



## **Bachelorarbeit**

Lauritz Petersen

# **Optimierung einer Prüfstandhalterung für einen Luftfahrt-Sauerstoff-Generator mit anschließender Funktionsanalyse und Gegenüberstellung zum bestehenden Konzept**

**Lauritz Petersen**

**Optimierung einer Prüfstandhalterung  
für einen Luftfahrt-Sauerstoff-Generator  
mit anschließender Funktionsanalyse  
und Gegenüberstellung zum  
bestehenden Konzept**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Bertrandt Ingenieurbüro GmbH  
Cabin 2.3  
Channel 9 Blohmstraße 10  
21079 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Arne Freytag  
Zweitprüfer/in : Dipl.-Des. Andreas Wietzke

Abgabedatum: 12.08.2016

# **Zusammenfassung**

**Lauritz Petersen**

## **Thema der Bachelorthesis**

Optimierung einer Prüfstandhalterung für einen Luftfahrt-Sauerstoff-Generator mit anschließender Funktionsanalyse und Gegenüberstellung zum bestehenden Konzept

## **Stichworte**

Prüfstandhalterung, Luftfahrt-Sauerstoff-Generator

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst die Optimierung einer Prüfstandhalterung für einen Luftfahrt-Sauerstoff-Generator.

Hierzu werden Konzeptideen entwickelt und anschließend ausgearbeitet. Neben der Konstruktion findet auch eine Analyse der neuen Prüfstandhalterung statt. Abschließend soll ein Vergleich zum bestehenden Konzept gezogen werden.

**Lauritz Petersen**

## **Title of the paper**

Optimization of a test fixture for an airplane oxygen generator with a functional analysis afterwards and a comparison to the actual fixture.

## **Keywords**

Generator Test Fixture, Airplane Oxygen Generator

## **Abstract**

The objective of this thesis is to optimize a test fixture for an airplane oxygen generator.

It is necessary to develop new concepts and elaborate these concepts afterwards. Also there will be made an analysis of the new fixture. After completing these examinations there will be a comparison between the current and the new fixture.

# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Symbole .....</b>	<b>10</b>
1.1 Lateinische Symbole .....	10
1.2 Griechische Symbole.....	11
1.3 Abkürzungen .....	11
<b>2 Einleitung.....</b>	<b>12</b>
2.1 Einfluss der Höhe auf den Menschen.....	12
2.2 Technische Maßnahmen .....	12
2.3 Aufbau des Sauerstoffgenerators.....	12
2.4 Aufgabenstellung.....	14
<b>3 Testverfahren .....</b>	<b>14</b>
<b>4 Bisheriges Konzept.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Konzeptentwicklung .....</b>	<b>16</b>
5.1 Anforderungen an die neue Halterung .....	16
5.2 Funktionsanalyse.....	16
5.3 Morphologischer Kasten.....	17
<b>6 Konzeptausarbeitung .....</b>	<b>18</b>
6.1 Konzept 1 .....	18
6.1.1 Beschreibung.....	18
6.1.2 Vor- und Nachteile – Konzept 1 .....	20
6.1.3 Bestimmung der Haltekräfte – Konzept 1 .....	20
6.1.3.1 Minimale Kraft gegen Bewegung .....	20
6.1.3.2 Minimale Kraft gegen Drehen.....	22
6.2 Konzept 2 .....	23
6.2.1 Vor- und Nachteile – Konzept 2.....	24
6.2.2 Bestimmung der Haltekräfte – Konzept 2 .....	24
6.2.2.1 Minimale Kraft gegen Rutschen .....	24
6.3 Konzept 3 .....	27
6.3.1 Vor- und Nachteile – Konzept 3.....	28
6.4 Unterstützende FEM-Analysen.....	28
6.4.1 Vorwort.....	28
6.4.2 Untersuchungen.....	28
6.4.2.1 Eigenfrequenzen der Abstandshülsen .....	29
6.4.2.2 Einfluss der Geometrie der Abstandshülsen auf die Eigenfrequenzen .....	32
6.4.2.3 Gefahr des Kippelns.....	33
6.4.3 Bewertung.....	33
6.5 Konzeptbewertung.....	34
<b>7 Analyse .....</b>	<b>36</b>
7.1 Schwingungsanalyse – FEM .....	36
7.1.1 Vernetzung.....	36
7.1.2 Randbedingungen.....	37
7.1.3 Materialwerte .....	40
7.1.4 Ergebnisse .....	41
7.1.4.1 Konzept 1 .....	41
7.1.4.2 Konzept 2 .....	45
7.2 Statische Analyse – FEM .....	49

7.2.1	Randbedingungen.....	49
7.2.2	Ergebnisse.....	50
7.2.2.1	Konzept 1.....	50
7.2.2.2	Konzept 2.....	55
7.3	Testversuche.....	58
7.3.1	Testbedingungen.....	58
7.3.2	Aufbau.....	59
7.3.3	Response Search.....	61
7.3.3.1	Vorwort.....	61
7.3.3.2	Bisherige Halterung.....	61
7.3.3.3	Konzept 1.....	65
7.3.3.4	Konzept 2.....	69
7.3.3.5	Erkenntnisse – Response Search.....	73
7.3.4	Endurance Test.....	74
7.3.4.1	Vorwort.....	74
7.3.4.2	Bisherige Halterung.....	74
7.3.4.3	Konzept 1.....	77
7.3.4.4	Konzept 2.....	80
7.3.4.5	Erkenntnisse – Endurance Test.....	83
7.3.5	Konstruktive Verbesserungen, Handhabung und Erkenntnisse.....	83
7.3.5.1	Konzept 1.....	83
7.3.5.2	Konzept 2.....	85
<b>8</b>	<b>Abschließende Bewertung und Fazit.....</b>	<b>87</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>88</b>
	<b>Abbildungsquellen.....</b>	<b>89</b>
	<b>Anhang A – Vorherige Versionen.....</b>	<b>92</b>
	<b>Anhang B – Fertigungszeichnungen.....</b>	<b>95</b>
	<b>Anhang C – Digitaler Anhang.....</b>	<b>103</b>
	<b>Anhang D – Handskizzen.....</b>	<b>104</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zündmechanismus - Sauerstoffgenerator .....	13
Abbildung 2: Aufbau Sauerstoffgenerator.....	13
Abbildung 3: Achsendefinition .....	14
Abbildung 4: Bisheriges Konzept.....	15
Abbildung 5: Bisheriges Konzept – Draufsicht.....	15
Abbildung 6: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 1 mit Generatoren.....	18
Abbildung 7: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 1 ohne Generatoren .....	18
Abbildung 8: Generatoranschlag mit Silikonring (links) ohne Silikonring (rechts) .....	19
Abbildung 9: Anschlag Abstandshülsen .....	19
Abbildung 10: Abstandshülsen .....	19
Abbildung 11: Bestimmung der Haltekräfte .....	21
Abbildung 12: Momente am Generator.....	22
Abbildung 13: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 2 mit Generator.....	23
Abbildung 14: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 2 ohne Generator .....	23
Abbildung 15: Silikonringe in Nut.....	24
Abbildung 16: Reale Kraffteinleitung (links) und ideale Kraffteinleitung (rechts).....	25
Abbildung 17: Umrechnung von der Normalkraft auf die eingeleitete Kraft.....	25
Abbildung 18: Sinus-Funktion der eingeleiteten Kraft.....	25
Abbildung 19: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 3 mit Generator.....	27
Abbildung 20: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 3 ohne Generator .....	27
Abbildung 21: Ergebnis der SOL111 in X-Anregung .....	30
Abbildung 22: Ergebnis der SOL111 in Y-Anregung .....	30
Abbildung 23: Anregung nach DO-160.....	31
Abbildung 24: Konzept 1 vernetzt.....	36
Abbildung 25: Zwei RBE2 Spinnen nicht verbunden .....	37
Abbildung 26: Zwei RBE2 Spinnen verbunden.....	37
Abbildung 27: RBE2-Spinne an den Abstandshülsen .....	38
Abbildung 28: RBE2-Verbindung der Generatoren .....	38
Abbildung 29: SPCs der SOL103 .....	39
Abbildung 30: SPCs der SOL111 .....	39
Abbildung 31: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Abstandshülsen in X-Richtung .....	41
Abbildung 32: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Abstandshülsen in Y-Richtung .....	43
Abbildung 33: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Generatoren in X-Richtung.....	44
Abbildung 34: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Generatoren in Y-Richtung.....	44
Abbildung 35: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Generatoren in X-Richtung.....	45
Abbildung 36: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Generatoren in Y-Richtung.....	46
Abbildung 37: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Halterungen in X-Richtung .....	47
Abbildung 38: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Halterungen in Y-Richtung .....	47
Abbildung 39: Konzept 2 – SOL111 Anregung des Gesamtsystems in X-Richtung .....	48
Abbildung 40: Konzept 2 – SOL111 Anregung des Gesamtsystems in Y-Richtung .....	48
Abbildung 41: RBE2 mit Generatoren .....	49
Abbildung 42: RBE2 ohne Generatoren .....	49
Abbildung 43: Verbundene RBE2-Elemente mit angreifender Kraft.....	50
Abbildung 44: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht.....	50

Abbildung 45: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Draufsicht.....	51
Abbildung 46: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen .	52
Abbildung 47: Konzept 1 – statische Belastung in Y-Richtung isometrische Ansicht.....	53
Abbildung 48: Konzept 1 – statische Belastung in Y-Richtung Draufsicht.....	53
Abbildung 49: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen .	54
Abbildung 50: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht.....	55
Abbildung 51: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht.....	55
Abbildung 52: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen .	56
Abbildung 53: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung isometrische Ansicht.....	56
Abbildung 54: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung Draufsicht.....	57
Abbildung 55: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung Ansicht ohne Halterungen .	58
Abbildung 56: Achsdefinition bei Shaker-Tests .....	59
Abbildung 57: Sensorposition Konzept 1 – Vorderseite .....	59
Abbildung 58: Sensorposition Konzept 1 – Rückseite .....	60
Abbildung 59: Einbauposition in X-Richtung – bisherige Halterung .....	61
Abbildung 60: Shaker-Regelung bisherige Halterung – X-Richtung (RS) .....	61
Abbildung 61: Sensoren am Generator bisherige Halterung – X-Richtung (RS).....	62
Abbildung 62: Einbauposition in Y-Richtung – bisherige Halterung .....	62
Abbildung 63: Shaker-Regelung bisherige Halterung – Y-Richtung (RS) .....	63
Abbildung 64: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Y-Richtung (RS).....	63
Abbildung 65: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Z-Richtung (RS).....	64
Abbildung 66: Einbauposition in X-Richtung – Konzept 1 .....	65
Abbildung 67: Shaker-Regelung Konzept 1 – X-Richtung (RS) .....	65
Abbildung 68: Sensoren am Generator Konzept 1 – X-Richtung (RS).....	66
Abbildung 69: Einbauposition in Y-Richtung – Konzept 1 .....	66
Abbildung 70: Shaker-Regelung Konzept 1 – Y-Richtung (RS) .....	67
Abbildung 71: Sensoren am Generator Konzept 1 – Y-Richtung (RS).....	67
Abbildung 72: Sensoren am Generator Konzept 1 – Z-Richtung (RS).....	68
Abbildung 73: Testaufbau mit Sensoren an Abstandshülsen – Konzept 1.....	68
Abbildung 74: Sensoren an Abstandshülsen Konzept 1 – Z-Richtung (RS).....	69
Abbildung 75: Einbauposition in X-Richtung – Konzept 2 .....	69
Abbildung 76: Shaker-Regelung Konzept 2 – X-Richtung (RS) .....	70
Abbildung 77: Sensoren am Generator Konzept 2 – X-Richtung (RS).....	70
Abbildung 78: Einbauposition in Y-Richtung – Konzept 2 .....	71
Abbildung 79: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (RS) .....	71
Abbildung 80: Sensoren am Generator Konzept 2 – Y-Richtung (RS).....	72
Abbildung 81: Shaker-Regelung Konzept 2 – Z-Richtung (RS).....	72
Abbildung 82: Sensoren am Generator Konzept 2 – Z-Richtung (RS).....	73
Abbildung 83: Shaker-Regelung bisherige Halterung – X-Richtung (ET).....	74
Abbildung 84: Sensoren am Generator bisherige Halterung – X-Richtung (ET) .....	75
Abbildung 85: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Y-Richtung (ET) .....	75
Abbildung 86: Shaker-Regelung Konzept 1 – X-Richtung (ET).....	77
Abbildung 87: Sensoren am Generator Konzept 1 – X-Richtung (ET) .....	77
Abbildung 88: Shaker-Regelung Konzept 1 – Y-Richtung (ET).....	78
Abbildung 89: Sensoren am Generator Konzept 1 – Y-Richtung (ET) .....	78
Abbildung 90: Sensoren am Generator Konzept 1 – Z-Richtung (ET) .....	79

Abbildung 91: Shaker-Regelung Konzept 2 – X-Richtung (ET).....	80
Abbildung 92: Sensoren am Generator Konzept 2 – X-Richtung (ET) .....	80
Abbildung 93: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (ET).....	81
Abbildung 94: Sensoren am Generator Konzept 2 – Y-Richtung (ET) .....	81
Abbildung 95: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (ET).....	82
Abbildung 96: Sensoren am Generator Konzept 2 – Z-Richtung (ET) .....	82
Abbildung 97: Silikonringe in der Halterung.....	83
Abbildung 98: Arbeitsraum Konzept 1 .....	84
Abbildung 99: Verschraubung – Konzept 2 .....	85



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste .....	16
Tabelle 2: Funktionsanalyse .....	16
Tabelle 3: Morphologischer Kasten .....	17
Tabelle 4: Eigenschaften Generatoren .....	21
Tabelle 5: Äquivalente Eigenfrequenzen .....	32
Tabelle 6: Vor- und Nachteile – Konzept 1 .....	34
Tabelle 7: Vor- und Nachteile – Konzept 2 .....	34
Tabelle 8: Vor- und Nachteile – Konzept 3 .....	34
Tabelle 9: Nutzwertanalyse .....	35
Tabelle 10: Größe der Tetraederelemente .....	36
Tabelle 11: Materialwerte für FEM-Berechnung .....	40
Tabelle 12: Erfüllte Anforderungen – Konzept 1 .....	85
Tabelle 13: Erfüllte Anforderungen – Konzept 2 .....	86

# 1 Symbole

## 1.1 Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A$	Auflagefläche	$mm^2$
$A_{Airbus}$	Auflagefläche Airbus Generator	$mm^2$
$A_{Boeing}$	Auflagefläche Boeing Generator	$mm^2$
$A_k$	Auflagefläche des Kunststoffringes	$mm^2$
$A_{Sin}$	Fläche unterhalb der Kurve	$mm^2$
$D$	Durchmesser	$mm$
$D_{Airbus}$	Durchmesser Airbus Generator	$mm$
$D_{Boeing}$	Durchmesser Boeing Generator	$mm$
$e$	Eulerzahl	-
$E$	Elastizitätsmodul	$MPa$
$F$	Kraft auf Grund der Beschleunigung	$N$
$F_{Boeing}$	Auftretende Maximalkraft Boeing Generator	$N$
$F_N$	Eingeleitete Kraft	$N$
$F_H$	Haftkraft	$N$
$F_U$	Gewichtskraft in Umfangsrichtung	$N$
$g$	Erdbeschleunigung	$m/s^2$
$H$	Höhe	$m$
$l_{Boeing}$	Länge Boeing Generator	$mm$
$M_{FH}$	Moment auf Grund von Haftkraft	$Nm$
$M_{FU}$	Moment auf Grund von Gewichtskraft	$Nm$
$m$	Masse	$kg$
$m_{Airbus}$	Masse Airbus Generator	$kg$
$m_{Boeing}$	Masse Boeing Generator	$kg$
$N$	Normalkraft	$N$
$N_{Airbus}$	Normalkraft Airbus Generator	$N$
$N_{Boeing}$	Normalkraft Boeing Generator	$N$
$n$	Lastvielfaches	-
$n_{Airbus}$	Lastvielfaches Airbus Generator	-
$n_{Boeing}$	Lastvielfaches Boeing Generator	-
$p_o$	Druck auf Meereshöhe	$hPa$
$p(H)$	Druck in Abhängigkeit der Höhe	$hPa$
$q$	Flächenbelastung	$N/mm^2$
$q_{Airbus}$	Flächenbelastung Airbus Generator	$N/mm^2$
$q_{Boeing}$	Flächenbelastung Boeing Generator	$N/mm^2$
$t$	Wandstärke Generator	$mm$
$t_k$	Breite des Kunststoffringes	$mm$
$V_{Boeing}$	Volumen Boeing Generatoren	$cm^3$

## 1.2 Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\alpha$	Winkel zur Bestimmung der eingeleiteten Kraft	°
$\mu$	Haftreibungskoeffizient	-
$\rho$	Dichte	$g/cm^3$
$\nu$	Querkontraktionszahl	-

## 1.3 Abkürzungen

Abkürzung	Ausschreibung
<i>ATP</i>	Acceptance Test Procedure
<i>CSB</i>	U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board
<i>ET</i>	Endurance Test
<i>FAA</i>	Federal Aviation Administration
<i>FEM</i>	Finite Elemente Methode
<i>QTP</i>	Qualification Test Programme
<i>RBE</i>	Rigid Body Element
<i>RS</i>	Response Search
<i>SOL</i>	Solution
<i>SOL101</i>	Linear Static
<i>SOL103</i>	Modalanalyse
<i>SOL111</i>	Modal Frequency Response
<i>SPC</i>	Single Point Constraint
<i>TUC</i>	Time of Useful Consciousness

## 2 Einleitung

### 2.1 Einfluss der Höhe auf den Menschen

Heutige Verkehrsflugzeuge fliegen in einer für den Menschen lebensfeindlichen Umgebung. Mit zunehmender Höhe nehmen der Luftdruck und damit auch der Sauerstoffgehalt immer weiter ab. Bereits ab einer Höhe von 12000ft (3600m) treten erste Erscheinungen der Höhenkrankheit auf. Entscheidend ist die *Time of Useful Consciousness (TUC)*. Nach einem plötzlichen Druckabfall beschreibt die TUC, wie lange der Mensch noch voll handlungsfähig ist. Bei einem Druckabfall auf einer typischen Reiseflughöhe von 38000ft (12000m) beträgt die Time of Useful Consciousness 7-10 Sekunden. Kurz danach setzt die Bewusstlosigkeit ein. Aus diesem Grund müssen in einem Flugzeug technische Maßnahmen getroffen werden, um ein Überleben in Reiseflughöhe zu garantieren. Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel lässt sich vereinfacht der Luftdruck in Reiseflughöhe bestimmen. Die typische Reiseflughöhe liegt bei 38000ft (12000m).

$$p(H) = p_0 * e^{\left(\frac{-H}{7990m}\right)} = 1013,25 * e^{\left(\frac{-12000m}{7990m}\right)} = 225,7hPa \quad (1)$$

Dies entspricht rund 22% des Druckes auf Meereshöhe. Der prozentuale Sauerstoffgehalt in Reiseflughöhe ist zwar gleich dem in Meereshöhe, aber in 38000ft Höhe stehen nur noch rund ein Fünftel der Sauerstoffmoleküle gegenüber Meereshöhe zur Verfügung.

### 2.2 Technische Maßnahmen

Moderne Verkehrsflugzeuge verfügen über eine Druckkabine. Innerhalb der Kabine herrscht ein Druck der einer Höhe von 6000 bis 8000ft (1380-2440m) entspricht. Man spricht daher auch von Kabinenhöhe.

Sollte der Druck innerhalb der Kabine während des Fluges rapide abfallen, so fallen Sauerstoffmasken über den Sitzen heraus. Die Piloten würden umgehend den Sinkflug einleiten auf eine Höhe, die für den Menschen unbedenklich ist. Die Sauerstoffmasken versorgen die Passagiere nur für die Zeit des Sinkfluges mit Sauerstoff.

### 2.3 Aufbau des Sauerstoffgenerators

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Sauerstoffgeneratoren für Passagiere. Zunächst wird der grundsätzliche Aufbau eines solchen Generators erläutert. Diese decken unterschiedliche Zeitspannen ab und können auch mehrere Personen versorgen, der grundsätzliche Aufbau ist aber immer gleich.

Im Falle eines Druckabfalles im Flugzeug öffnet sich oberhalb der Passiersitze ein Container, in welchem der Sauerstoffgenerator fixiert ist und die Sauerstoffmasken verstaut sind. Durch Ziehen an einer der Masken wird ein Sicherungssplint (*Release Pin*) am Generator herausgezogen.

Dadurch schlägt ein federgelagertes Zündhütchen (*Firing Pin*) auf eine Zündladung (*Percussion Cap*), die dann den Generatorkern zündet. Dieses Prinzip ähnelt einer Pistolenpatrone.

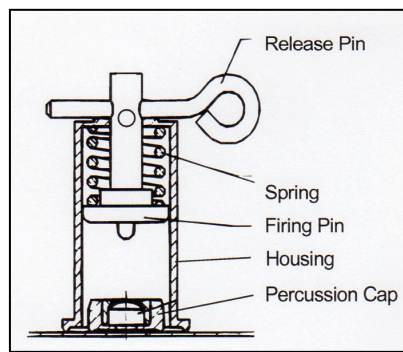


Abbildung 1: Zündmechanismus - Sauerstoffgenerator

Der Kern (*Chlorate Core*) besteht aus Natriumchlorat ( $\text{NaClO}_3$ ). Durch Hitze wird es in Sauerstoff und Salz aufgetrennt. Aufgrund der Verbrennung baut sich innerhalb des Generators Druck auf. Am unteren Ende befindet sich eine dünne Membran, welche über einem Dorn positioniert ist. Durch den ansteigenden Druck im Inneren wird die Membran auf den Dorn gedrückt, bis sie reißt. Dadurch kann der Sauerstoff über Schläuche an die Masken geleitet werden.

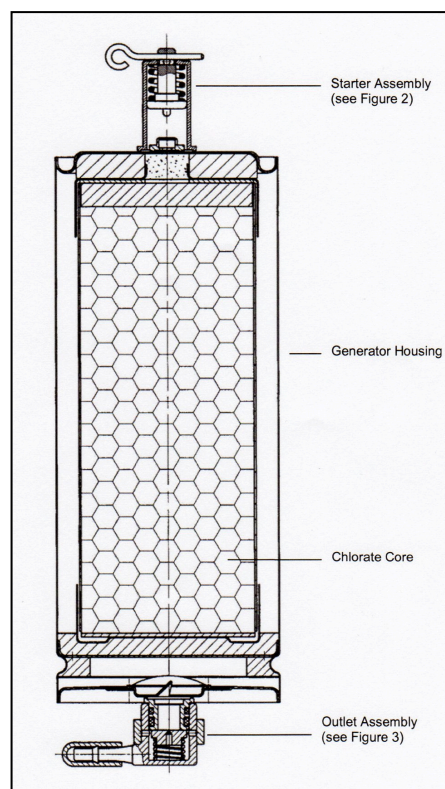


Abbildung 2: Aufbau Sauerstoffgenerator

Je nach Flughöhe wird nicht der gleiche Sauerstoffbedarf benötigt, deshalb ist der Kern unterteilt. Auf Reiseflughöhe muss kurz nach dem Druckabfall sehr viel Sauerstoff produziert werden, da der Umgebungssauerstoff sehr gering ist. Die Piloten leiten nach dem Druckabfall sofort einen Sinkflug ein. Mit sinkender Höhe nimmt der Umgebungssauerstoffgehalt immer weiter zu. Daher muss der Generator im weiteren Verlauf weniger Sauerstoff produzieren als am Anfang. Es gibt eine gesetzliche Flow-Kurve, die der Generator überschreiten muss. Ein Unterschreiten ist zulässig, hängt aber stark von der Dauer, der Intensität und dem Bereich ab. Zum Beispiel ist ein Unterschreiten am Ende der Flow-Kurve eher unkritisch. Das Flugzeug befindet sich dann schon auf einer Flughöhe, bei der auch ohne zusätzlichen Sauerstoff geatmet werden kann. Ein Unterschreiten am Anfang der Flow-Kurve hingegen ist sehr kritisch. Gerade hier muss der Generator viel Sauerstoff produzieren aufgrund des niedrigen Umgebungssauerstoffs.

## 2.4 Aufgabenstellung

Um die Tauglichkeit der Generatoren zu gewährleisten, muss ein definierter Teil aus jeder Produktionscharge bestimmte Tests bestehen. Unter anderem werden mit Hilfe eines Shakers die Vibrationen simuliert, die während eines Flugzeuglebens auftreten. Hierfür muss der Generator auf den Shaker montiert werden. Die bisherige Halterung wird den Ansprüchen nicht gerecht und soll im Rahmen dieser Arbeit verbessert beziehungsweise neu entwickelt und getestet werden.

## 3 Testverfahren

Grundsätzlich lassen sich zwei Testbedingungen unterscheiden:

*Endurance Test:* Der Generator wird den Testbedingungen unterzogen und anschließend gezündet. Während des Abbrennens wird die Menge des Sauerstoffes gemessen und mit dem Soll verglichen.

*Operational Vibration:* Der Generator wird den Testbedingungen unterzogen, aber noch während des Tests auf dem Shaker gezündet. Auch hier wird die Menge des Sauerstoffes gemessen und mit Soll verglichen.

Der Generator wird je fünf Stunden pro Achse geschakt. Die dabei verwendeten Frequenzen entsprechen einem zufälligen Rauschen bis 2000 Hz (in der Regel das Frequenzprofil DO-160F). Außerdem wird ein sinusförmiges Frequenzprofil zwischen 0 und 30Hz verwendet. Abbildung 3 zeigt, wie die Achsen am Generator definiert sind.

