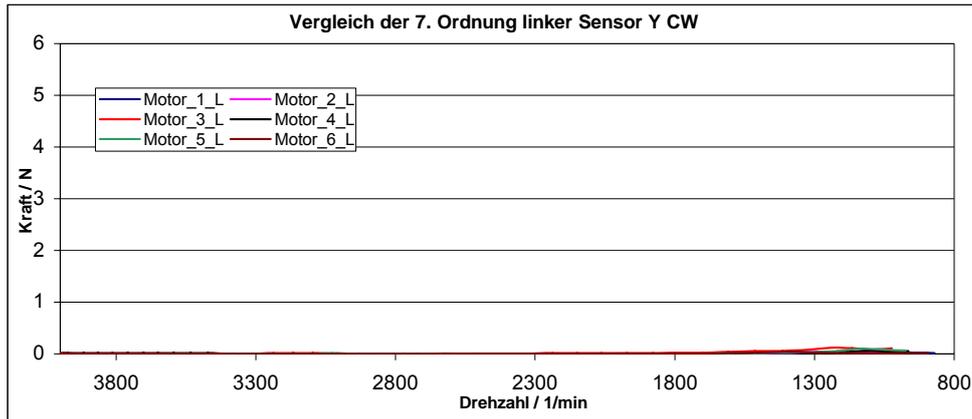


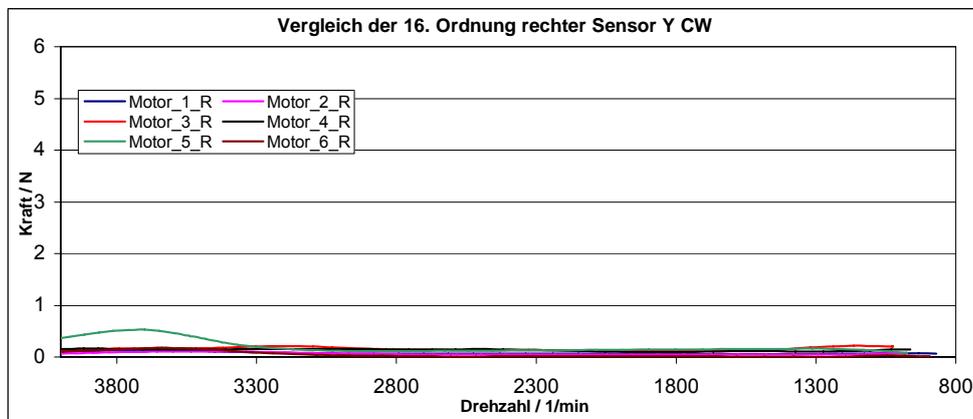
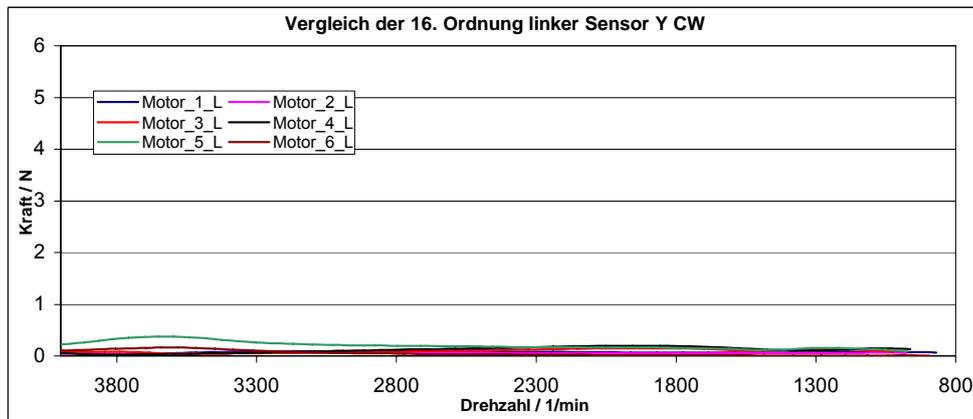
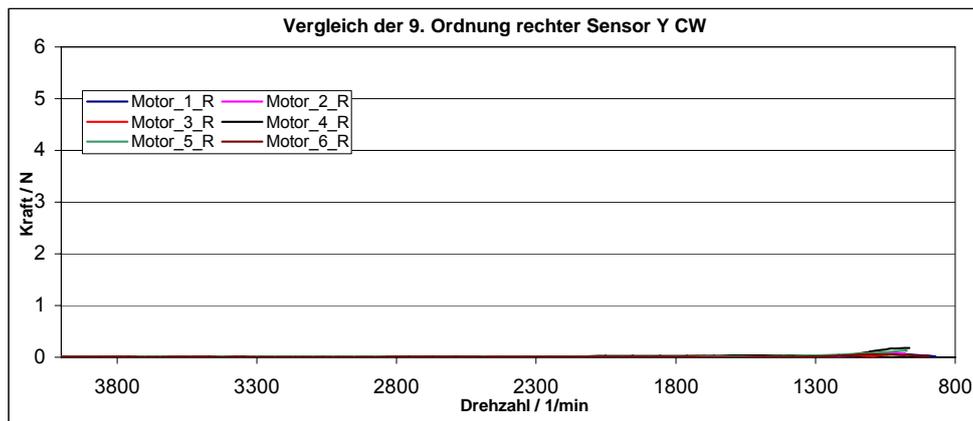
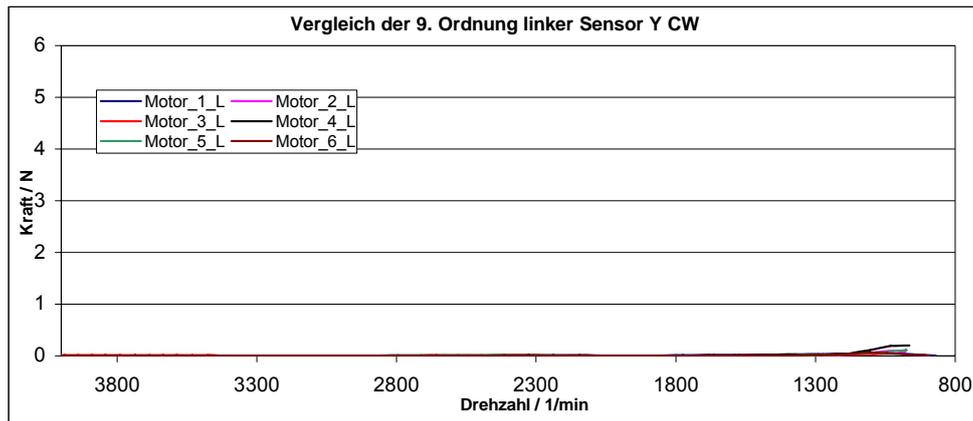