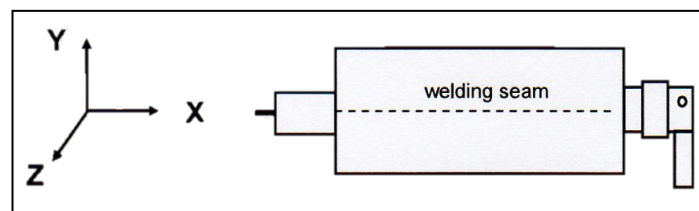


Abbildung 3: Achsdefinition

Darüber hinaus gibt es noch weitere Tests, unter anderem Klima- und Shock-Tests, die aber für diese Aufgabe nicht relevant sind.

## 4 Bisheriges Konzept

Das bisherige Konzept besteht aus einer getrennten Form. Sie verfügt über je drei Schrauben pro Halterung. Es werden dieselben Schrauben verwendet, um die Klemmkraft zum Halten des Generators aufzubringen und um die Halterung am Shaker zu montieren.

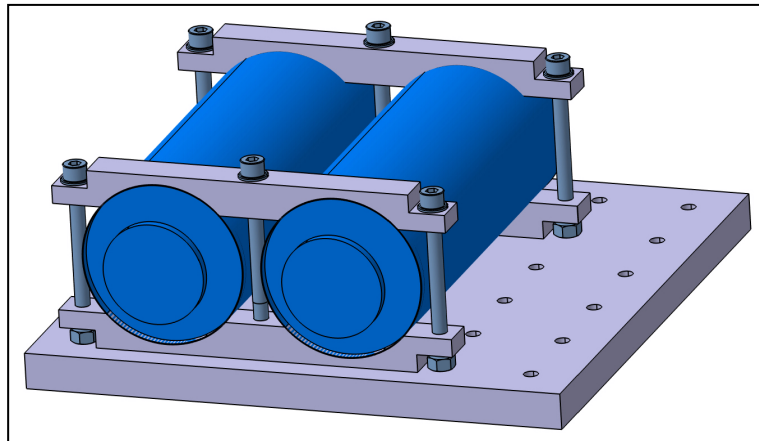


Abbildung 4: Bisheriges Konzept

Die Halterung hat mehrere Probleme: Das Anzugsmoment, das benötigt wird, um die Halterung am Shaker zu fixieren, ist höher als das erforderliche Anzugsmoment für das Halten der Generatoren. Hierdurch kann der Generator schnell beschädigt werden, da keine unterschiedlichen Momente aufgebracht werden können.

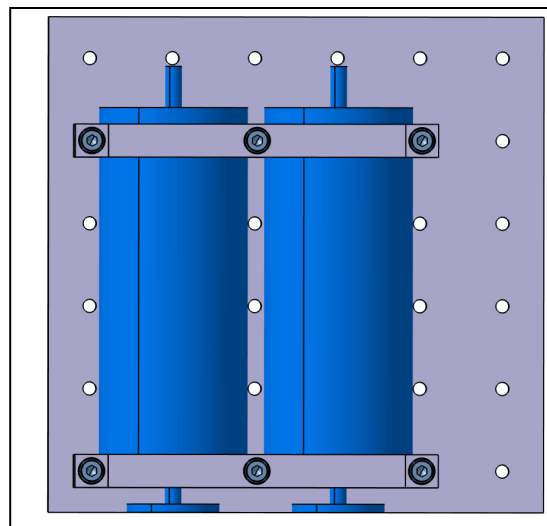


Abbildung 5: Bisheriges Konzept – Draufsicht

Des Weiteren ist die Halterung an das Lochbild der Generatorplatte gebunden (Abbildung 5). Dadurch lässt sich die Halterung nicht beliebig am Generator positionieren. Je nach Generatorlänge kann dies dazu führen, dass der Generator an einer Stelle eingespannt werden muss, die nicht stabil genug ist. Das erhöht das Risiko einer Beschädigung. Auch die Handhabung der Halterung ist nicht optimal. Ein Umspannen auf eine andere Anregungsachse des Shakers dauert lange. Beim Operational Vibration Test kommt es zudem zu einer starken Wärmebeeinflussung der Generatoren untereinander, da ihr Abstand sehr gering ist.

## 5 Konzeptentwicklung

### 5.1 Anforderungen an die neue Halterung

Die Anforderungen an die neue Halterung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Nr.	Anforderung	Beschreibung	Werte	Kategorie	Forderung
1	Geometrie	Halterung für zwei baugleiche Generatoren		Should	B/E Aerospace
2	Geometrie	Kraftschlüssige Verbindung		Should	B/E Aerospace
3	Geometrie	Wärmeabfuhr ohne Beeinträchtigung zwischen Generatoren		Should	B/E Aerospace
4	Geometrie	Kein scharfer Übergang (Generator / Halterung)		Should	B/E Aerospace
5	Geometrie	Anschlüsse am Generator müssen zugänglich sein		Shall	B/E Aerospace
6	Geometrie	Getrennte Verschraubung (Shaker / Generator)		May	Bertrandt
7	Ergonomie	Einfache Handhabung		Should	B/E Aerospace
8	Ergonomie	Kein Drehmomentschlüssel		May	B/E Aerospace
9	Ergonomie	Kurze Umrüstzeiten		Should	B/E Aerospace
10	Ergonomie	Für unterschiedliche Generatorlängen		May	B/E Aerospace
11	Technisch	Geringes Gewicht		Should	B/E Aerospace
12	Technisch	Fertigungstoleranzen ausgleichen		Should	B/E Aerospace
13	Technisch	Konzept anwendbar auf unterschiedliche Durchmesser		Should	B/E Aerospace
14	Technisch	Halterung aus hitzebeständigen Material		Shall	Bertrandt
15	Technisch	Generatoren müssen nach Prüfung voll funktionsfähig sein		Shall	ATP
16	Technisch	Crash Shocks ohne Lockerung	6g / 20ms	Shall	ATP
17	Technisch	Rauschen in alle Raumachsen (X-Y-Z) ohne Lockerung	300min je Achse	Shall	ATP
18	Technisch	Sinusförmige Vibration (X-Y-Z) ohne Lockerung	24min je Achse	Shall	ATP
19	Technisch	Auslösevorrichtung für Zeiterfassung		Should	B/E Aerospace
20	Technisch	Keine sichtbare Verformung/Beschädigung des Generators		Shall	ATP
21	Technisch	Funktionsfähig im zu prüfenden Frequenzbereich		Shall	QTP
22	Technisch	Die Halterung darf das Flussprofil nicht beeinflussen		Shall	B/E Aerospace
23	Technisch	Konzept muss mit Zulassung konform sein		Shall	B/E Aerospace
24	Fertigung	Kostengünstig Herstellung		Should	Bertrandt
25	Fertigung	Leicht herstellbar		Should	Bertrandt

Tabelle 1: Anforderungsliste

### 5.2 Funktionsanalyse

Nachdem die Anforderungen an die neue Halterung definiert sind, werden die von ihr zu erfüllenden Funktionen analysiert. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Nr.	Hauptfunktion	Nr.	Teilfunktion
F1	Generator fixieren	F1.1	Generator in X-Richtung fixieren
		F1.2	Generator in Y-Richtung fixieren
		F1.3	Generator in Z-Richtung fixieren
F2	Reproduzierbare Messergebnisse	F2.1	Reproduzierbare Messergebnisse liefern
F3	Frequenzen übertragen	F3.1	Frequenzen vom Shaker auf den Generator übertragen
F4	Fertigungstoleranzen ausgleichen	F4.1	Fertigungstoleranzen des Generators ausgleichen
		F4.2	Fertigungstoleranzen der Halterung ausgleichen
F5	Anschlüsse zugänglich	F5.1	Anschlüsse der Sauerstoffmasken müssen zugänglich sein
		F5.2	Auslöse-Splint muss zugänglich sein
F6	Wärmeabfuhr begünstigen	F6.1	Wärmeabfuhr zwischen Generatoren begünstigen
		F6.2	Wärmeabfuhr zwischen Halterung und Generatoren begünstigen
F7	Zeit einsparen	F7.1	Schnelles und sicheres Einspannen des Generators
		F7.2	Schnelles Umspannen auf eine andere Achse

Tabelle 2: Funktionsanalyse



### 5.3 Morphologischer Kasten

Mit Hilfe eines Morphologischen Kastens lassen sich nun einzelne Teilfunktionen definieren. Für jede Teilfunktion werden mehrere Teillösungen erarbeitet. Dies geschieht unvoreingenommen. Mit Hilfe der Teillösungen können nun einzelne Konzepte erstellt werden.

Teilfunktion	Teillösung 1	Konzept 1			Konzept 2			Konzept 3			Konzept 4					
		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3			
Verschraubung (Shaker/Generator)	Getrennt	■	■	■	Gemeinsam				Kein				Kombiniert			
Form	Geschlossen	■			Geteilt		■		Offen			■				
Richtung der Haltekraft	Längsrichtung	■			Umfangsrichtung		■	■								
Ausgleich von Fertigungstoleranzen	Kunststoffring	■			Magnet				Schelle				Klemmen			■
Flexible Montage am Shaker	Langlöcher	■			mehrere Löcher				Schiene				Spindel			
Klemmkraft durch	Schrauben	■			Exzenterhebel				Federn				Formschluss			
Befestigung am Shaker	Schrauben	■			Exzenterhebel				Magnet				Klemmen			
Zudrücken verhindern	Abstandshülsen	■			Formschluss		■	■	Anschlag							
Lockerung aus Halterung verhindern	Reibung		■		Sicke+O-Ring				Magnet				Geometrie		■	■

Tabelle 3: Morphologischer Kasten

## 6 Konzeptausarbeitung

Mit Hilfe der vorangegangenen Untersuchungen ist es nun möglich, Konzepte auszuarbeiten.

### 6.1 Konzept 1

#### 6.1.1 Beschreibung

Das Konzept 1 basiert auf der Idee, den Generator nicht am Umfang zu fixieren, sondern in der Längsrichtung (X-Achse) zu klemmen. In dieser Belastungsrichtung ist der Generator deutlich stabiler und die Gefahr einer Beschädigung beim Klemmen geringer.

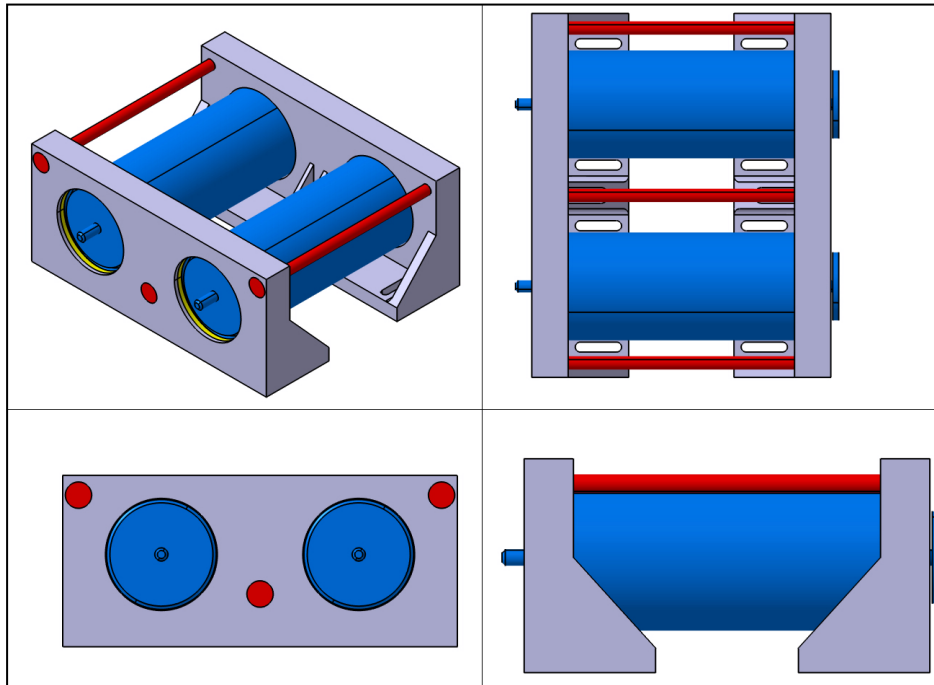


Abbildung 6: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 1 mit Generatoren

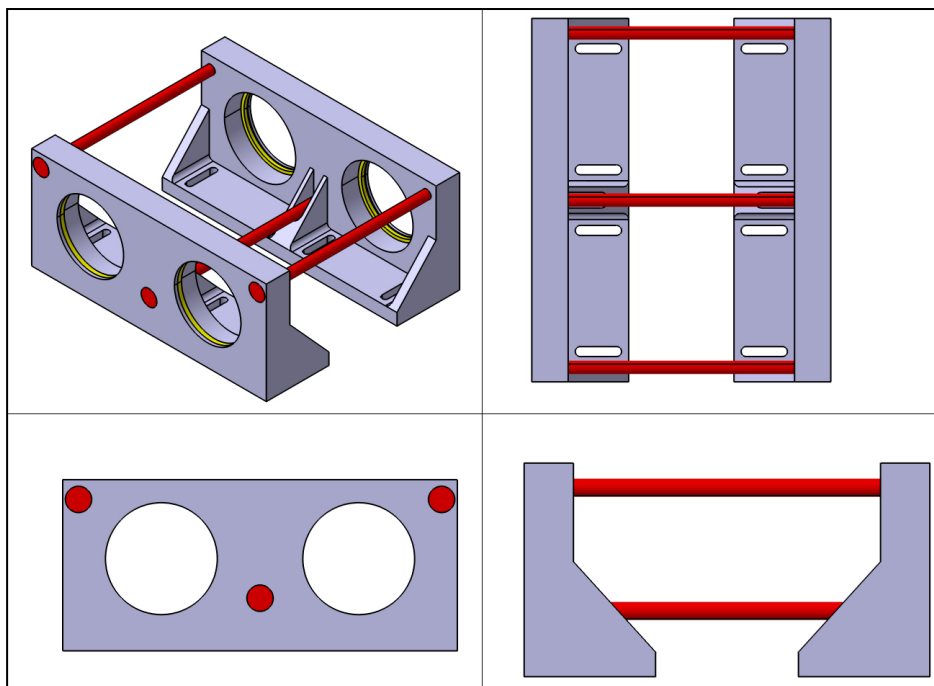


Abbildung 7: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 1 ohne Generatoren

Um den Generator zu klemmen, besitzt die Halterung einen Anschlag. Um Fertigungstoleranzen auszugleichen, sitzt auf dem Anschlag ein Silikonring.

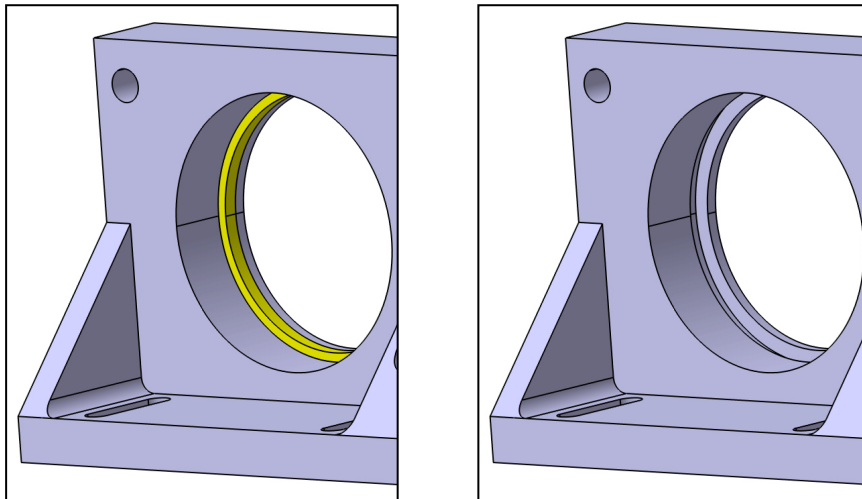


Abbildung 8: Generatoranschlag mit Silikonring (links) ohne Silikonring (rechts)

Durch die Abstandshülsen (Abbildung 6 Rot) ist es möglich, die Generatoren zwischen den beiden Halterungen zu klemmen. Die Abstandshülsen limitieren durch ihre Länge aber auch den Weg und damit die Klemmkraft. Auch für die Abstandshülsen gibt es einen Anschlag. Dies reduziert ebenfalls die Gefahr einer Beschädigung. Der Anschlag für die Abstandshülsen ist in Abbildung 9 zu sehen.

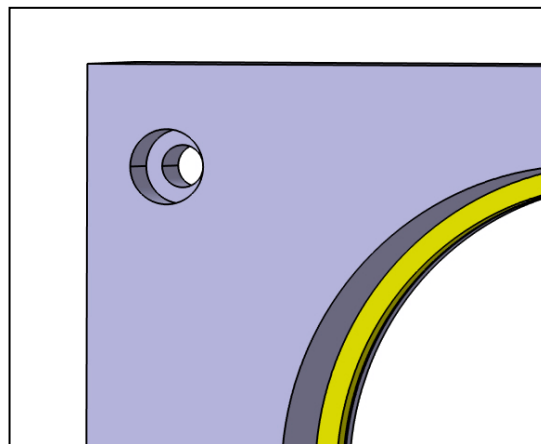


Abbildung 9: Anschlag Abstandshülsen

Aufgrund der Langlöcher kann die Halterung unabhängiger vom Lochbild der Grundplatte positioniert werden. Dies ist wichtig, da es Generatoren gibt, die zwar einen identischen Durchmesser, aber eine unterschiedliche Länge haben.

Die Abstandshülsen besitzen auf einer Seite ein Innengewinde, um die Halterungen miteinander zu verschrauben. Die andere Seite besitzt einen breiten Kopf.

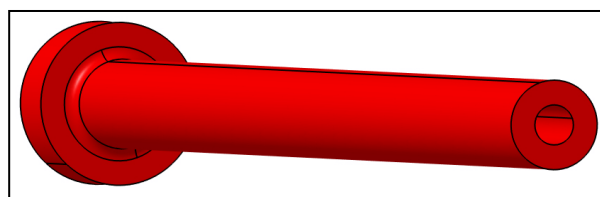


Abbildung 10: Abstandshülsen

### 6.1.2 Vor- und Nachteile – Konzept 1

Durch die Abstandshülsen bleibt die Klemmkraft zum Halten der Generatoren auch bestehen, wenn die Halterung vom Shaker entfernt wird. Umrüsten auf eine andere Achse geht daher schnell, da lediglich die Schrauben zur Fixierung am Shaker gelöst werden müssen. In der Halterung sind zudem Anschläge für die Abstandshülsen eingearbeitet. Die Klemmlänge wird limitiert und damit auch die maximale Klemmkraft. Das Risiko, den Generator zu beschädigen, wird so verringert.

Die Langlöcher machen die Befestigung unabhängiger vom vorgegebenen Lochbild. Dies ist bei unterschiedlichen Generatorlängen wichtig. Die Silikonringe gleichen die Fertigungstoleranzen sowohl der Generatoren, aber auch der Halterung selbst aus.

Gegenüber dem bestehenden Konzept weisen die Generatoren untereinander einen größeren Abstand auf. Beim Operational Vibration Test wird dadurch die gegenseitige Wärmebeeinflussung der Generatoren reduziert. Da der Generator nur auf einem schmalen Rand in der Halterung aufliegt, ist weiterhin gewährleistet, dass die Anschlüsse des Generators zugänglich sind.

Schließlich ist die getrennte Verschraubung der Halterung am Shaker und der Klemmung der Generatoren ein Vorteil. Die jeweils benötigten Drehmomente können damit aufgebracht werden.

Das Konzept hat allerdings zwei Nachteile. Die Fertigung ist relativ aufwendig und damit teurer. Allerdings ist dieser Punkt nicht so gravierend, weil nur eine sehr geringe Stückzahl gefertigt wird. Der zweite Nachteil ist, dass für jede Generatorlänge unterschiedlich lange Abstandshülsen benötigt werden. Da sich die Abstandshülsen nur in der Länge unterscheiden, sind sie aber bei unterschiedlichem Generatordurchmesser verwendbar, solange die Generatorlänge identisch ist.

### 6.1.3 Bestimmung der Haltekräfte – Konzept 1

Beim ersten Konzept ergeben sich zwei mögliche Fälle, die untersucht werden müssen:

- Kann sich der Generator in der Halterung bewegen? (Y- und Z-Richtung)
- Kann sich der Generator in der Halterung drehen?

Für beide Fälle muss die Klemmkraft ermittelt werden, ab welcher die beiden genannten Umstände nicht mehr auftreten können. Die Berechnung der Haltekräfte dient der Beurteilung, ob das Konzept realisierbar ist.

#### 6.1.3.1 Minimale Kraft gegen Bewegung

Beim ersten Konzept wird der Generator nur durch die Reibung am Generatorrand daran gehindert, sich zu bewegen. Die Halterung umschließt den Generator zwar, hält ihn aber nur an der Stirnseite und nicht am Mantel. Die Bohrung in der Halterung ist größer als der Generatordurchmesser. Hier würde die Möglichkeit bestehen, dass sich der Generator bei zu geringer Reibkraft bewegt.

Es werden für zwei Generatortypen die benötigten Reibkräfte bestimmt. Es handelt sich dabei um den leichtesten und den schwersten Generator. Die Beschleunigungen entsprechen dabei den Peak-Werten, die während des Testens auftreten. Für den Haftreibungskoeffizienten  $\mu$  wird der Wert 0,2 angenommen. Dies entspricht dem Koeffizienten von Stahl auf Stahl. Das ist ein deutlich schlechterer Wert, da bei der Halterung die Auflage Silikon auf Aluminium besteht. Die Rechnung ist also optimistisch ausgelegt.

Bezeichnung	Hersteller	Durchmesser	Wandstärke	Masse	Beschleunigung
E72284	Boeing	88,9	0,3	1,39	18,3
E67521	Airbus	60,4	0,3	0,487	12,36

Tabelle 4: Eigenschaften Generatoren

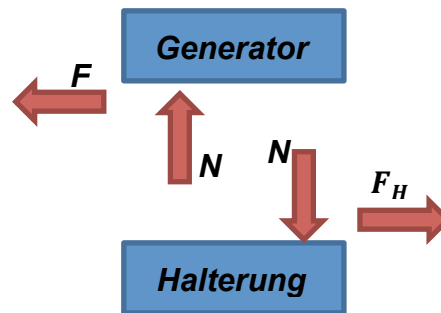


Abbildung 11: Bestimmung der Haltekräfte

**Bestimmung der Normalkraft:**

Bedingung damit Generator sich nicht löst  $F \leq F_H$

$$F = F_H \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} F = m * g * n \\ F_H = N * \mu \end{array} \right\} \rightarrow N * \mu = m * g * n \rightarrow N = \frac{m * g * n}{\mu} \quad (3)$$

E72284:

$$N_{Boeing} = \frac{m_{Boeing} * g * n_{Boeing}}{\mu} = \frac{1,39 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 18,3}{0,2} = 1247,68 \text{ N} \sim 1250 \text{ N}$$

E67521:

$$N_{Airbus} = \frac{m_{Airbus} * g * n_{Airbus}}{\mu} = \frac{0,487 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 12,36}{0,2} = 295,25 \text{ N} \sim 300 \text{ N}$$

**Berechnung der Auflagefläche:**

$$A = (\pi * D * t) \quad (4)$$

E72284:

$$A_{Boeing} = (\pi * D_{Boeing} * t) = (\pi * 88,9 \text{ mm} * 0,3 \text{ mm}) = 83,79 \text{ mm}^2 \sim 85 \text{ mm}^2$$

E72284:

$$A_{Airbus} = (\pi * D_{Airbus} * t) = (\pi * 60,4 \text{ mm} * 0,3 \text{ mm}) = 56,93 \text{ mm}^2 \sim 57,5 \text{ mm}^2$$

Die Halterung muss folgende Flächenbelastung  $q$  auf den Generatorrand ausüben:

$$q = \frac{N}{2 * A} \quad (5)$$

E72284:

$$q_{Boeing} = \frac{N_{Boeing}}{2 * A_{Boeing}} = \frac{1250 \text{ N}}{2 * 85 \text{ mm}^2} = 7,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

E67521:

$$q_{Airbus} = \frac{N_{Airbus}}{2 * A_{Airbus}} = \frac{300 \text{ N}}{2 * 57,5 \text{ mm}^2} = 2,61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

### 6.1.3.2 Minimale Kraft gegen Drehen

Nun wird untersucht, ob die Gefahr besteht, dass der Generator sich in der Halterung dreht. Hierfür wird angenommen, dass die gesamte Gewichtskraft des Generators am Generatormantel angreifen würde. Dies sind die Maximalkräfte, die theoretisch auftreten können, in der Realität aber nicht möglich sind. Die erforderliche Haftkraft fällt tatsächlich niedriger aus.

Die Gewichtskraft  $F_U$  setzt sich wie folgt zusammen:

$$F_U = m * g * n \quad (6)$$

Diese Kraft ruft mit dem Hebelarm des halben Durchmessers das Moment  $M_{F_U}$  hervor.

$$M_{F_U} = F_U * \frac{1}{2} D \quad (7)$$

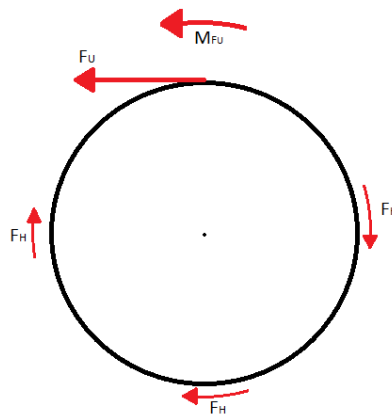


Abbildung 12: Momente am Generator

Die Haftkraft ( $F_H$ ) wirkt dem Moment  $M_{F_U}$  entlang des Umfangs entgegen. Dabei erzeugt die Haftkraft ein Gegenmoment  $M_{F_H}$

$$M_{F_H} = F_H * \frac{1}{2} D \quad (8)$$

Die Bedingung, damit der Generator nicht zu rotieren beginnt, lautet:  $M_{F_U} \leq M_{F_H}$

$$M_{F_H} = M_{F_U} \quad (9)$$

$$F_H * \frac{1}{2} D = F_U * \frac{1}{2} D \quad (10)$$

$$F_H = F_U = m * g * n \quad (11)$$

Mit Hilfe des Reibkoeffizienten kann wieder die erforderliche Normalkraft  $N$  bestimmt werden.

$$F_H = N * \mu \rightarrow N = \frac{F_H}{\mu} = \frac{m * g * n}{\mu} \quad (12)$$

Dadurch ergeben sich die gleichen Normalkräfte, wie sie bereits im Abschnitt 6.1.3.1 berechnet wurden.

## 6.2 Konzept 2

Das zweite Konzept ist eine überarbeitete Version der vorhandenen Halterung. Das Konzept 1 ist hingegen eine komplett neue Variante.

Auch beim Konzept 2 wird auf Langlöcher gesetzt, um eine freie Positionierung am Generator und am Shaker zu ermöglichen. Die Halterung ist außerdem deutlich versteift worden, damit es möglichst zu keiner Eigenschwingung während des Shakens kommt.

Gegenüber der ursprünglichen Halterung besitzt dieses Konzept eine getrennte Verschraubung. Lediglich die untere Hälfte der Halterung wird mit dem Shaker verschraubt. Um den Generator einzuspannen, wird anschließend die obere Hälfte an der unteren fixiert. Die getrennte Verschraubung ist wegen der unterschiedlichen Anzugsmomente erforderlich (siehe Abschnitt 4).

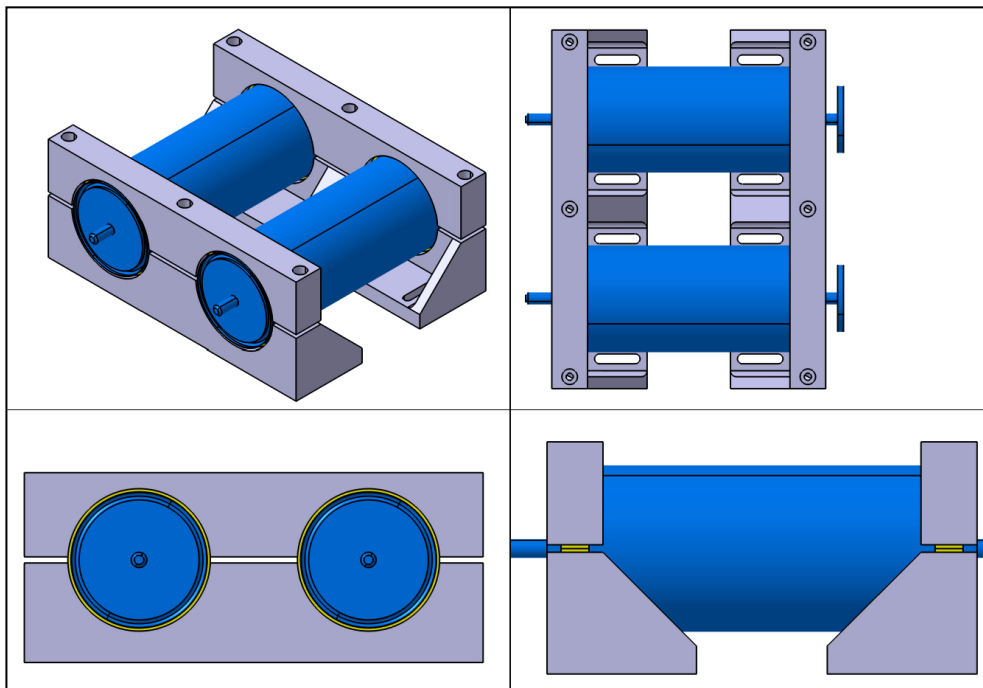


Abbildung 13: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 2 mit Generator

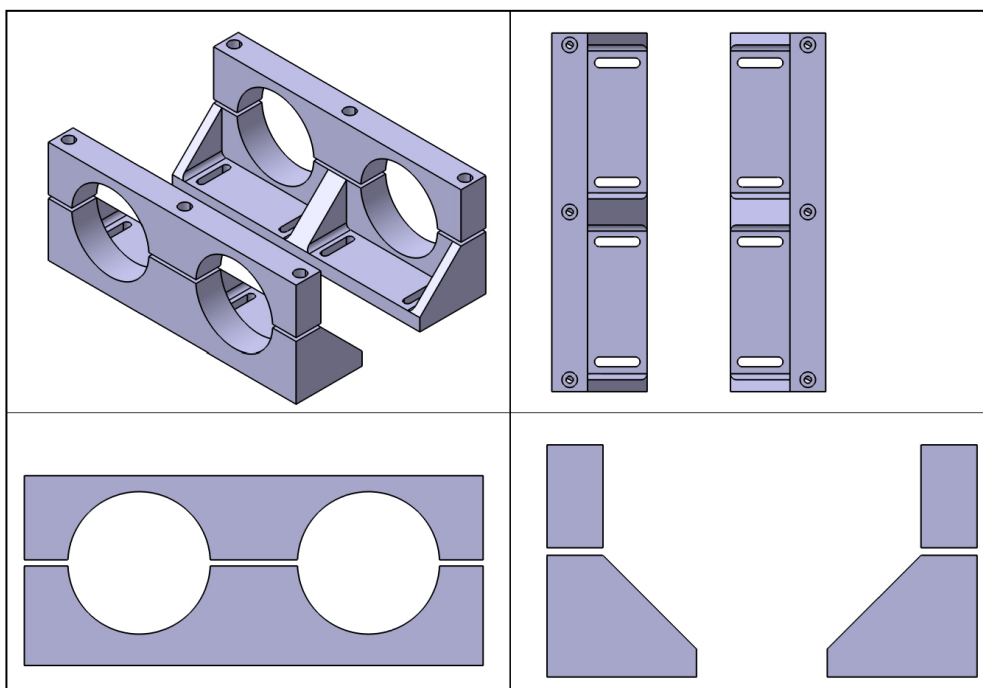


Abbildung 14: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 2 ohne Generator

Silikonringe sorgen dafür, dass die nötige Haftkraft aufgrund des besseren Haftreibungskoeffizienten (gegenüber Stahl auf Aluminium) verringert wird. Damit wird auch das nötige Anzugsmoment der Schrauben verringert.

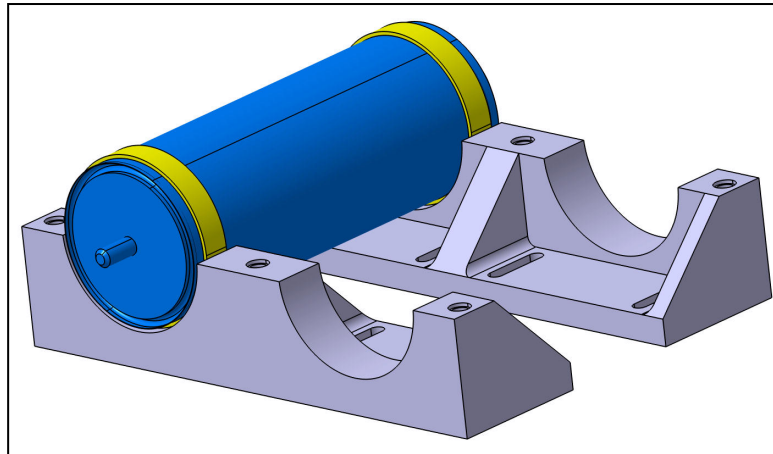


Abbildung 15: Silikonringe in Nut

### 6.2.1 Vor- und Nachteile – Konzept 2

Auch bei diesem Konzept sorgen Langlöcher dafür, dass die Halterung unabhängiger vom Lochbild positioniert werden kann. Darüber hinaus ermöglichen sie die beliebige Positionierung der Halterung am Generator. Das Risiko der Beschädigung wird damit vermindert, da die Halterung an den deutlich steiferen Außenseiten der Generatoren angebracht werden kann.

Silikonringe entlang des Umfangs sorgen hier ebenfalls für Toleranzausgleich. Da die Halterung auf demselben Grundprinzip des bisherigen Konzeptes basiert, ist auch hier der Zugang zu den Anschlüssen gewährleistet. Die gegenseitige Wärmebeeinflussung wurde im Vergleich zur vorhandenen Halterung verbessert. Auch hier wäre als weiterer Vorteil die getrennte Verschraubung zu nennen.

Eine falsche Positionierung kann aber weiterhin zu einer Beschädigung des Generators führen. Das Umrüsten auf eine andere Achse dauert außerdem lange, da alle Schrauben der Halterung gelöst werden müssen. Es ist schwierig, das benötigte Anzugsmoment aufzubringen. Das Anzugsmoment, das den Generator daran hindern soll, sich zu verschieben, ist sehr gering. Mit Drehmomentschlüsseln ist es daher nur schwer zu erfassen.

### 6.2.2 Bestimmung der Haltekräfte – Konzept 2

Beim Konzept 2 ergibt sich nur ein Fall, der untersucht werden muss:

- Kann der Generator aus der Halterung rutschen? (X-Achse)

#### 6.2.2.1 Minimale Kraft gegen Rutschen

Die benötigte Normalkraft bestimmt sich wie im Abschnitt 6.1.3.1 und auch die benötigten Werte der Generatoren stimmen mit Tabelle 4 überein.



Die gewünschte Einleitung der Haltekraft ist orthogonal zur Generatoroberfläche (Abbildung 16 rechts). Die Kraft wird durch die Halterung aber wie in Abbildung 16 links eingeleitet.

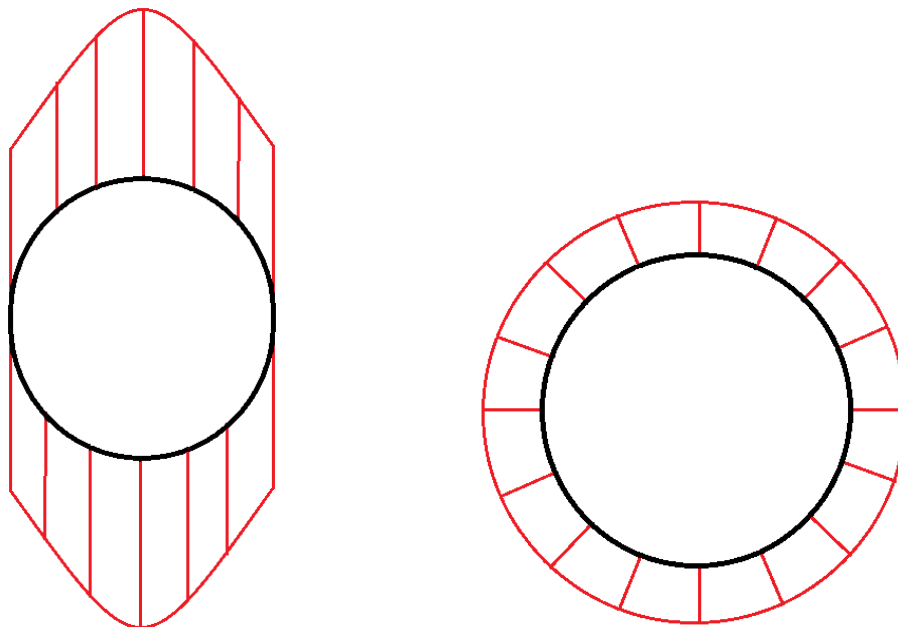


Abbildung 16: Reale Kräfteinleitung (links) und ideale Kräfteinleitung (rechts)

Es muss die Kraft ermittelt werden, die aufgebracht werden muss, um eine orthogonale Kraftverteilung zu erhalten. Da die Kraft  $N$  bekannt ist, kann die Kraft  $F_N$  vektoriell ermittelt werden.

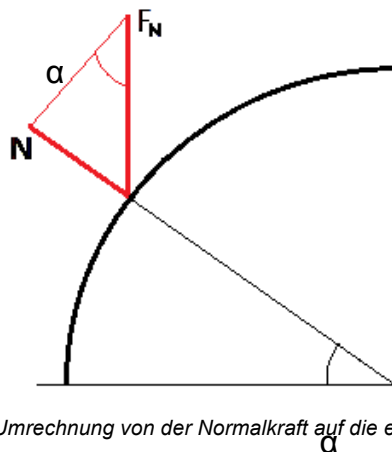


Abbildung 17: Umrechnung von der Normalkraft auf die eingeleitete Kraft

Da der Winkel  $\alpha$  bekannt ist, kann die Kraft  $F_N$  wie folgt bestimmt werden:

$$F_N = N * \sin(\alpha) \quad (13)$$

Trägt man diese Funktion nun über die Winkel  $\alpha = 0^\circ$  bis  $180^\circ$  auf, ergibt sich folgende Sinuskurve.

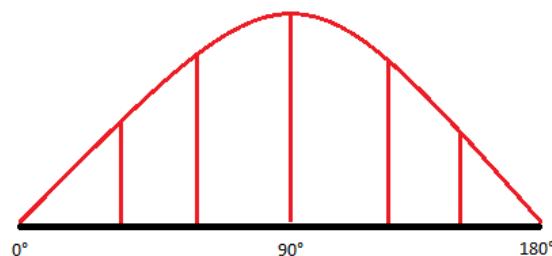


Abbildung 18: Sinus-Funktion der eingeleiteten Kraft

Mit Hilfe der Integralrechnung kann die Fläche unterhalb der Kurve bestimmt werden.

$$A_{\sin} = \int_{0^{\circ}}^{180^{\circ}} N * \sin(\alpha) d\beta = [N * (-\cos(\alpha))]_{0^{\circ}}^{180^{\circ}} = N * |-\cos(0^{\circ}) - (\cos(180^{\circ}))| \quad (14)$$

$$= N * |-2| = 2N$$

Dies stellt nur den halben Generatorumfang dar. Daraus ergibt sich, dass  $F_N \geq 4N$  sein muss, um die erforderliche Haftkraft aufzubringen. So ergeben sich für die Generatoren folgende Kräfte:

E72284:

$$F_{N_{Boeing}} = 4 * N_{Boeing} = 4 * 1250N = 5000N$$

E67521:

$$F_{N_{Airbus}} = 4 * N_{Airbus} = 4 * 300N = 1200N$$

Die Größe des Kunststoffringes bestimmt die Flächenbelastung  $q$ . Als Beispiel wird eine Ringbreite von 15mm angenommen.

$$A = (\pi * D * t_k) \quad (15)$$

E72284:

$$A_{k_{Boeing}} = (\pi * D * t_k) = (\pi * 88,9mm * 15mm) = 4189,3mm^2 \sim 4200mm^2$$

$$q_{Boeing} = \frac{F_{N_{Boeing}}}{2 * A_{k_{Boeing}}} = \frac{5000N}{8400mm^2} = 0,6 \frac{N}{mm^2}$$

E67521:

$$A_{k_{Airbus}} = (\pi * D * t_k) = (\pi * 60,4mm * 15mm) = 2846,3mm^2 \sim 2850mm^2$$

$$q_{Airbus} = \frac{F_{N_{Airbus}}}{2 * A_{k_{Airbus}}} = \frac{1200N}{5700mm^2} = 0,21 \frac{N}{mm^2}$$

### 6.3 Konzept 3

Bei diesem Konzept wird der Generator am sehr steifen Rand des Generators fixiert. Auch hier wird lediglich die untere Hälfte am Shaker verschraubt. Der Generatorrand wird mit Klemmböcken an der Halterung befestigt. Ein Anschlag begrenzt auch hier den Weg. Dadurch kann der Generatorrand nur bis zu einer gewissen Tiefe geklemmt werden. In Absprache mit dem Kunden stellte sich dieses Konzept aber als nicht umsetzbar heraus. Die Gefahr ist zu groß, die Schweißnaht zu beschädigen, sie verläuft am Generatorrand. Aus diesem Grund wird das Konzept im weiteren Verlauf nicht mehr betrachtet.

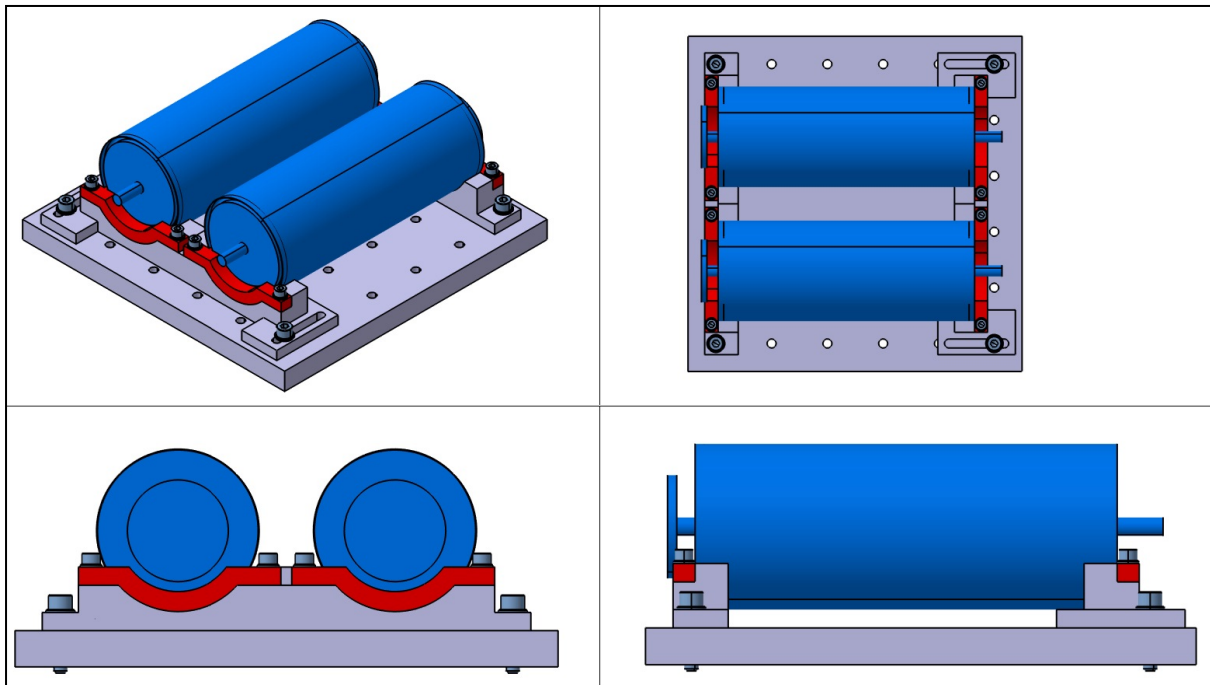


Abbildung 19: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 3 mit Generator

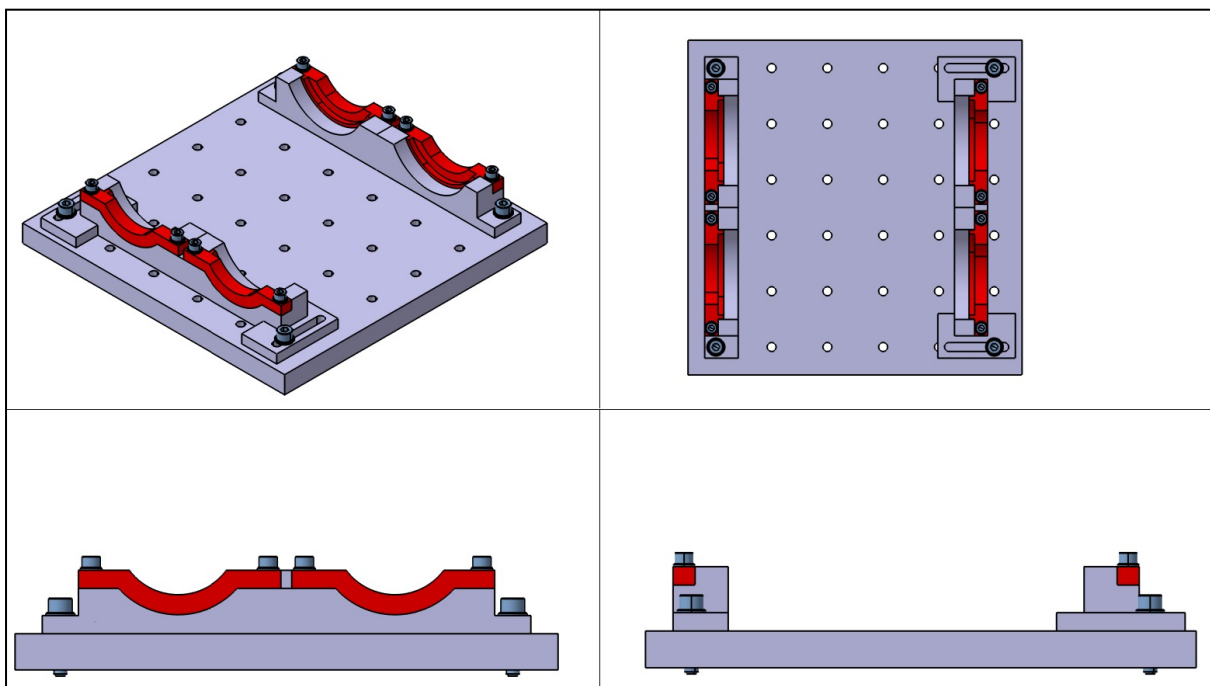


Abbildung 20: Drei-Seiten-Ansicht Konzept 3 ohne Generator

### 6.3.1 Vor- und Nachteile – Konzept 3

Konzept 3 weist viele Vorteile der vorherigen zwei Konzepte auf. Hierzu zählen die Unabhängigkeit vom Lochbild und die Anpassungsfähigkeit an variable Generatorlängen. Die Anschlüsse sind zugänglich und der Generatorkern kann nicht beschädigt werden. Durch die Klemmung werden zudem die Fertigungstoleranzen ausgeglichen. Ein Vorteil, der dieses Konzept von den anderen beiden unterscheidet, ist die Masse. Diese Halterung ist deutlich leichter als bei den ersten beiden Konzepten. Dadurch verringert sich die Belastung für den Shaker.

Dieses Konzept hat allerdings einige gravierende Nachteile. Der größte ist das hohe Risiko, den Generatorrand zu beschädigen. Die Fertigung ist zudem aufwendig, da die Radien der Halterung sowie der Klemmen sehr genau zueinander passen müssen. Beim Umrüsten müssen ebenfalls alle Schrauben gelöst werden. Als letztes ist die kleine Auflagefläche der Klemmen am Generator zu nennen. Hierdurch ist eine hohe Flächenbelastung nötig, um den Generator zu fixieren. Dies verstärkt wiederum das Risiko, den Generatorrand zu beschädigen.

## 6.4 Unterstützende FEM-Analysen

### 6.4.1 Vorwort

Um die verbleibenden Konzepte etwas besser beurteilen zu können, werden erste FEM-Analysen erstellt. Diese sind noch relativ grob und einfach aufgebaut. Die Analysen sollen in diesem Stadium lediglich Tendenzen aufzeigen, um die grundsätzliche Machbarkeit zu prüfen. Bei Konzept 1 ist zu untersuchen, bei welchen Frequenzen die Abstandshülsen anfangen zu schwingen. Außerdem soll untersucht werden, ob die Gefahr besteht, dass sich die Halterung von der Grundplatte abhebt. Letzteres gilt für beide Konzepte. Diese Berechnungen helfen dabei, Erkenntnisse über die Vorgehensweise für spätere Berechnungen zu sammeln.

Im ersten Schritt werden die CATIA Modelle in das Step-Dateiformat konvertiert, um sie anschließend zu vernetzen. Die Vernetzung erfolgt mit dem Programm *HyperMesh* der Firma *Altair*. Die Berechnung erfolgt anschließend mit *Nastran*. Der Vorgang der Vernetzung und das Setzen der Randbedingungen wird in Abschnitt 7.1 ausführlich beschrieben.

### 6.4.2 Untersuchungen

Folgende Punkte sollen untersucht werden:

#### Konzept 1:

- Eigenfrequenzen der Abstandshülsen
- Einfluss der Geometrie der Abstandshülsen auf die Eigenfrequenzen

#### Konzept 2:

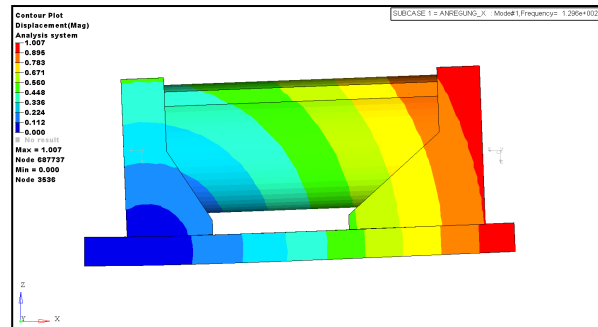
- Gefahr des Kippelns

### 6.4.2.1 Eigenfrequenzen der Abstandshülsen

Um die Eigenfrequenzen zu ermitteln, wird zunächst eine *Modalanalyse* (Solution 103) im Bereich von 0 bis 2000Hz durchgeführt. Allerdings sind die Ergebnisse noch nicht sehr aussagekräftig. Es entstehen auch Eigenfrequenzen, welche in der Realität nicht möglich sind. Dies liegt an den recht groben Randbedingungen. Ein Beispiel ist die erste Biegemode der Grundplatte (siehe Anhang C- 1).