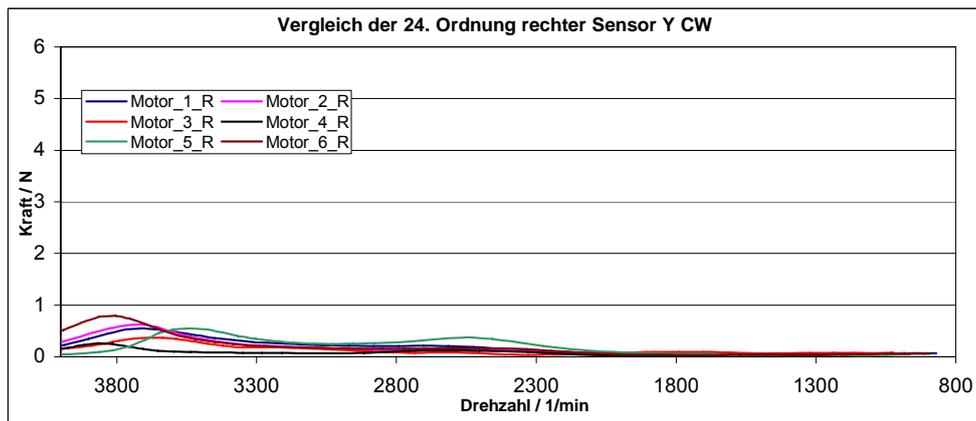
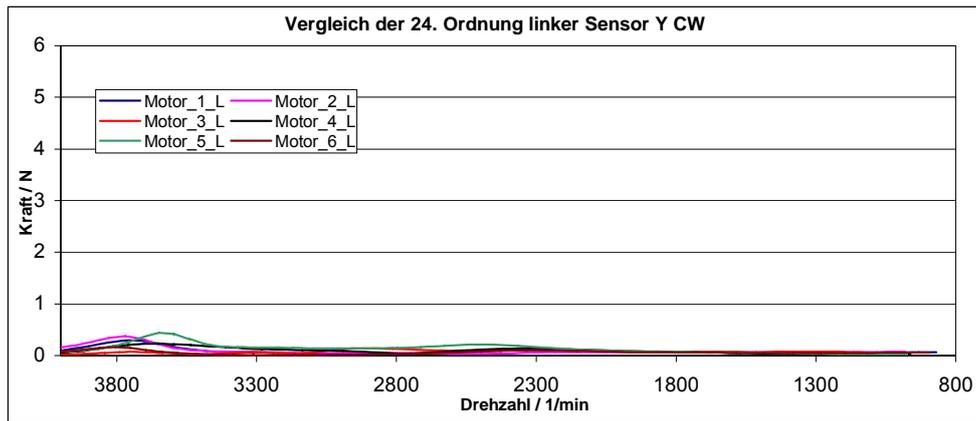


10.4.1.4.2 Y-Richtung









10.4.1.4.3 Z-Richtung