*Hinweise:*

Die nachfolgenden GIF-Animationen weisen alle einen Verstärkungsfaktor von 10 auf. Die Auswirkungen sind dadurch visuell besser sichtbar.



Anhang C- 1: Konzept\_1\_Anregung\_X\_Erste\_Biegemode

Die Grundplatte kann real als fixiert betrachtet werden. Die erste Biegemode ist deswegen in Wirklichkeit nicht vorhanden. Um die kritischen Eigenfrequenzen zu ermitteln, wird eine *Modal Frequency Response* (Solution 111) vorgenommen. Hierbei wird eine gezielte Anregung in einen Punkt eingeleitet und die Auswirkungen werden in eine bestimmte Richtung ermittelt. Messpunkte sind in der Mitte jeder Abstandshülse, beider Generatoren und der Halterungen gesetzt. Als Anregung wird eine Beschleunigung von  $9,81 \frac{m}{s^2}$  erzeugt, also 1g. In Wirklichkeit sind die G-Kräfte deutlich höher, allerdings ändern diese nicht die Eigenfrequenz, sondern nur die Amplitude.

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Ergebnisse der SOL111 mit Anregung in X- und Y-Richtung. Die Graphen zeigen die Verschiebung der Messpunkte in Z-Richtung. (Koordinatensystem siehe Anhang C- 1). Es ist zu beachten, dass der Ausschlag der Kurven in diesem Fall keine Aussagekraft hat. Es geht lediglich um die relative Position der Spitzen.

**Hinweis:**

In den nachfolgenden Diagrammen kennzeichnet der Buchstabe oberhalb des Diagramms, in welche Achsrichtungen die Auswirkung gemessen wird. In der Legende und der Bildbeschriftung ist die Achse angegeben, welche angeregt wird.

Beispiel Abbildung 21: Anregung in X-Richtung. Verschiebung der Messpunkte in Z-Richtung.

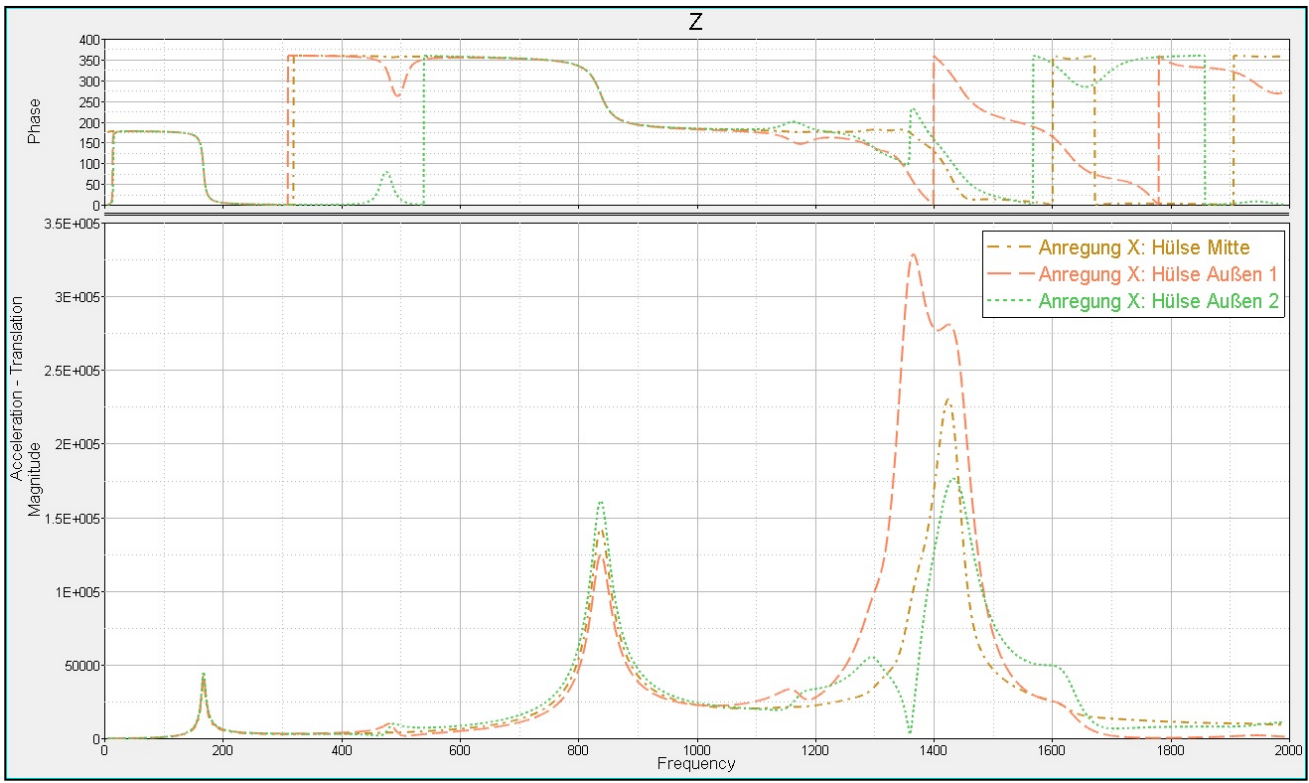


Abbildung 21: Ergebnis der SOL111 in X-Anregung

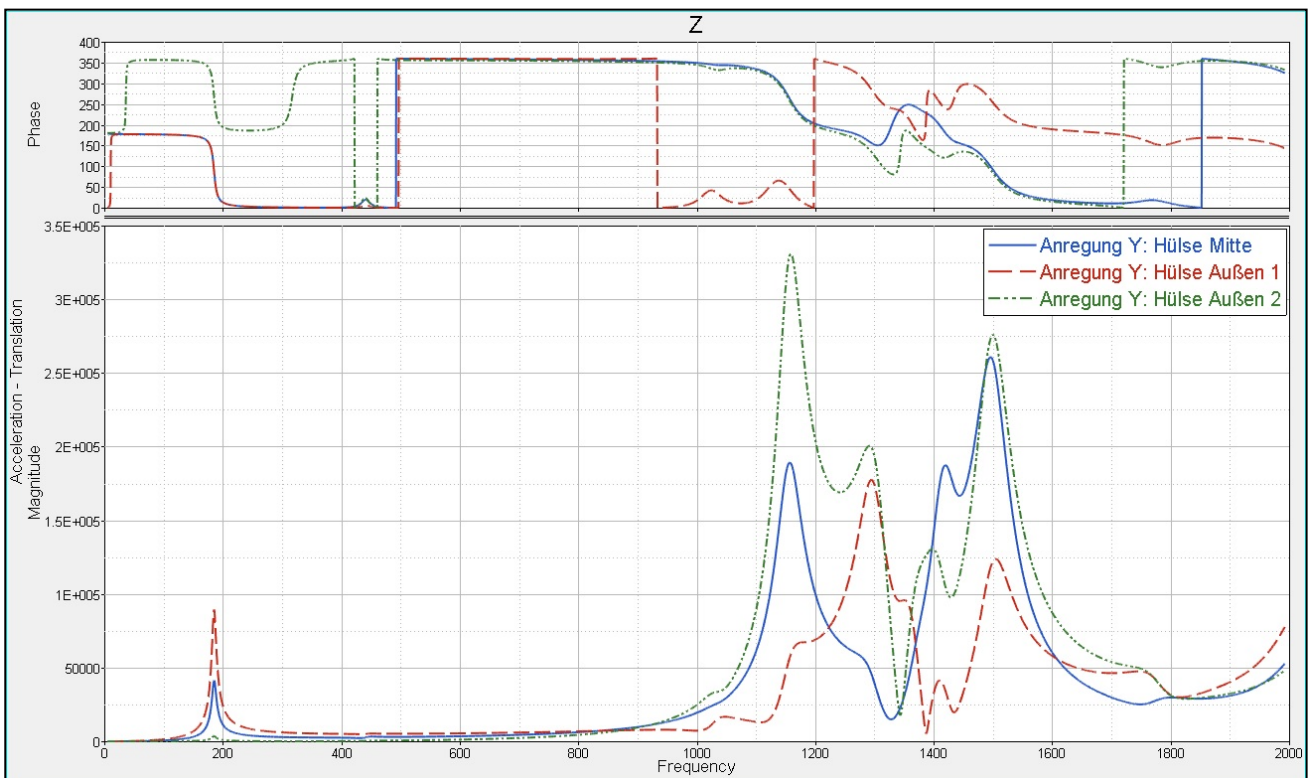
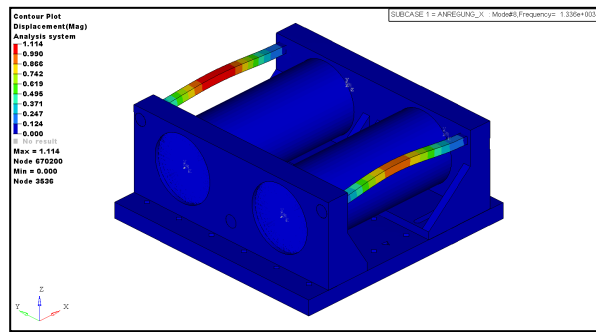


Abbildung 22: Ergebnis der SOL111 in Y-Anregung

Die ermittelten Eigenfrequenzen aus der SOL111 müssen nun mit den Ergebnissen der SOL103 verglichen werden. Hierbei stellt sich heraus, dass der erste Ausschlag bei ~200Hz wieder die erste Biegemode der Grundplatte ist. Wie bereits erwähnt, muss diese Eigenfrequenz nicht berücksichtigt werden.



Anhang C- 2: Konzept\_1\_Anregung\_X\_1340Hz

Die Eigenfrequenz in Abbildung 21 bei ~1340Hz ergibt bei Betrachtung der SOL103 eine kritische Anregung (Anhang C- 2). Dieser Schluss ergibt sich ebenfalls bei den Frequenzen 800 Hz (X-Anregung) sowie 1150Hz und 1480Hz (Y-Anregung).

Ziel dieser Untersuchung ist es, die Machbarkeit des Konzeptes zu überprüfen. Um beurteilen zu können, wie kritisch die ermittelten Eigenfrequenzen sind, muss die Anregung dieser Frequenzen betrachtet werden. Während des realen Tests wird meistens ein Rauschen nach DO-160 gefahren.

DO-160:

Die DO-160 stellt Standardkriterien für Prüfverfahren von Luftfahrtequipment dar. Unter anderem werden in der DO-160 Wasserfestigkeit, Audio-Frequenzen und Stromeinspeisung geregelt. Auch die Prüfkriterien von vibrationskritischen Bauteilen sind hier festgehalten.

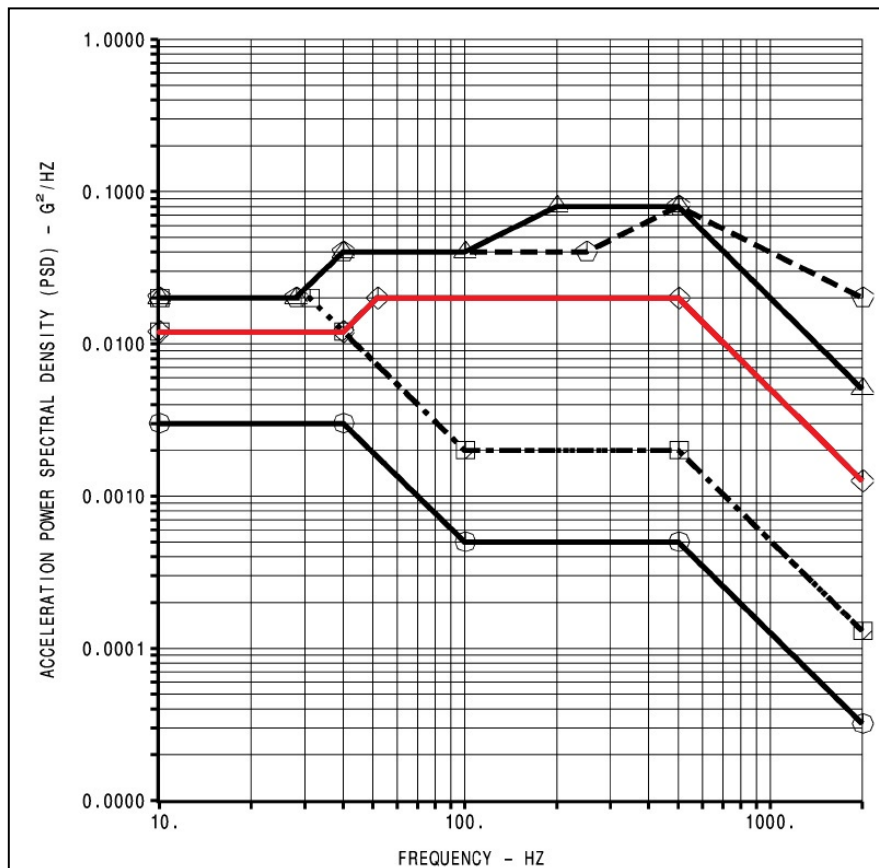


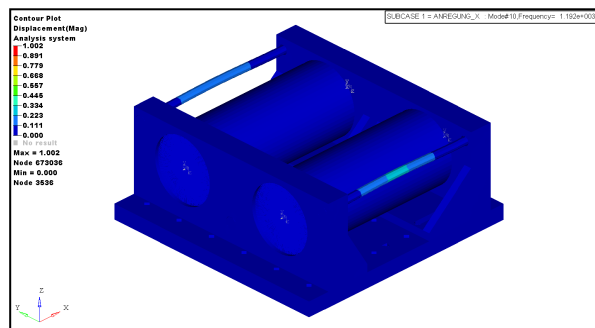
Abbildung 23: Anregung nach DO-160

Die rot markierte Kurve der Abbildung 23 zeigt die Referenzkurve, die beim Prüfverfahren der Sauerstoffgeneratoren meist zum Einsatz kommt. Der Graph zeigt, dass die ermittelten Eigenfrequenzen in einem Bereich liegen, bei dem die Anregung gering ist. Die Eigenfrequenzen sind daher als nicht kritisch anzusehen, obwohl sie noch im Messbereich liegen. Einzige Ausnahme stellt die Frequenz bei ~800Hz dar. Diese befindet sich im kritischen Bereich von 100 bis 1000Hz. Anzumerken ist, dass es sich hierbei nur um einen Prototypen handelt und die Halterung noch nicht darauf ausgelegt ist, bestimmte Frequenzen zu dämpfen.

**6.4.2.2 Einfluss der Geometrie der Abstandshülsen auf die Eigenfrequenzen**

Bei den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Abstandshülsen mit einem quadratischen Querschnitt ausgeführt. Durch diesen Querschnitt sollten die Abstandshülsen versteift werden. Die Fertigung eines quadratischen Querschnittes ist deutlich aufwendiger als eines runden Querschnittes. Daher wird der Einfluss von runden Abstandshülsen ebenfalls untersucht.

Zunächst wird hierfür wieder eine SOL103 durchgeführt, um die Eigenfrequenzen zu ermitteln. Da sich lediglich die Form der Abstandshülsen verändert hat, können die Ergebnisse der vorherigen Solution 111 auch für das Konzept mit runden Abstandshülsen verwendet werden. Es müssen aus den Eigenfrequenzen aus der SOL103 lediglich die äquivalenten Moden ermittelt werden.



Anhang C- 3: Konzept\_1\_Anregung\_X\_1200HZ\_Rund

Anhang C- 3 zeigt die äquivalente Mode zum Anhang C- 2. Es zeigt sich, dass der quadratische Querschnitt positiven Einfluss auf die Eigenfrequenzen hat. Die restlichen Eigenfrequenzen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Quadratischer Querschnitt	Runder Querschnitt
X-Anregung	
800Hz	800Hz
Y-Anregung	
1150Hz	1170Hz
1480Hz	1360Hz

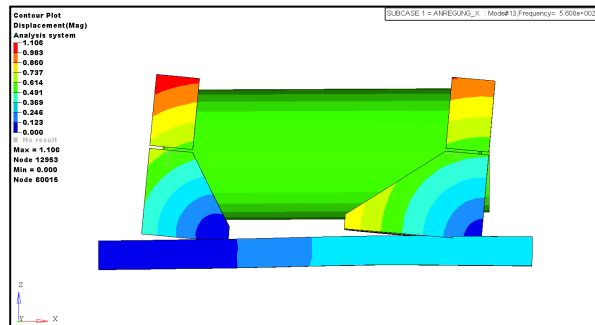
Tabelle 5: Äquivalente Eigenfrequenzen

Durch den runden Querschnitt fallen die Ergebnisse nicht signifikant schlechter aus. Auch diese Frequenzen liegen bis auf eine Ausnahme im Bereich geringer Anregung. Zu Gunsten der Fertigung wird deswegen auf einen runden Querschnitt gesetzt.



### 6.4.2.3 Gefahr des Kippelns

Kippeln bezeichnet das Abheben der Halterung und das folgende Aufschlagen auf die Grundplatte. Dies betrifft vor allem Konzept 2. Hierfür wurde für Konzept 2 ebenfalls eine Modalanalyse durchgeführt.



Anhang C- 4: Konzept\_2\_Anregung\_X\_560Hz

Bei einer Frequenz von 560Hz fängt die Halterung an zu kippeln. Dies bestätigt die Annahmen. Das Kippeln tritt auf, weil alle Schrauben der Halterungen mit der Grundplatte in einer Reihe liegen. Dadurch fängt die Halterung an, sich um eine feste Achse zu drehen. Das könnte durch eine zweite Schrauben-Reihe an jeder Halterung unterbunden werden. Da die Größe der Halterung aber durch die Grundplatte begrenzt ist, besteht diese Möglichkeit nicht. Hier muss ein realer Test zeigen, wie kritisch dieses Verhalten ist. In der Animation durchdringen die Halterungen die Grundplatte. Das ist nicht realistisch, das tatsächliche Ergebnis sollte besser ausfallen.

### 6.4.3 Bewertung

Diese FEM-Analyse zeigt, dass die beiden Konzepte in Hinsicht auf die Eigenfrequenzen machbar sind. Es wurde festgestellt, dass es nur eine kritische Eigenfrequenz gibt. Das Modell ist allerdings nicht darauf ausgelegt, bestimmte Schwingungen zu dämpfen. Außerdem ist die Berechnung noch grob. Würde sich in diesem Stadium bereits abzeichnen, dass die Konzepte nicht machbar sind, würden genauere Untersuchungen dies nur bestätigen. Deshalb hat auch diese einfache FEM-Analyse Aussagekraft. Es konnten auch Rückschlüsse auf die Konstruktion gezogen werden. Der Fertigungsaufwand von Abstandshülsen mit quadratischem Querschnitt gegenüber einem rundem ist nicht gerechtfertigt.

## 6.5 Konzeptbewertung

Zur besseren Übersicht werden zunächst die Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte in den folgenden Tabellen noch einmal zusammengefasst:

Konzept 1:

Vorteile	Nachteile
Klemmkraft für die Generatoren bleibt erhalten	Für jede Generatorlänge andere Hülsen nötig
Generator kann nicht eingedrückt werden	Fertigung aufwendig
An variable Generatorlängen anpassbar	
Fertigungstoleranzen werden ausgeglichen	
Anschlüsse der Generatoren sind zugänglich	
Schnelles Umrüsten auf eine andere Achse	
Wärmebeeinflussung gering	
Getrennte Verschraubung von Generator und Halterung	

Tabelle 6: Vor- und Nachteile – Konzept 1

Konzept 2:

Vorteile	Nachteile
Getrennte Verschraubung von Generator und Halterung	Generator kann weiterhin beschädigt werden (wenn auch nicht so leicht)
Fertigungstoleranzen werden ausgeglichen	Umrüstung auf andere Achse dauert lange
Anschlüsse der Generatoren sind zugänglich	Geringes Anzugsmoment erforderlich
Wärmebeeinflussung gering	
An variable Generatorlänge anpassbar	

Tabelle 7: Vor- und Nachteile – Konzept 2

Konzept 3:

Vorteile	Nachteile
Geringes Gewicht	Fertigung aufwendig (Klemmen/Radien)
Generatorkern kann nicht beschädigt werden	Hohes Risiko, dass der Generatorrand beschädigt wird
Wärmebeeinflussung gering	Lange Umrüstzeiten
An variable Generatorlänge anpassbar	Auflagefläche der Klemmen sehr klein
Fertigungstoleranzen werden ausgeglichen	
Anschlüsse der Generatoren sind zugänglich	

Tabelle 8: Vor- und Nachteile – Konzept 3

Um die Konzepte besser bewerten und vergleichen zu können, wird eine Nutzwertanalyse erstellt. Das Konzept 3 wird hier nicht berücksichtigt, da es wie erwähnt vom Kunden bereits abgelehnt wurde.

Kriterium	Faktor [%]	Konzept 1		Konzept 2	
		Wertung	Einzelwert	Wertung	Einzelwert
Gewicht	5	3	15	3	15
Flexible Anpassung an Generatorlänge	15	3	45	4	60
Anschlusszugängigkeit	10	4	40	4	40
Montage-/Umspannzeit	15	4	60	2	30
Herstellungsaufwand	5	3	15	3	15
Raumnutzung	5	2	10	2	10
Toleranzausgleich	10	4	40	3	30
Wärmeabfuhr gewährleisten	15	4	60	4	60
Generatorbeschädigung verhindern	20	4	80	2	40
	<b>100</b>		<b>365</b>		<b>300</b>

Tabelle 9: Nutzwertanalyse

1 – schlecht	2 – mittel	3 – gut	4 – sehr gut
--------------	------------	---------	--------------

Aus der Nutzwertanalyse geht zwar das Konzept 1 als Favorit hervor, allerdings nicht mit einem sehr großen Vorsprung. Daher werden beide Konzepte weiter verfolgt.

## 7 Analyse

### 7.1 Schwingungsanalyse – FEM

Es werden erneut FEM-Analysen beider Konzepte vorgenommen. Diese dienen später als Vergleich zu real ermittelten Ergebnissen. Die nachfolgenden Schritte zur Erstellung und Durchführung der Berechnung werden anhand von Konzept 1 erläutert. Da sich die Konzepte geometrisch ähneln, wird bei Konzept 2 genauso verfahren.

#### 7.1.1 Vernetzung

Die Vernetzung wurde bei diesen Untersuchungen feiner gewählt. Dadurch erhöht sich die Genauigkeit der Ergebnisse, allerdings auch die Rechenzeit.

Es wurde wieder auf Tetraederelemente gesetzt. Die Größe der Elemente ist wie folgt gewählt:

Konzept 1		Konzept 2	
Halterungen	3mm	Halterungen	3mm
Silikonringe	3mm	Silikonringe	3mm
Generatoren	3mm	Generatoren	3mm
Grundplatte	5mm	Grundplatte	5mm
Abstandshülsen	3mm		

Tabelle 10: Größe der Tetraederelemente

Bei der Grundplatte wurde eine gröbere Vernetzung gewählt, weil die Geometrie lediglich zum Fixieren der anderen Bauteile vorhanden ist. Dadurch wird Rechenzeit eingespart.

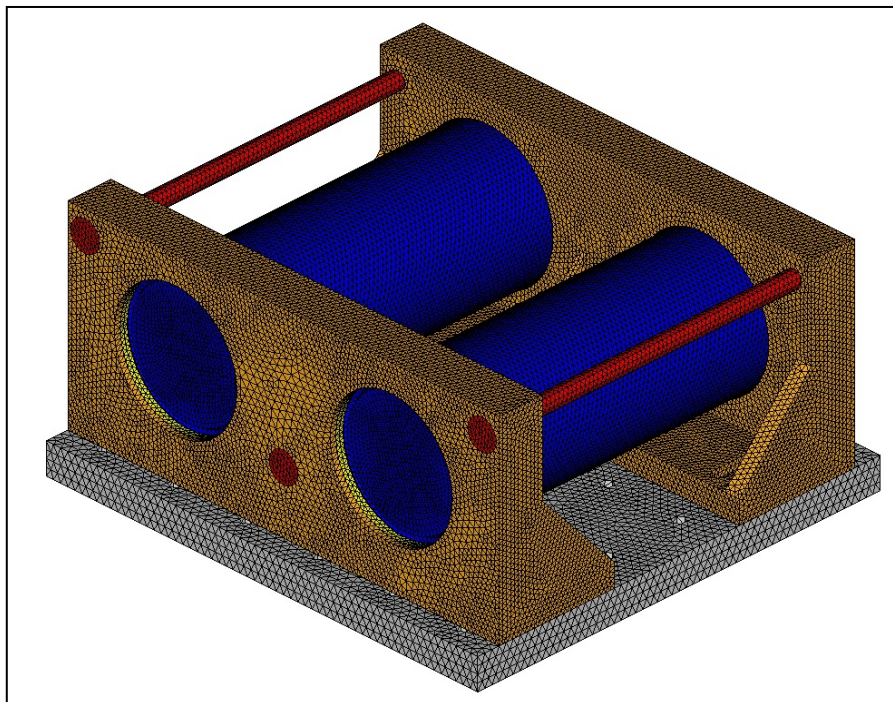


Abbildung 24: Konzept 1 vernetzt

## 7.1.2 Randbedingungen

Die einzelnen Bauteile müssen untereinander noch verbunden werden. Hierfür werden RBE2-Spinnen verwendet. Ein RBE2-Element stellt eine unendlich steife Verbindung dar. Bei einer RBE2 Spinne werden mehrere *Nodes* (Eckpunkte der Tetraederelemente) auf einen einzigen Punkt bezogen. Werden die Mittelpunkte zweier Spinnen miteinander verbunden, entsteht eine feste Verbindung.

Dieser Vorgang wird anhand der Verschraubung der Halterung an der Grundplatte erläutert. Es wird ein RBE2 in der Bohrung der Grundplatte definiert. Im Anschluss wird eine Spinne im Langloch der Halterung erstellt. Abschließend müssen die Mittelpunkte verbunden werden und es entsteht eine Verbindung. Dieses Vorgehen ist in den nachfolgenden Bildern visualisiert.

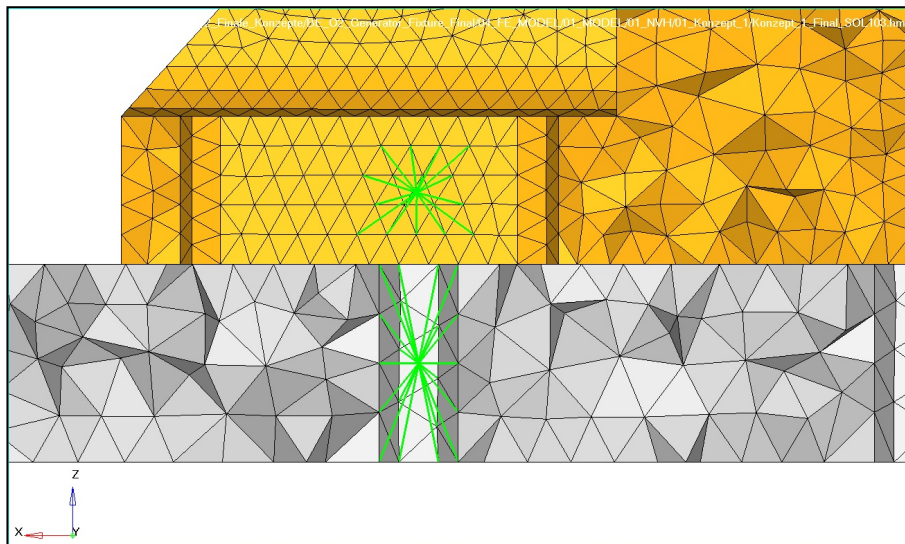


Abbildung 25: Zwei RBE2 Spinnen nicht verbunden

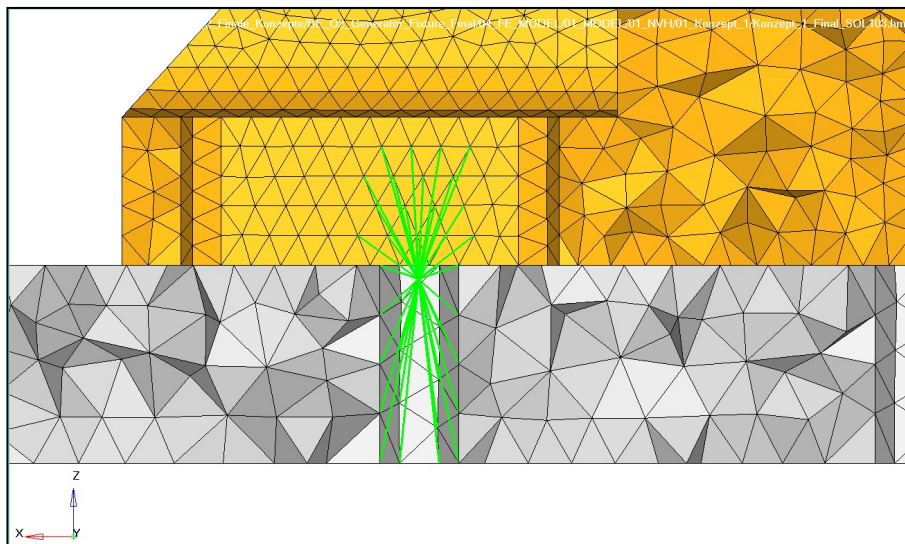


Abbildung 26: Zwei RBE2 Spinnen verbunden

Bei den Abstandshülsen wird genauso verfahren. Die Abstandshülsen stehen aufgrund der Verschraubung unter einer Vorspannung. Frühere Untersuchungen haben ergeben, dass die Ergebnisse durch die Simulation der Vorspannung gegenüber reinen RBE2-Verbindungen sich nur minimal unterscheiden. Um die Spannkraft zu simulieren, entsteht ein deutlich höherer Modellierungsaufwand. Daher wurde auf die Vorspannung verzichtet, weil diese keinen Mehrwert darstellt.

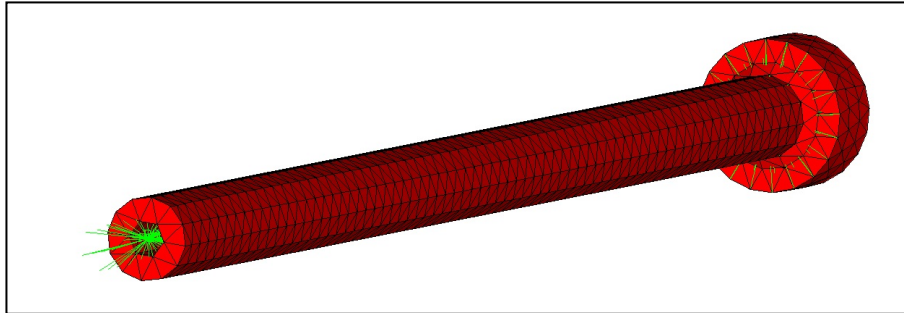


Abbildung 27: RBE2-Spinne an den Abstandshülsen

Die Verbindungen der Generatoren mit der Halterung sind etwas aufwendiger. Das Problem ist, dass die Generatoren nicht unendlich steif mit den Halterungen verbunden sind. Schon aufgrund der Kunststoffringe können sich die Generatoren minimal bewegen. Dies muss auch bei den Randbedingungen beachtet werden.

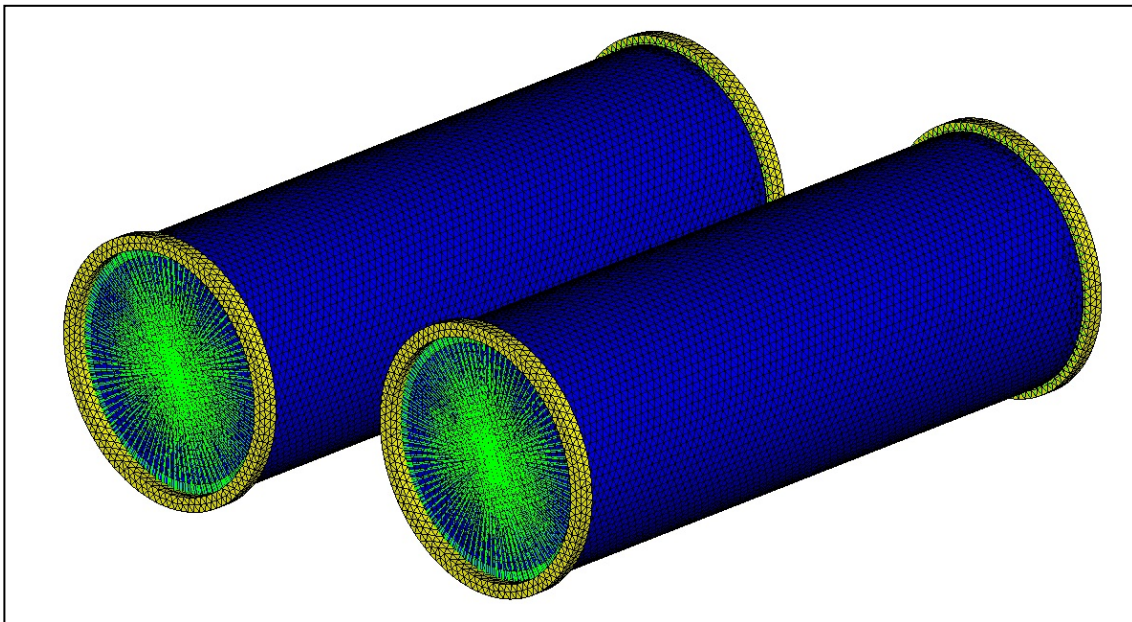


Abbildung 28: RBE2-Verbindung der Generatoren

Für die Randbedingungen der Generatoren wird eine RBE2-Verbindung zwischen Halterung und Silikonring sowie zwischen Silikonring und Generator definiert. Es besteht damit keine unendlich steife Verbindung zwischen Generator und Halterung. Der Silikonring erhält im weiteren Verlauf sehr weiche Materialeigenschaften. Dadurch wird die Simulation der Realität trotz unendlich steifer Verbindungen gerecht.

Abschließend müssen noch die Lagerbedingungen der Grundplatte erstellt werden. Hierbei muss zwischen der Modalanalyse (SOL103) und Modal Frequency Response (Solution 111) unterschieden werden.

### Modalanalyse:

Bei der Solution 103 erhalten zwei Seiten der Grundplatte eine feste Einspannung. Hierfür wird an jedem Punkt der Seiten ein *Single Point Constraint* (SPC) vergeben. Die Single Point Constraints werden einem Load Case zugeordnet (Load Case 1 = rot, Load Case 2 = blau). In Nastran ist es möglich in einer Berechnung erst den Load Case 1 und anschließend den Load Case 2 zu berechnen. Damit erhält man sowohl Ergebnisse für die X- wie auch die Y-Anregung in einer Berechnung.

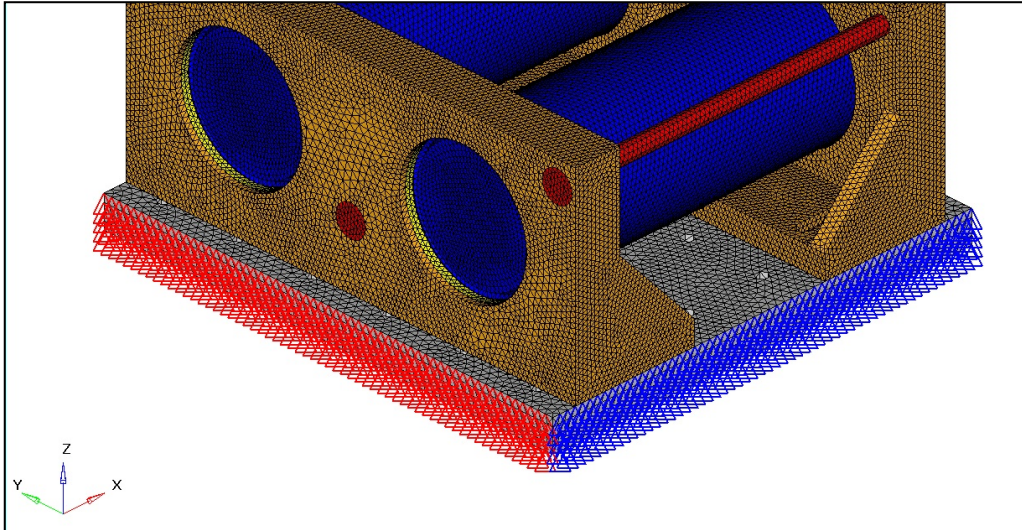


Abbildung 29: SPCs der SOL103

### Modal Frequency Response:

Wie bereits im Abschnitt 6.4.2.1 beschrieben, wird bei der SOL111 eine definierte Anregung in einen Punkt eingeleitet. Dieser Punkt muss als Einspannung der Grundplatte erstellt werden. Hierfür werden beide Seiten der Grundplatte mit einem RBE2 versehen (Abbildung 30, grün). Der Mittelpunkt wird mit einer einzelnen festen Einspannung versehen (Abbildung 30, rot bzw. blau).

In den Einstellungen zur SOL111 kann diesem SPC eine Beschleunigung und eine Richtung vorgegeben werden. Da die Beschleunigung im Mittelpunkt des RBE2 eingeleitet wird, überträgt dieser die Beschleunigung auf alle Nodes der Grundplattenseite. Das wirkt, als würde die gesamte Grundplatte mit 1g in eine definierte Richtung beschleunigt werden. Dies entspricht auch der Realität. Auch hier entstehen einmal für die Beschleunigung in X- wie auch in Y-Richtung separate Load Cases.

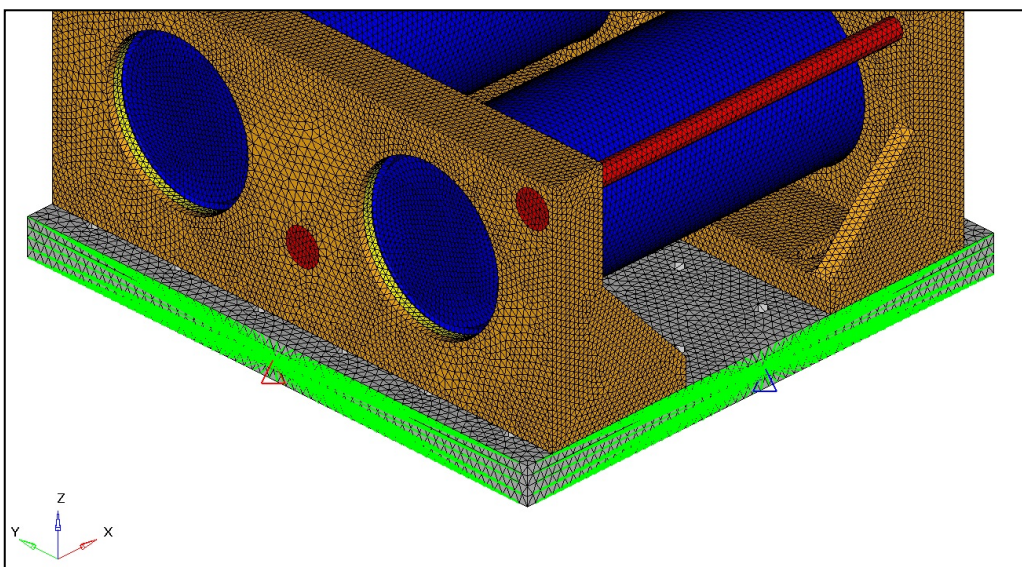


Abbildung 30: SPCs der SOL111

### 7.1.3 Materialwerte

Abschließend müssen den jeweiligen Bauteilen noch Materialeigenschaften zugewiesen werden. Notwendige Materialeigenschaften sind das Elastizitätsmodul, die Dichte sowie die Querkontraktionszahl.

	<b>Material</b>	<b>E</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b><math>\rho</math> [<math>g/cm^3</math>]</b>	<b><math>\rho</math> [<math>t/mm^3</math>]</b>
Halterung	Aluminium	70000	0,28	2,78	2,78e-009
Abstandshülsen	Stahl	210000	0,3	7,85	7,85e-009
Silikonringe	Silikon	3000	0,1	0,8	8e-010
Generatoren	Stahl	70000	0,28	1,087	1,09e-009
Grundplatte	Stahl	210000	0,3	7,85	7,85e-009

Tabelle 11: Materialwerte für FEM-Berechnung

Nastran und HyperMesh arbeiten einheitenlos. Aus diesem Grund werden alle Angaben nach einem Einheitensystem mit Einheiten versehen. Es wurde für die Vernetzung Millimeter verwendet. Kraft, Masse und Zeit erhalten damit die Einheiten Newton, Tonnen und Sekunden. Daraus ergibt sich für die Dichte die Einheit  $t/mm^3$ , welche in HyperMesh und Nastran verwendet wird. Dies stellt eine ungewohnte Einheit der Dichte dar, weswegen sie zusätzlich in der üblichen Einheit  $g/cm^3$  aufgeführt ist.

Die Dichte eines Generators ergibt sich aus seinem Volumen sowie seiner Masse. Da die Halterung für Boeing-Generatoren ausgelegt wird, werden auch die Daten der Boeing-Generatoren verwendet. Diese sind in Tabelle 4 zu finden. Die Generatoren weisen eine Länge von 20,6cm auf.

$$\rho = \frac{m_{Boeing}}{V_{Boeing}} = \frac{m_{Boeing}}{\pi * \left(\frac{D_{Boeing}}{2}\right)^2 * l_{Boeing}} = \frac{1390g}{\pi * \left(\frac{8,89cm}{2}\right)^2 * 20,6cm} = 1,087 \frac{g}{cm^3} \quad (16)$$



### 7.1.4 Ergebnisse

#### 7.1.4.1 Konzept 1

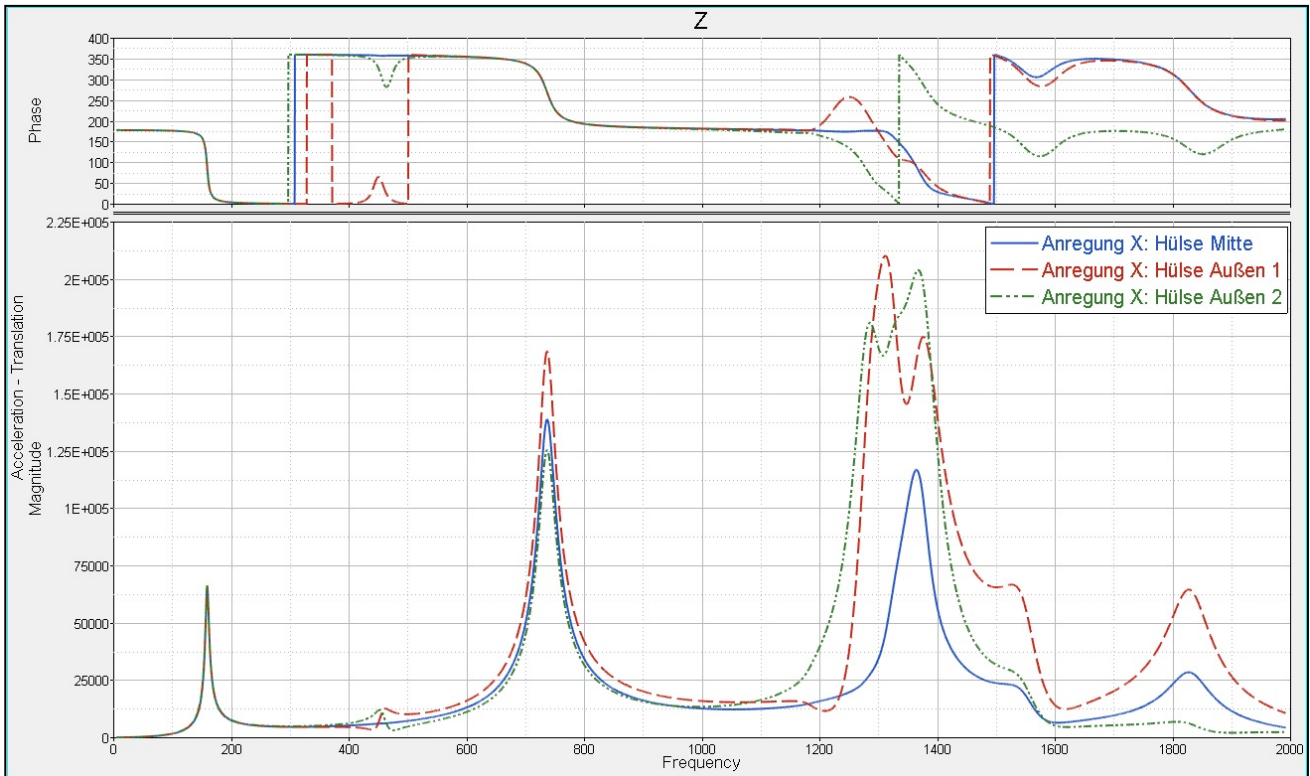
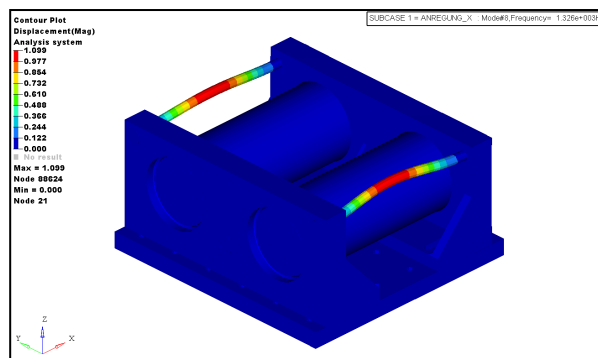


Abbildung 31: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Abstandshülsen in X-Richtung

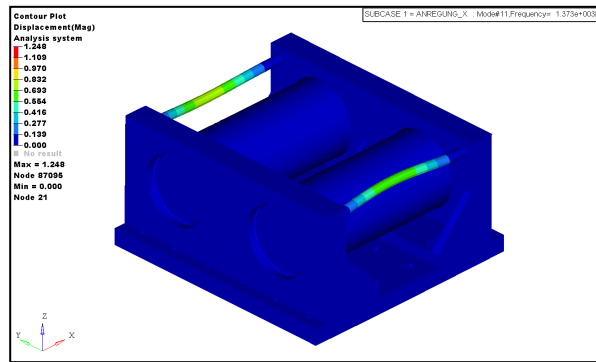
Die Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse bei einer Anregung in X-Richtung. Die Längsachse der Abstandshülsen ist identisch mit der X-Richtung (siehe Abbildung 30). Eine Verschiebung in X-Richtung würde daher bedeuten, dass die Hülse gestreckt oder gestaucht wird. Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass dann auch eine Eigenschwingung vorliegt. Aus diesem Grund zeigt Abbildung 31 die Auswirkungen in Z-Richtung bei einer Anregung in X-Richtung.

Der Ausschlag bei ~180Hz stellt wieder einmal die erste Biegemode der Grundplatte dar und wird deswegen nicht weiter beachtet. Dies gilt auch für nachfolgende Diagramme.

Die Ausschläge müssen mit der vorangegangenen Modalanalyse verglichen und auf Plausibilität geprüft werden. Es stellt sich heraus, dass nur bei 1330Hz und 1370Hz eine Eigenschwingung vorliegt. In den nachfolgenden Animationen ist gut zu erkennen, wie die Abstandshülsen schwingen.

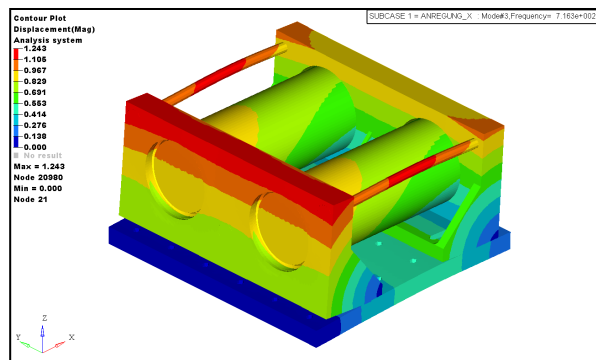


Anhang C- 5: Konzept\_1\_Final\_Huelsen\_Anregung\_X\_1330Hz



Anhang C- 6: Konzept\_1\_Final\_Huelsen\_Anregung\_X\_1370Hz

Das Diagramm lässt vermuten, dass bei  $\sim 730\text{Hz}$  sowie  $\sim 1830\text{Hz}$  ebenfalls eine Eigenschwingung vorliegt. Die SOL103 widerlegt dies aber. Das Diagramm zeigt eine Wegänderung der Referenzpunkte in den Abstandshülsen. Bei  $730\text{Hz}$  findet diese Wegänderung aber nicht durch ein Schwingen der Abstandshülsen statt, sondern durch die Bewegung der gesamten Halterung in Z-Richtung (siehe Anhang C- 7). Damit ist das keine Eigenschwingung. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, die SOL103 und die SOL111 in Kombination zu betrachten. Nur so können die relevanten Frequenzen ermittelt werden.



Anhang C- 7: Konzept\_1\_Final\_Huelsen\_Anregung\_X\_720Hz

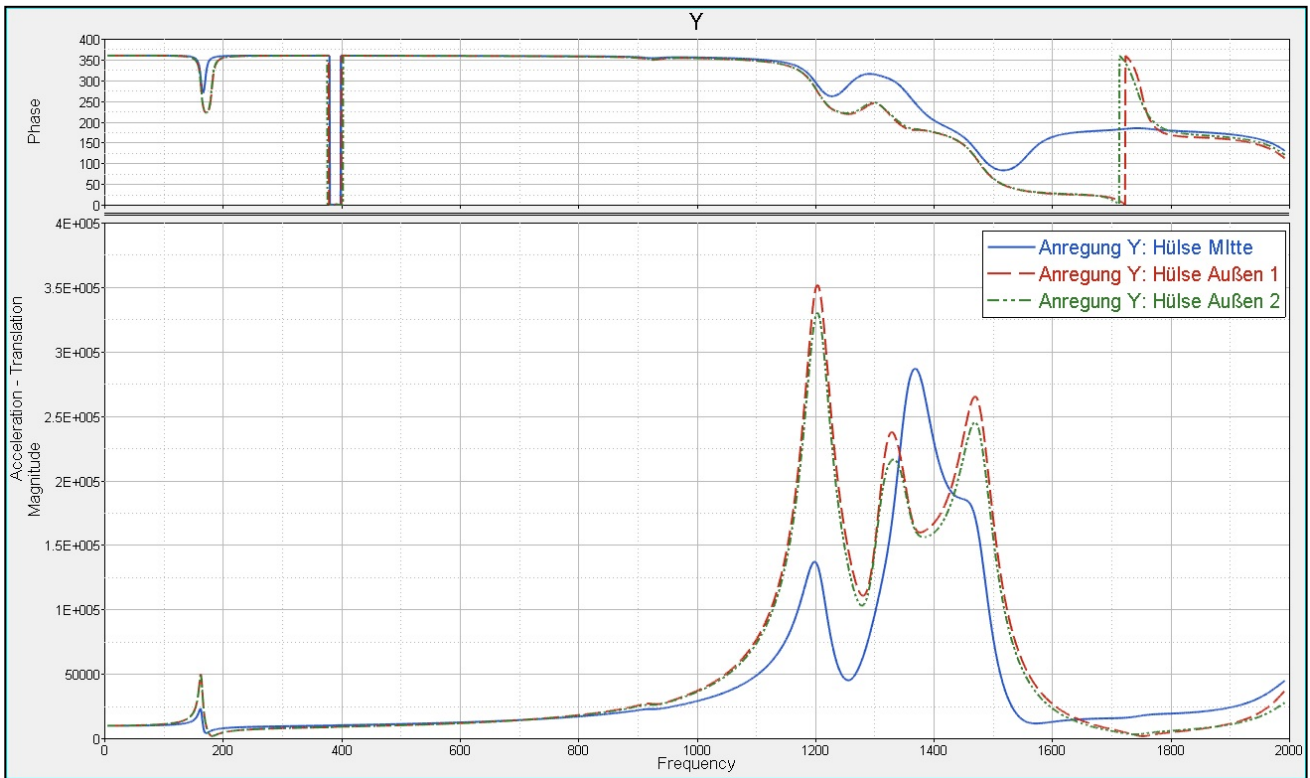
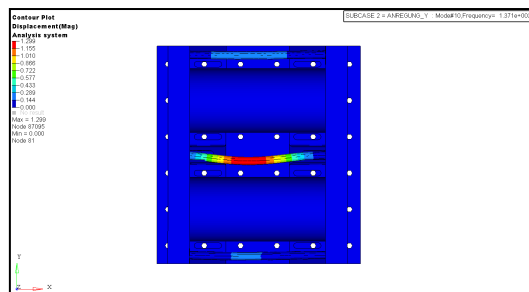


Abbildung 32: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Abstandshülsen in Y-Richtung

In Abbildung 32 sind die Auswirkungen in Y-Richtung bei einer Anregung in Y-Richtung abgebildet. Die Y-Achse befindet sich quer zur Längsachse der Abstandshülsen (siehe Abbildung 30). Aus diesem Grund kann für die Richtung der Wegveränderung die gleiche wie für die Anregung dargestellt werden.

Erwartungsgemäß besitzen die äußeren Abstandshülsen die gleichen Eigenschwingungen. Die gesamte Halterung ist symmetrisch, womit die äußeren Hülsen relativ die gleiche Position aufweisen. Bei einer Anregung in Y-Richtung ergeben sich vier Eigenschwingungen. Das Diagramm zeigt: Nicht alle drei Abstandshülsen besitzen die gleichen Eigenfrequenzen. Bei ~1370Hz bestätigt auch die Modalanalyse, dass lediglich die mittlere Abstandshülse anfängt zu schwingen.



Anhang C- 8: Konzept\_1\_Final\_Huelsen\_Anregung\_Y\_1370Hz

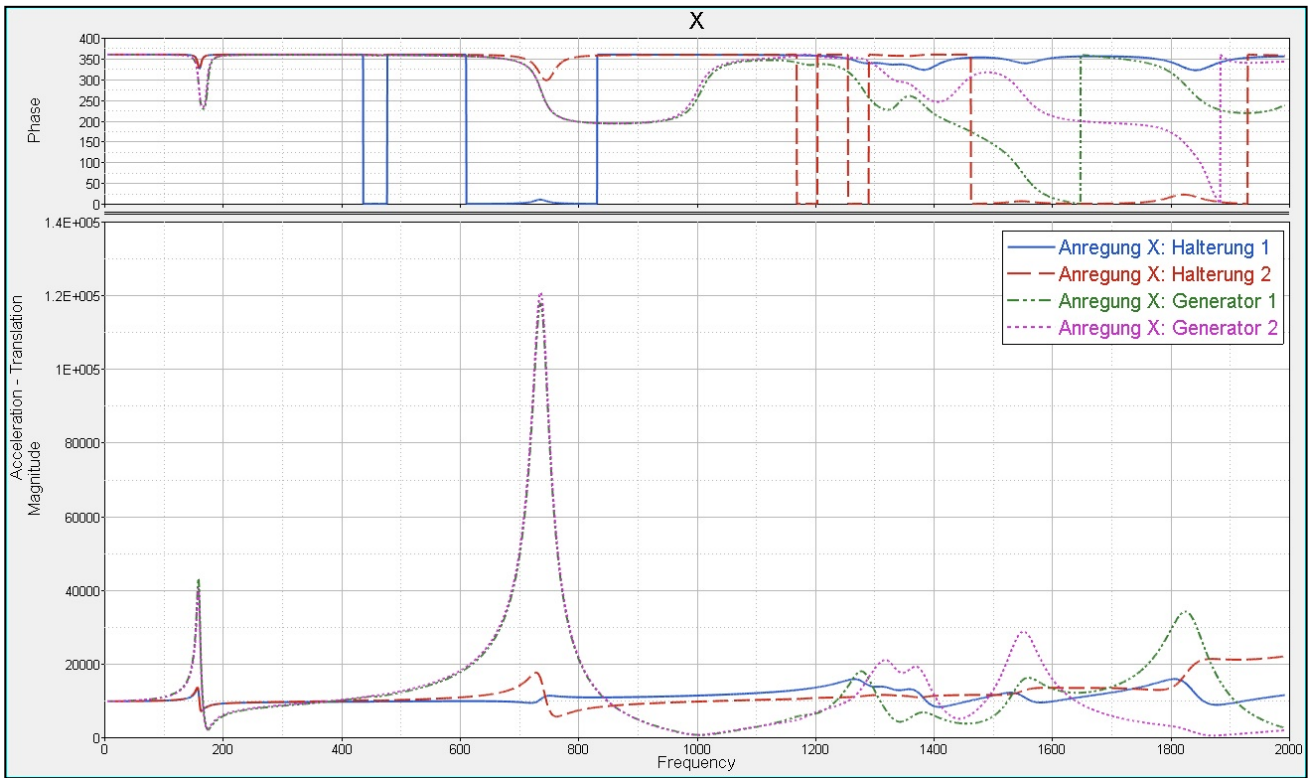


Abbildung 33: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Generatoren in X-Richtung

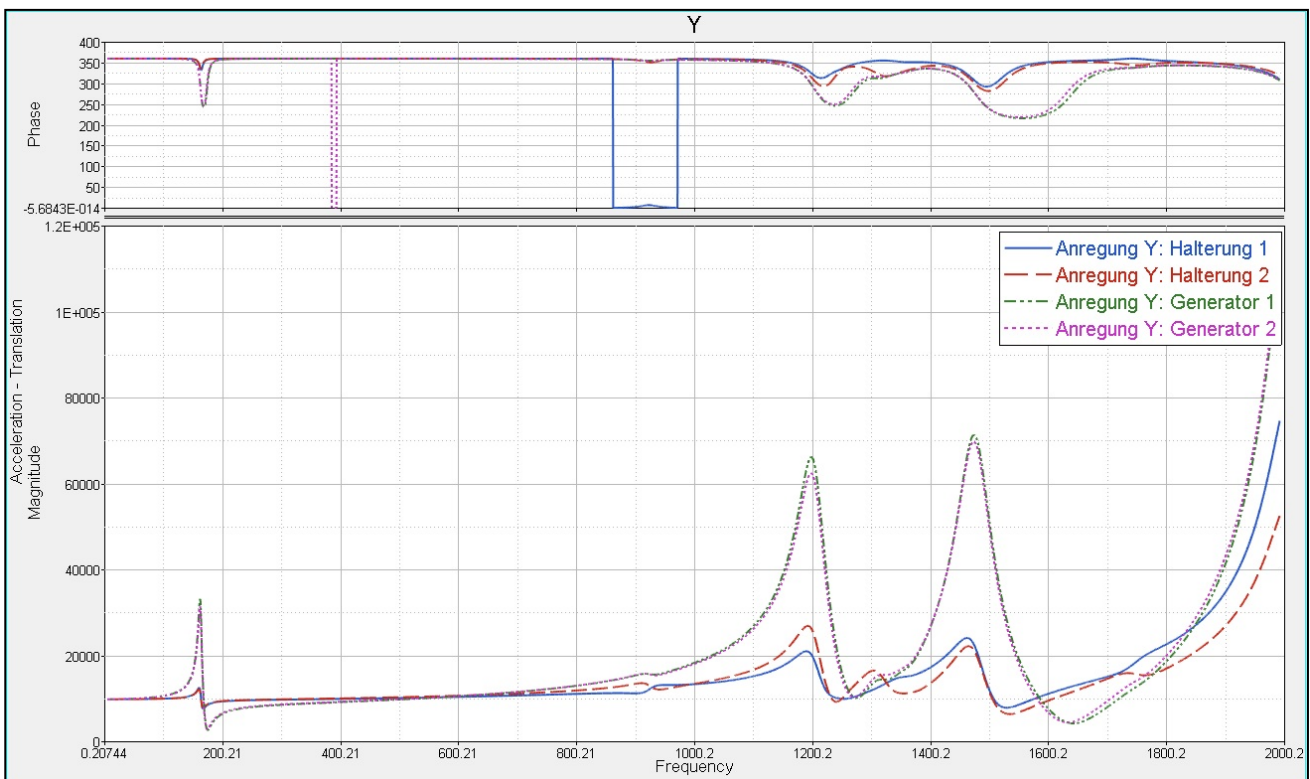
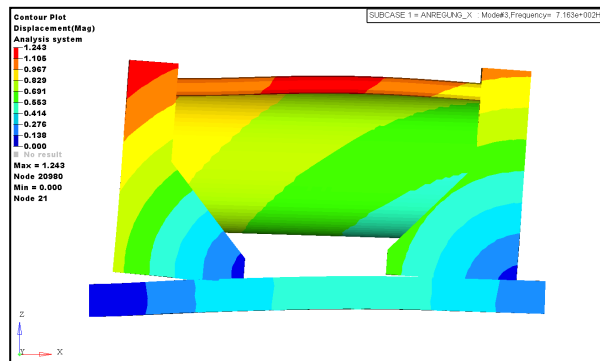


Abbildung 34: Konzept 1 – SOL111 Anregung der Generatoren in Y-Richtung

Interessant ist neben den Eigenfrequenzen der Abstandshülsen, wie sich die Generatoren verschieben. Dies ist in den beiden Diagrammen in Abbildung 33 und Abbildung 34 visualisiert. Die Referenzpunkte, aus denen sich die Kurven ergeben, befinden sich jeweils im Schwerpunkt der Generatoren.

Der Graph in Abbildung 33 entspricht den Erwartungen. Die beiden Halterungen des Konzeptes 1 sind über die Abstandshülsen fest miteinander verbunden. Außerdem zeigen die Versteifungsdreiecke jeweils nach innen, sie stehen damit entgegengesetzt zueinander. Durch diese zwei konstruktiven Merkmale arbeiten die Halterungen bei einer Anregung in

X-Richtung gegeneinander. In der Summe findet damit kaum eine Verschiebung statt. Die Verschiebung bei einer Frequenz von ~720Hz ist in der Animation (Anhang C- 9) verdeutlicht. Gerade bei dieser Animation sei noch einmal darauf hingewiesen, dass dies einem Verstärkungsfaktor von 10 entspricht.



Anhang C- 9: Konzept\_1\_Final\_Generator\_Anregung\_X\_720Hz

Die Halterungen besitzen bei einer Y-Anregung keine Versteifungen in Achsrichtung. Daher ist es plausibel, dass mehrere Frequenzen eine Verschiebung erzeugen (Abbildung 34).

### 7.1.4.2 Konzept 2

Auch für das zweite Konzept werden sowohl eine Modalanalyse wie auch eine Modal Frequency Response durchgeführt. Beim ersten Konzept sind vor allem die Abstandshülsen schwingungsanfällig und wurden auf ihre Resonanz untersucht. Das Konzept 2 besitzt keine Abstandshülsen. Deswegen wird die Analyse auf die Bewegungen der Generatoren und der Halterung ausgelegt.

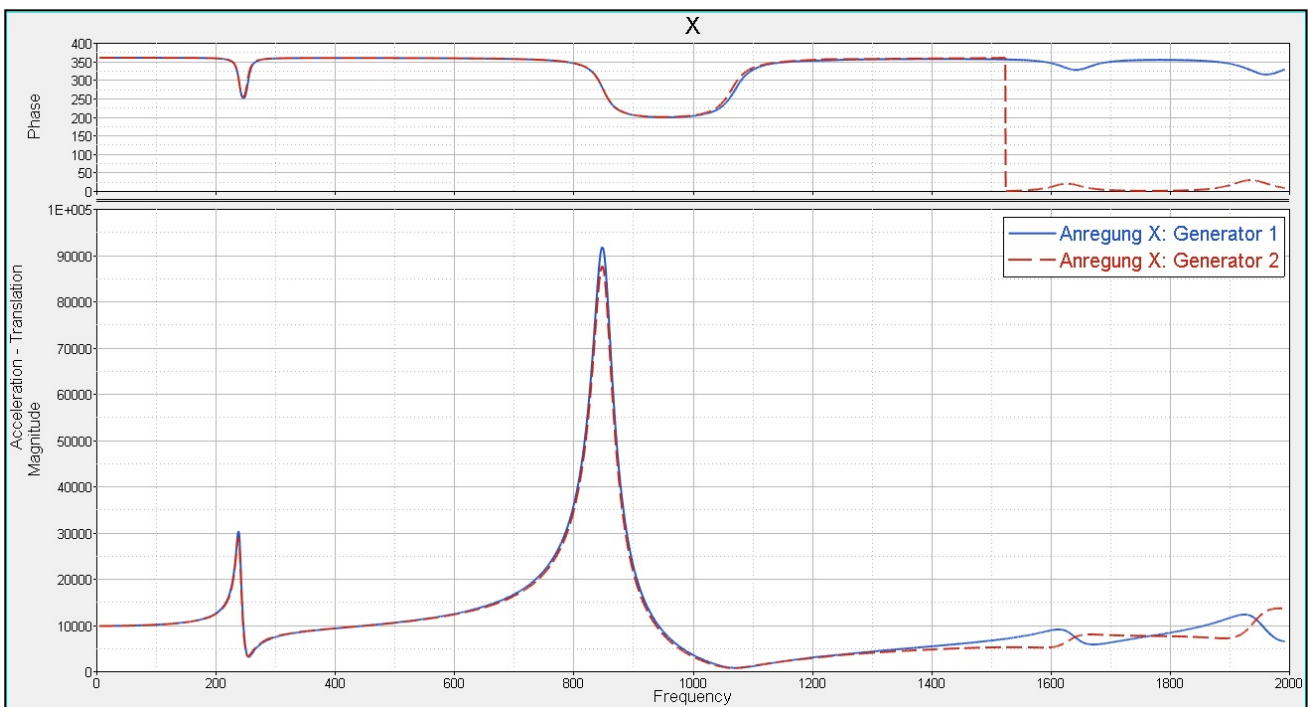
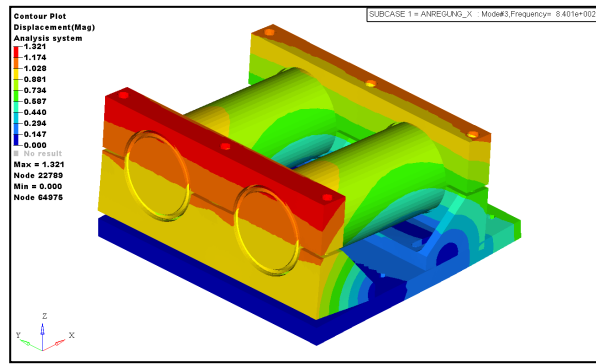


Abbildung 35: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Generatoren in X-Richtung

In X-Anregung ergibt sich eine fast identische Verschiebung. Die Generatoren sind über die gleiche Halterung gekoppelt. Bewegt sich die komplette Halterung, bewegen sich auch die Generatoren im gleichen Maße mit. Das Ergebnis ist damit plausibel. Auch die Modalanalyse (Anhang C- 10) untermauert das.



Anhang C- 10: Konzept\_2\_Final\_Generatoren\_Anregung\_X\_840Hz

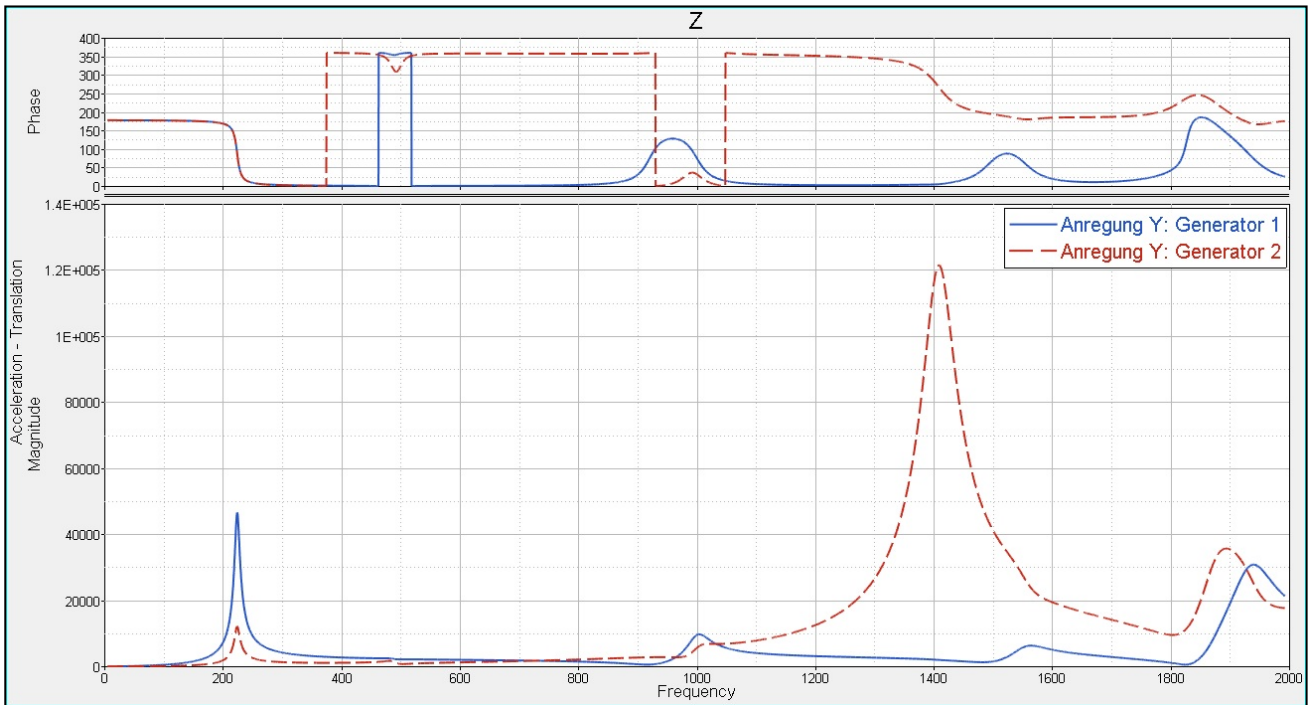
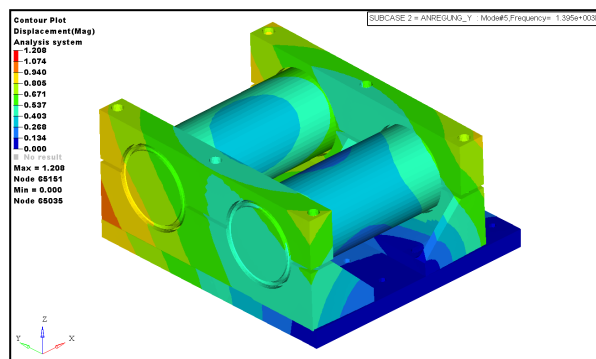


Abbildung 36: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Generatoren in Y-Richtung

Der Graph der Anregung in Y-Richtung zeigt die Z-Verschiebung. Die Halterungen und damit die Generatoren, können sich aufgrund der Geometrie kaum in Y-Richtung bewegen. Eine Anregung der Y-Achse kann aber durchaus eine Z-Verschiebung bewirken, weswegen diese betrachtet wird. Dieses Vorgehen wurde auch schon im vorherigen Verlauf praktiziert. Interessant ist, dass die Generatoren eine starke Abweichung zueinander aufweisen. Diese entsteht, wenn die beiden Halterungen sich zueinander verschieben. Gegenüber Konzept 1 sind die Halterungen nur über den Generator miteinander gekoppelt. Nur die Generatoren dämpfen damit die Bewegungen der Halterung. Dadurch entsteht die große Abweichung in den Verlaufskurven. Wieder einmal wird das Verhalten gut durch die Modalanalyse veranschaulicht, aber auch bestätigt (Anhang C- 11).



Anhang C- 11: Konzept\_2\_Final\_Generatoren\_Anregung\_Y\_1400Hz

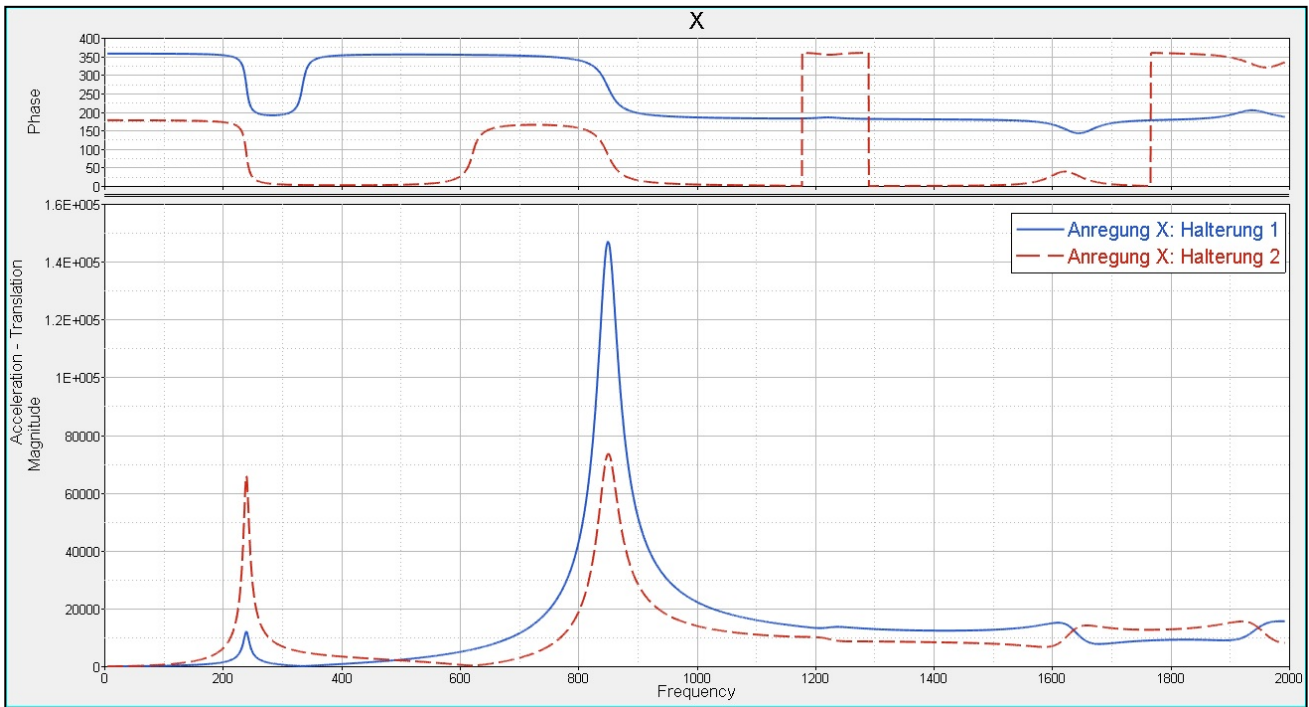


Abbildung 37: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Halterungen in X-Richtung

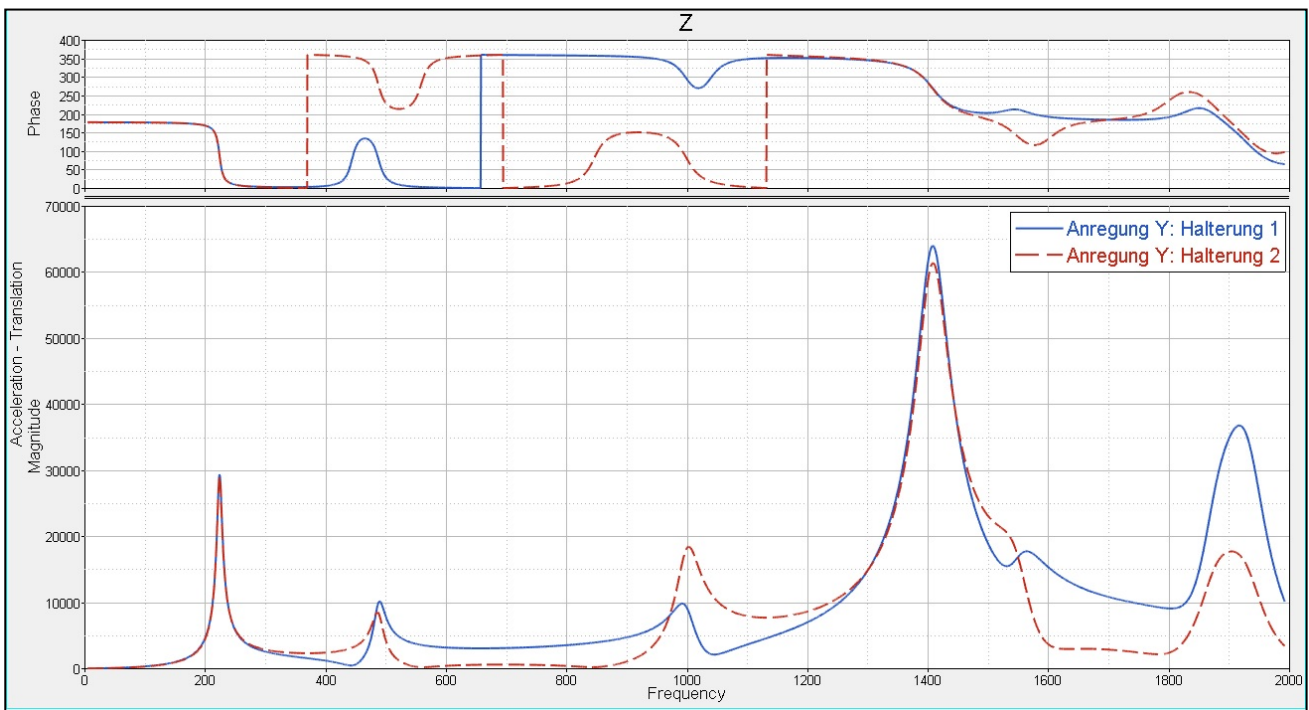


Abbildung 38: Konzept 2 – SOL111 Anregung der Halterungen in Y-Richtung

Abbildung 37 und Abbildung 38 dokumentieren die Verschiebung in der X-beziehungsweise Z-Koordinate der beiden Halterungen. Hierfür befindet sich in der Mitte beider Halterungen ein Referenzpunkt. Die Diagramme zeigen die Frequenzen, bei denen sich die Halterungen stark von der Grundplatte abheben. Beim Konzept 2 können die Halterungen in X-Richtung nicht gegeneinander arbeiten, da sie nicht miteinander gekoppelt sind. Dies war bei Konzept 1 über die Abstandshülsen gewährleistet. Das ist eine höhere Belastung für die Generatoren, weil diese die einzige Verbindung zwischen den Halterungen sind. Reale Tests müssen hier zeigen, ob die Belastung zu hoch ist.

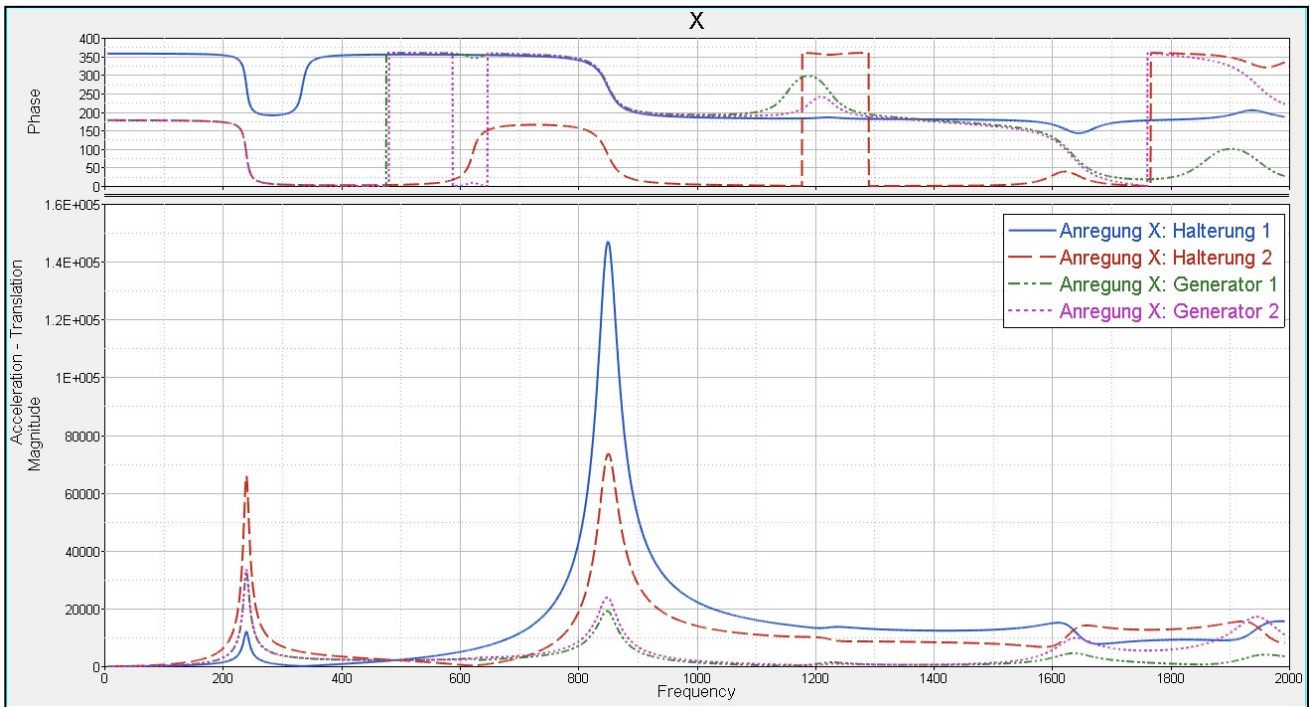


Abbildung 39: Konzept 2 – SOL111 Anregung des Gesamtsystems in X-Richtung

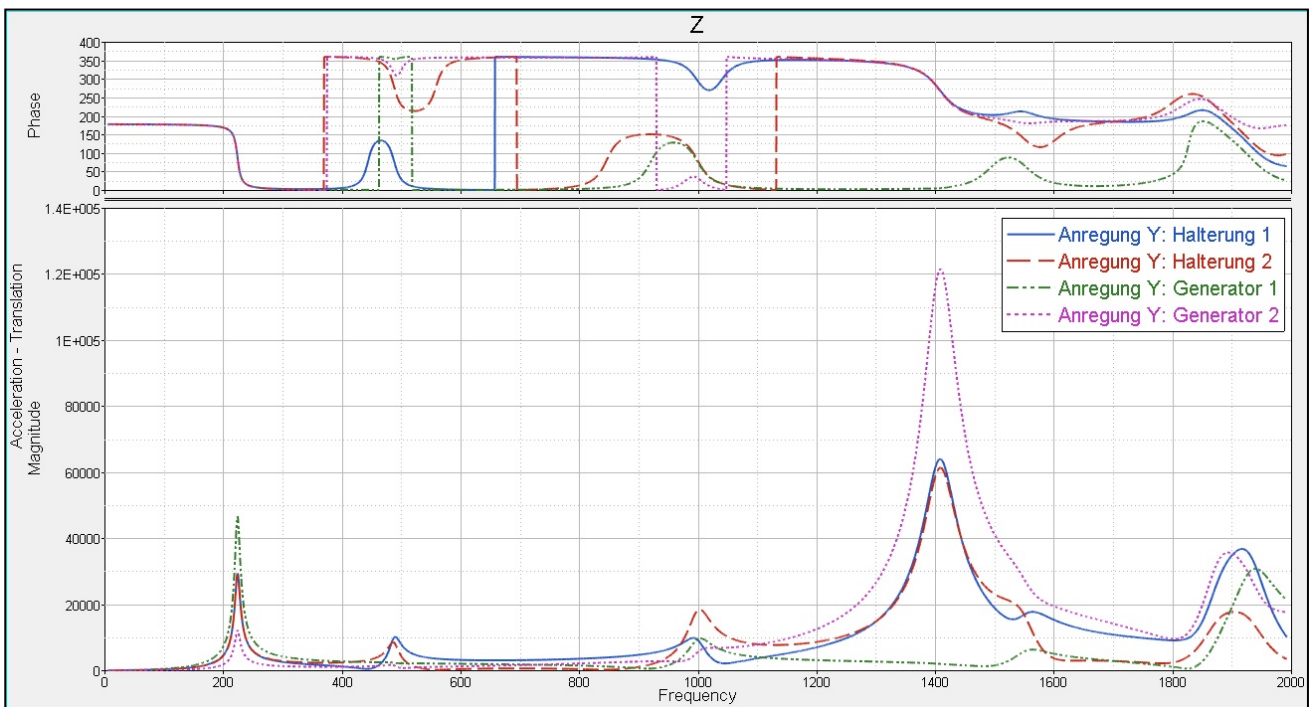


Abbildung 40: Konzept 2 – SOL111 Anregung des Gesamtsystems in Y-Richtung

Werden die Verlaufskurven der Generatoren sowie der Halterungen übereinander gelegt, ergeben sich die Graphen in Abbildung 39 und Abbildung 40. Es lässt sich gut erkennen, dass Generatoren wie Halterungen die gleichen Resonanzen besitzen, bei denen die Verschiebung besonders groß ist. Das zeigt: Erfahren die Halterungen eine große Verschiebung, dann gilt das auch für die Generatoren. Diese Erkenntnis ist nicht selbstverständlich. Der Generator 1 in Abbildung 40 belegt das. Bei ~1400Hz bewegt sich der Generator kaum, obwohl das restliche System sich sehr wohl bewegt.



## 7.2 Statische Analyse – FEM

### 7.2.1 Randbedingungen

Abschließend wird eine *Solution 101 – Linear Static* berechnet. Das ist eine lineare statische Belastung und damit frequenzunabhängig. Durch die SOL101 lassen sich hochbelastete Stellen ermitteln. Bei der SOL101 wird auf die Generatoren eine konstante Kraft aufgebracht. Diese entspricht der maximal auftretenden Kraft während der Schwingversuche. Die Kraft muss zunächst mit Hilfe der Peakbeschleunigung bestimmt werden. Die entsprechenden Werte wurden bereits in Tabelle 4 zusammengetragen.

$$F_{Boeing} = m_{Boeing} * g * n_{Boeing} = 1,39kg * 9,81 \frac{m}{s^2} * 18,3 = 250N \quad (17)$$

Diese Kraft soll im Schwerpunkt der Generatoren angreifen. Dafür wird angenommen, dass sich die Masse gleichmäßig um die Längsachse der Generatoren verteilt. Dies entspricht aber nicht ganz der Realität. Zunächst müssen an den Stirnseiten der Generatoren RBE2-Elemente definiert werden.

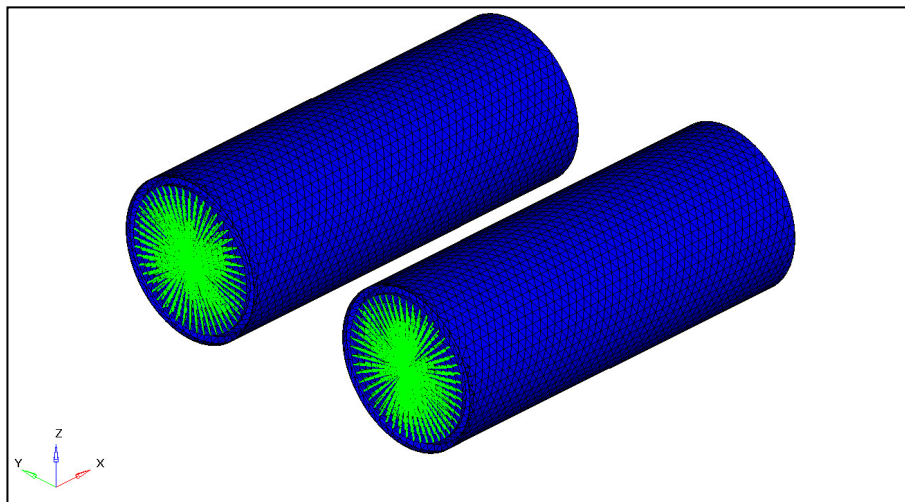


Abbildung 41: RBE2 mit Generatoren

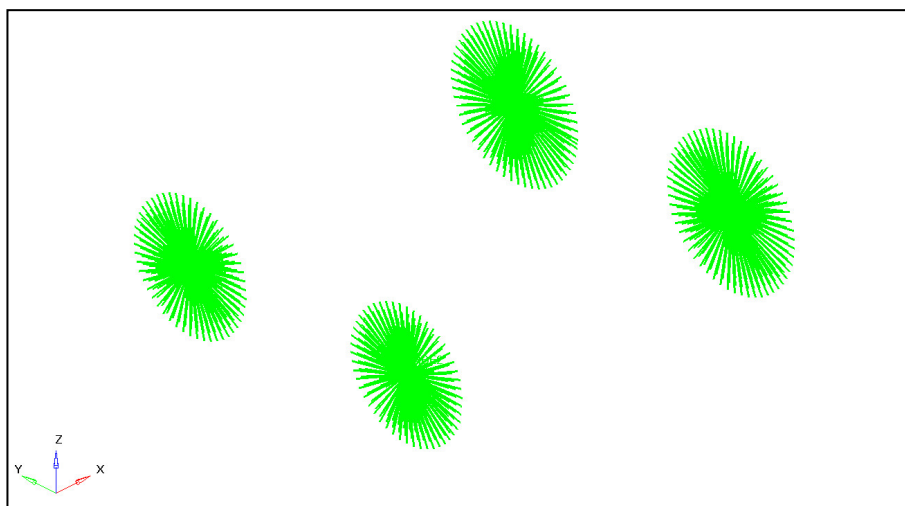


Abbildung 42: RBE2 ohne Generatoren

Die RBE2-Elemente werden miteinander verbunden und die Kraft greift am Mittelpunkt der RBE2-Verbindung an. Das wirkt, als würde die Kraft im Schwerpunkt der Generatoren angreifen. Auch hier muss jeweils wieder ein Fall für die X- wie auch die Y-Richtung definiert werden.

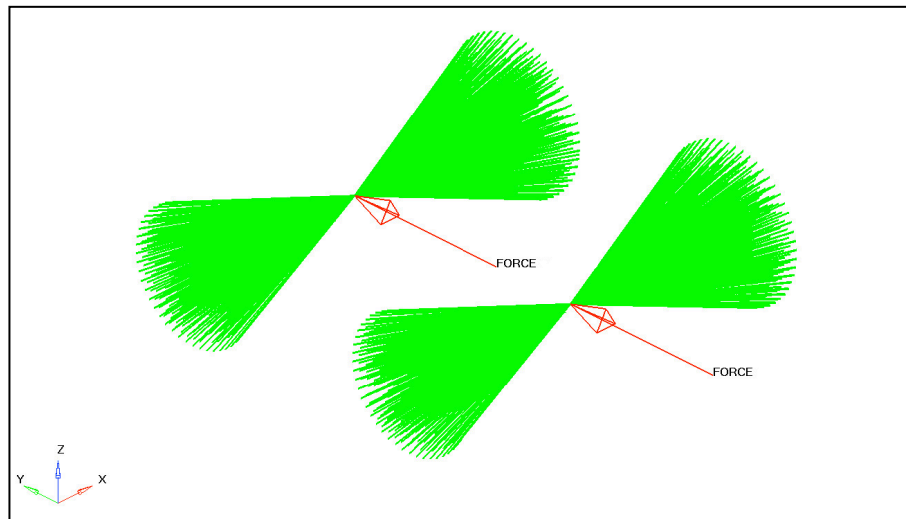


Abbildung 43: Verbundene RBE2-Elemente mit angreifender Kraft

Dieses Vorgehen ist bei beiden Konzepten identisch. Auch alle anderen Randbedingungen sind unverändert geblieben. Einzige Ausnahme ist die Grundplatte, sie wird bei dieser Untersuchung nicht aus einer Richtung angeregt, wie es bei der SOL103 und SOL111 der Fall war. Aus diesem Grund muss die Grundplatte an drei Seiten fest eingespannt werden. Damit ist eine Bewegung der Platte unmöglich. Das ist auch gewünscht, weil sich bei der statischen Last die Grundplatte sonst mit verformen würde. Dies entspricht aber nicht der Wirklichkeit.

## 7.2.2 Ergebnisse

### 7.2.2.1 Konzept 1

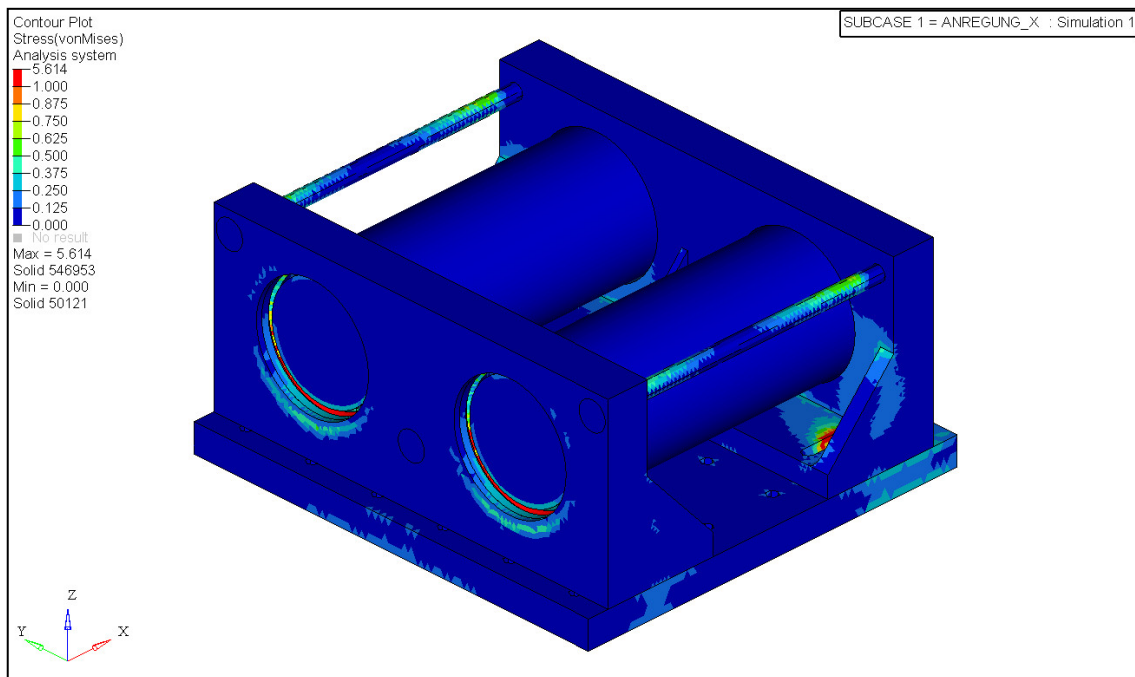


Abbildung 44: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht

Abbildung 44 zeigt die Auswirkungen der Belastung in X-Richtung. Es lässt sich gut erkennen, dass gerade der dünnwandige Rand der Halterung, an dem die Generatoren anliegen, belastet wird. Aber auch die Abstandshülsen werden in dieser Richtung beansprucht. Wie bereits erwähnt, arbeiten die Halterungen in der X-Richtung gegeneinander, was die Belastungen in den Abstandshülsen erklärt.

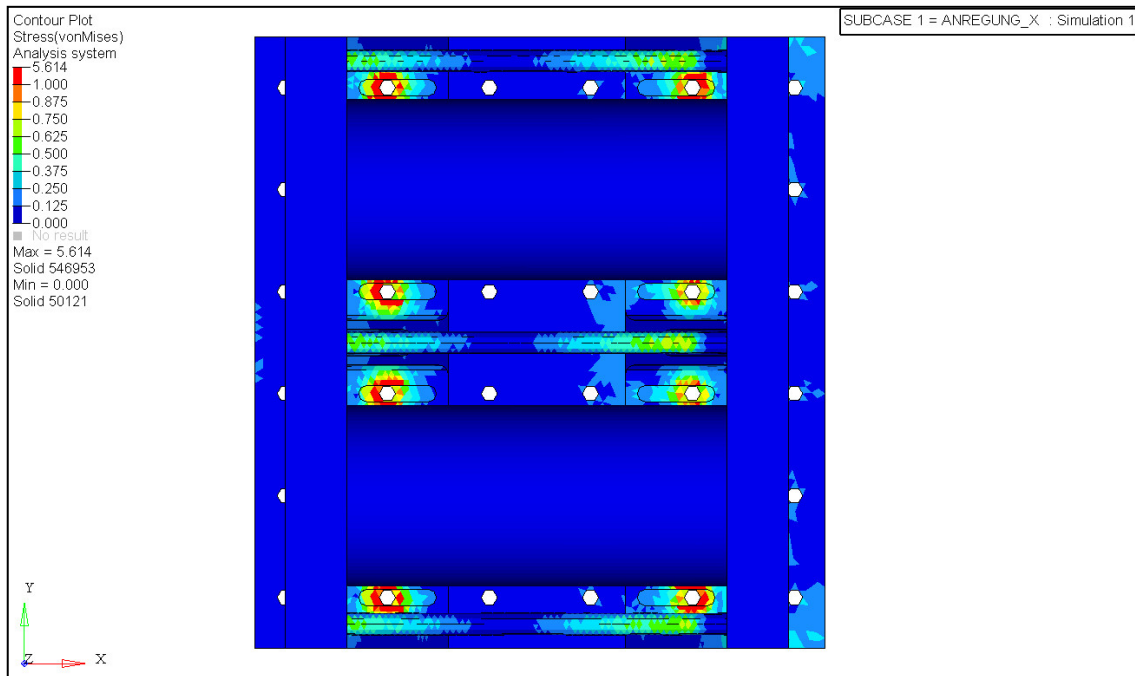


Abbildung 45: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Draufsicht

In der Draufsicht sind die Belastungen der Abstandshülsen noch besser zu erkennen. Aber auch die Befestigungen der Halterungen an der Grundplatte werden stark belastet.

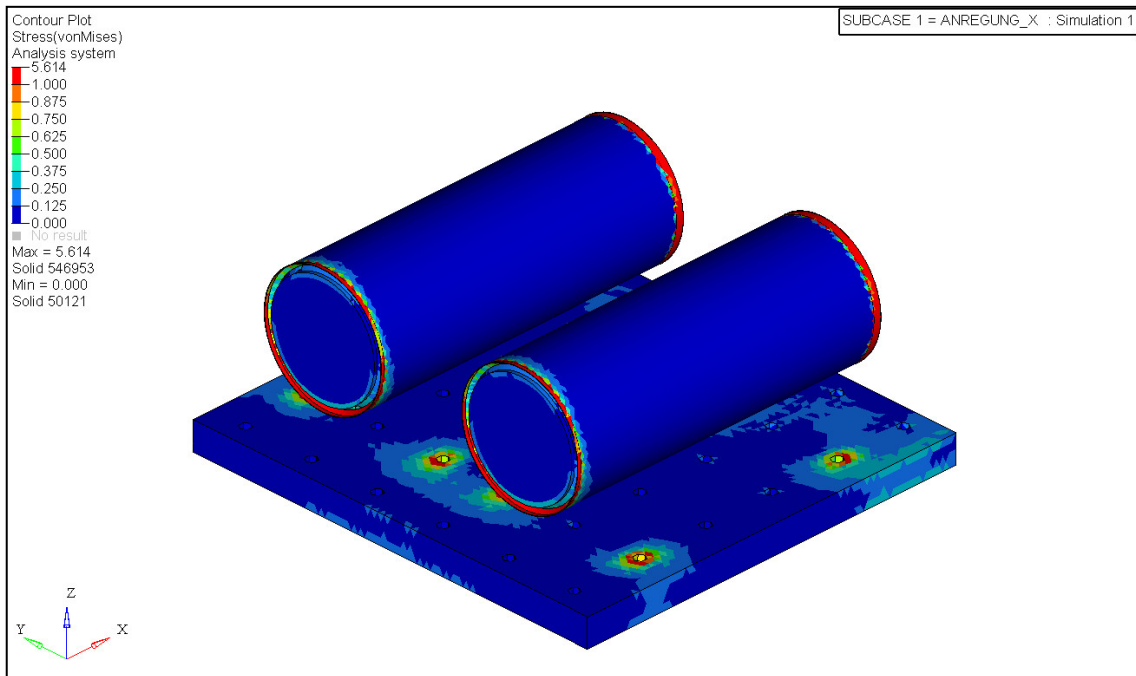


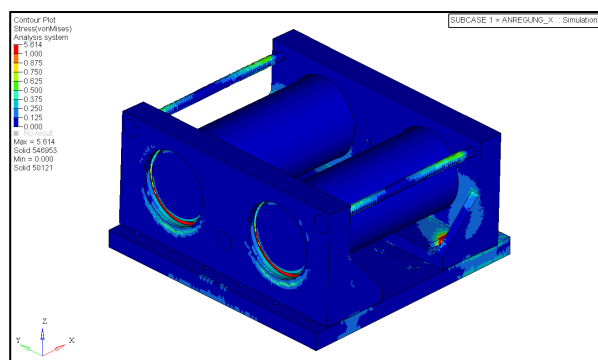
Abbildung 46 Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen

Bei Konzept 1 sind die Belastungen des Generatorrandes von großer Bedeutung. Die Klemmkraft zum Fixieren des Generators wird nur über den Generatorrand eingeleitet. Es gibt einige Aspekte, die bei diesem Ergebnis berücksichtigt werden müssen und die dazu führen, dass die Belastung in der Analyse höher ausfällt.

- Die Silikonringe haben über die Materialkennwerte zwar weiche Eigenschaften erhalten, es werden aber keine Verformungen im Modell berücksichtigt. In der Realität drücken sich die Generatorränder in die Silikonringe. Das ist auch gewollt, um Fertigungstoleranzen auszugleichen. Diese Eigenschaft wird in der FEM-Analyse aber nicht berücksichtigt, was zu einer höheren Belastung führt.
- Die Materialkennwerte der Generatoren sind ein Mittelwert. So wurde das Elastizitätsmodul geringer bewertet, obwohl die Generatoren aus Edelstahl gefertigt sind. Grund sind die sehr dünnen Wandstärken von 0,2 bis 0,3mm. Der Generatorrand ist eine Ausnahme. Deckel und Mantel des Generators sind am Rand miteinander verschweißt. Dadurch ist der Rand sehr steif. Auch dies ist im Modell nicht berücksichtigt, was ebenfalls zu höheren Ergebnissen führt.

Zusammengefasst: Die Kräfte sind höher, der Generatorrand ist weicher als in der Realität. Trotzdem wird der Rand hoch belastet. Die Ergebnisse in der X-Richtung bestätigen die Erwartungen. Auch die Animation zeigt, dass sich die Halterung wie bei der Schwingungsanalyse verhält, was die Richtigkeit unterstreicht.

Hinweis: Die nachfolgenden Animationen der statischen Analyse haben einen Verstärkungsfaktor von 1000 statt wie bisher 10.



Anhang C- 12: Konzept\_1\_Final\_Statisch\_ISO\_X

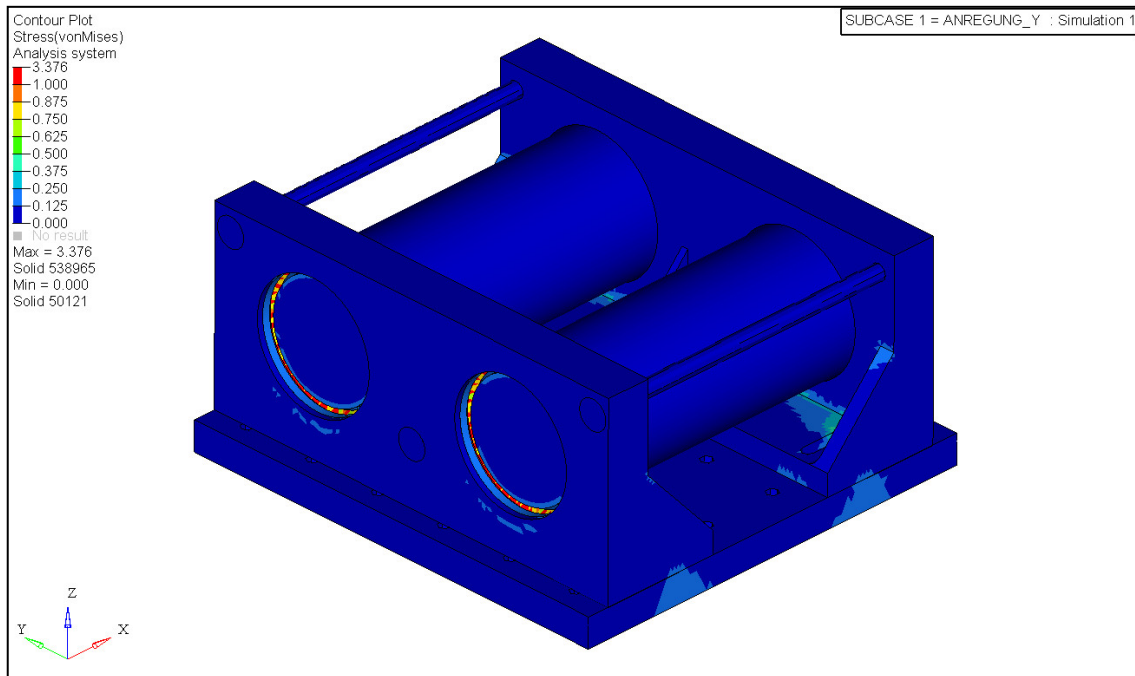


Abbildung 47: Konzept 1 – statische Belastung in Y-Richtung isometrische Ansicht

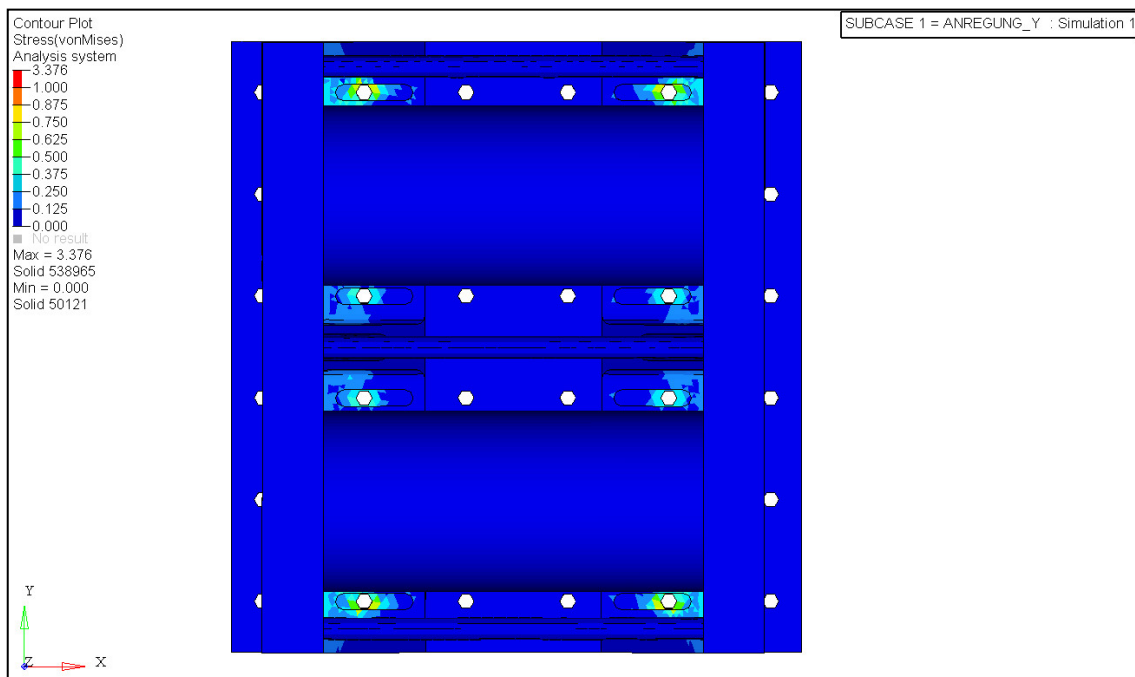
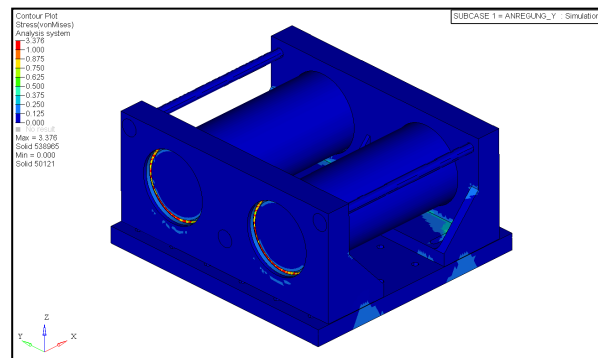


Abbildung 48: Konzept 1 – statische Belastung in Y-Richtung Draufsicht

Bei der Belastung in Y-Richtung fällt sofort auf, dass die Abstandshülsen kaum Kräfte aufnehmen müssen. Dies entspricht auch den Erwartungen. Die Kraft greift nicht in Längsrichtung der Abstandshülsen an. Auch die Halterungen bewegen sich bei dieser Belastung nicht in X-Richtung, wodurch die Abstandshülsen keinen Zug- oder Druckkräften ausgesetzt sind.

Die Animation visualisiert, wie die Halterungen ein Kippen in Y-Richtung entwickeln. Dabei entstehen aber keine Bewegungen in X-Richtung. Außerdem ist erkennbar, dass sich die Generatoren innerhalb der Halterungen in Y-Richtung bewegen. Dies ist auf die weichen Materialeigenschaften der Silikonringe zurückzuführen und damit realitätsnah. Dieser Umstand wurde bereits in Abschnitt 6.1.3.1 untersucht.



Anhang C- 13: Konzept\_1\_Final\_Statisch\_ISO\_Y

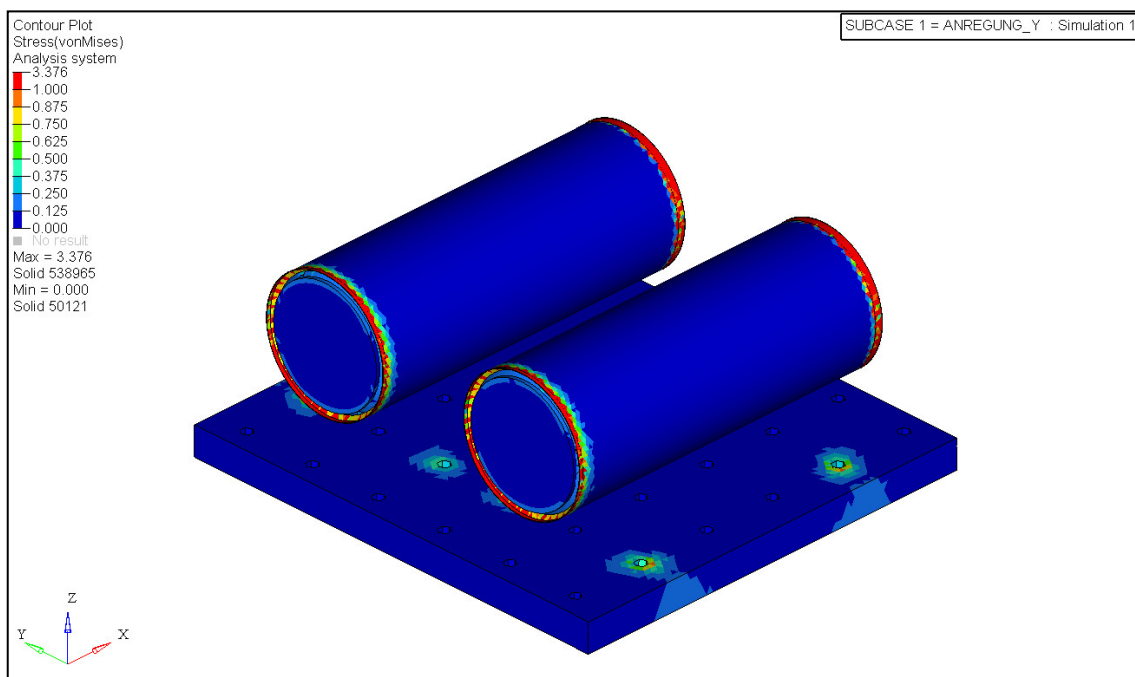


Abbildung 49: Konzept 1 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen

Die Belastungen der Generatorränder und der Verschraubungen mit der Grundplatte sind unverändert hoch.

### 7.2.2.2 Konzept 2

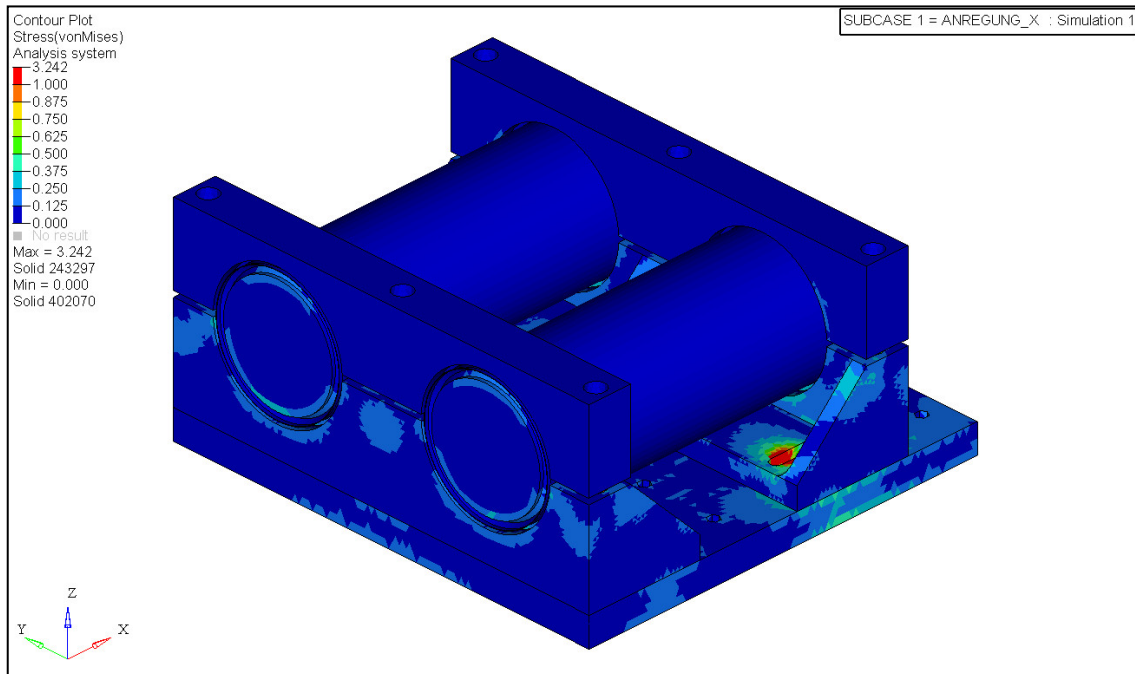


Abbildung 50: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht

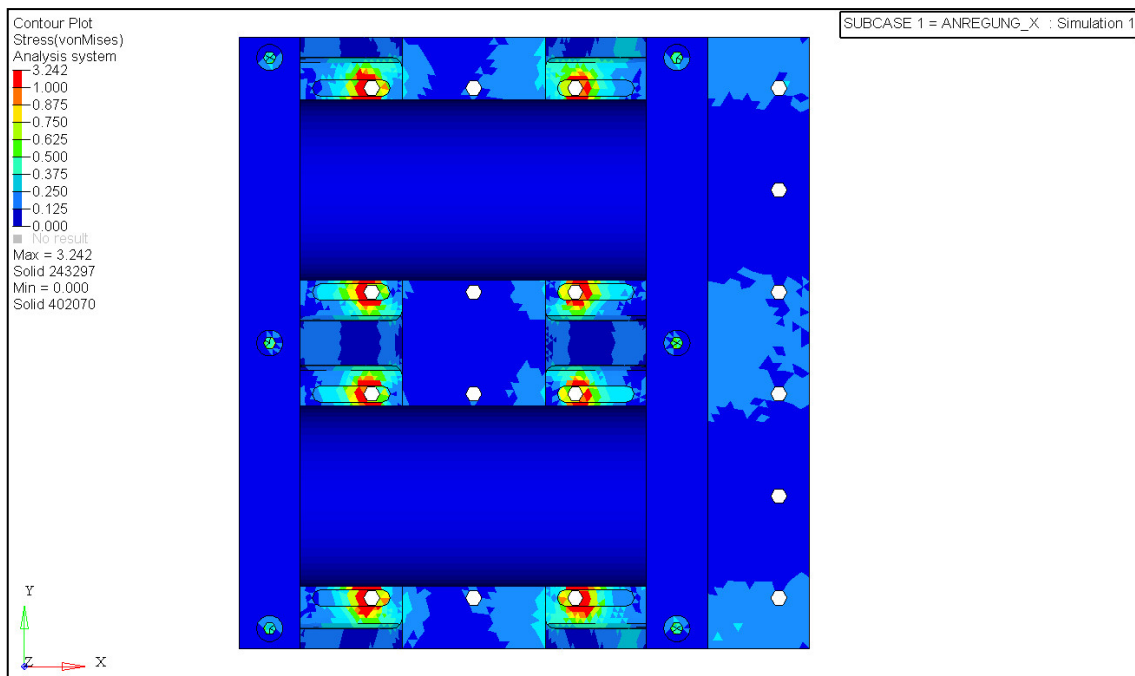


Abbildung 51: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung isometrische Ansicht

Bei Konzept 2 fällt die Belastung etwas anders aus. Die Versteifungsdreiecke werden hier stärker belastet als beim ersten Konzept. Außerdem wird die Halterung entlang des Generators belastet. Die Oberschalen der Halterungen erfahren fast keine Belastung. Sie bringen nur die Klemmkraft auf und werden daher nicht stark beansprucht. Die Generatoren werden deutlich entlastet gegenüber Konzept 1. Die Silikonringe haben eine sehr viel größere Fläche als der Generatorrand. Dadurch sinkt die Flächenbelastung deutlich.

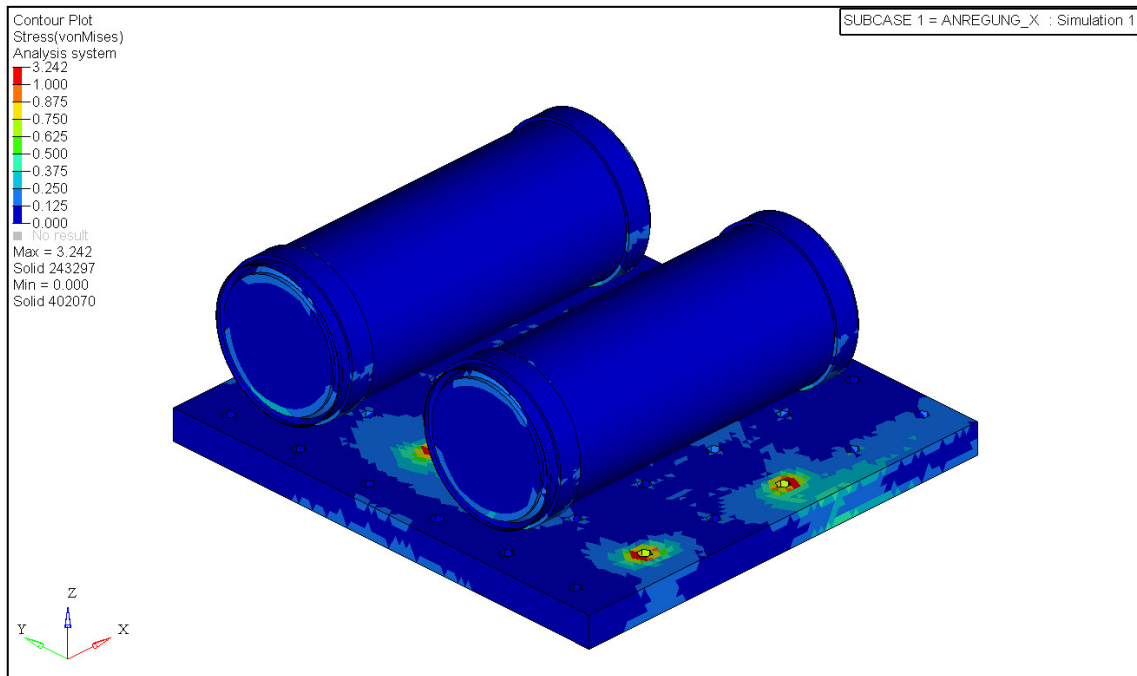
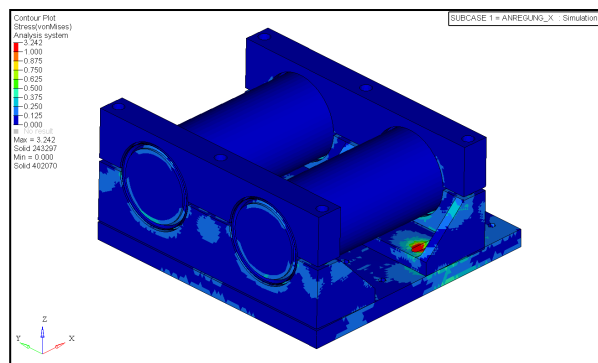


Abbildung 52: Konzept 2 – statische Belastung in X-Richtung Ansicht ohne Halterungen

In der Animation wird die Richtigkeit wieder bestätigt. Die Halterung verhält sich wie bei der Schwingungsanalyse.



Anhang C- 14: Konzept\_2\_Final\_Statisch\_ISO\_X

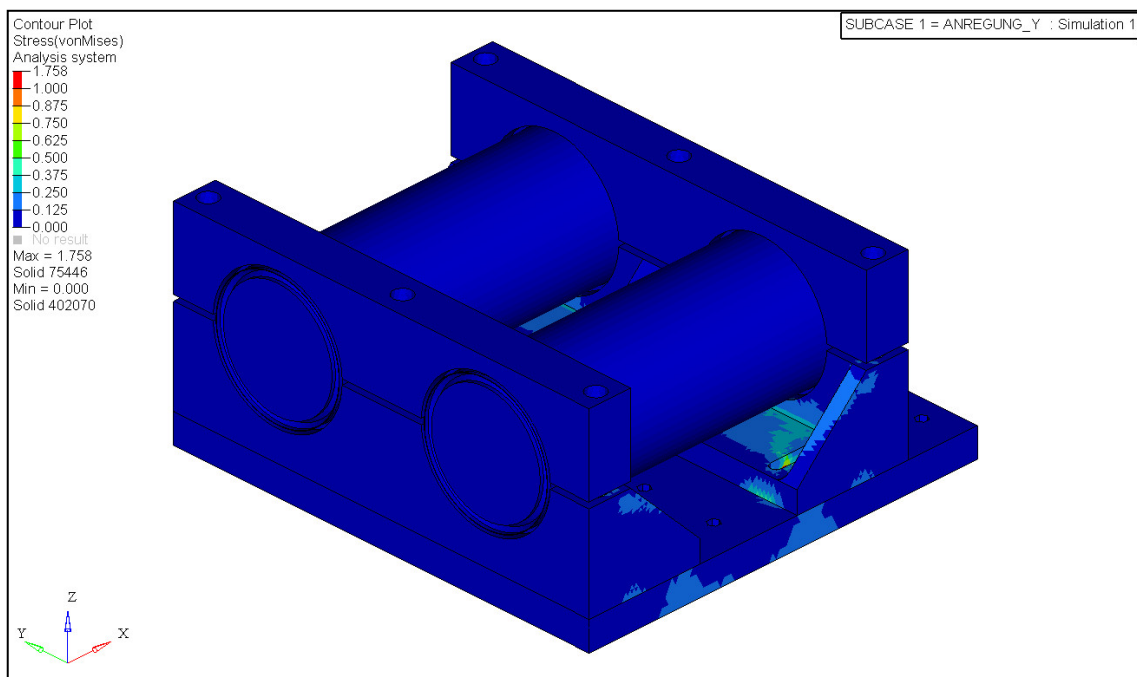


Abbildung 53: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung isometrische Ansicht



Bei einer Anregung in Y-Richtung nimmt die Belastung an der Halterung entlang der Generatorausparung deutlich ab. Die Halterung muss nicht mehr gegen die Generatoren arbeiten. In X-Richtung besteht die Gefahr, dass die Generatoren aus der Halterung rutschen. Dies ist in Y-Richtung aufgrund der Geometrie nicht möglich.

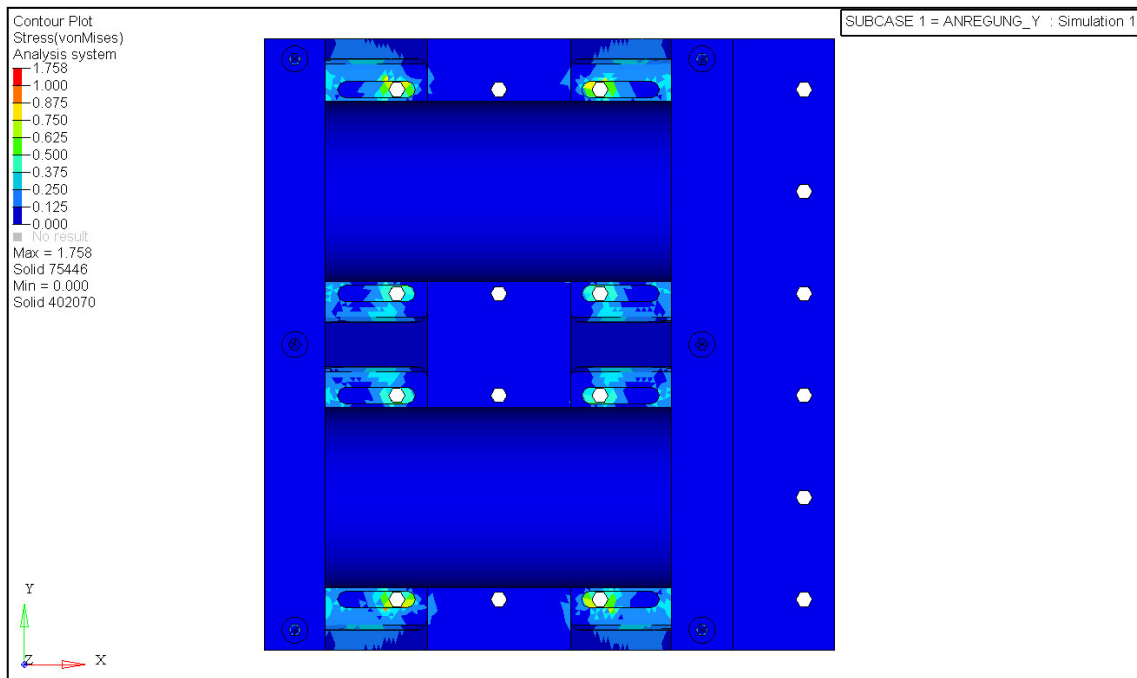
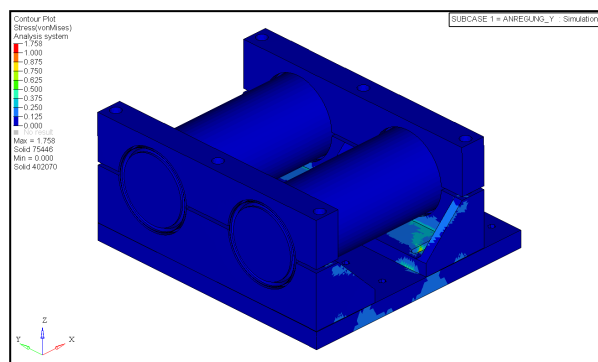


Abbildung 54: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung Draufsicht

In der Draufsicht ist zu erkennen, dass die Belastung der Halterung in den Versteifungsdreiecken zugenommen hat. Die Kräfte rund um die Verschraubungen haben abgenommen. In X-Richtung kann die Halterung kippen, da die Schrauben alle in einer Reihe liegen. Die Halterung kann daher um eine feste Achse kippen. Mit Blick auf eine Y-Belastung liegen aber vier Schrauben-Reihen vor. Dadurch und durch die Breite der Halterung wird das Kippen deutlich unterbunden, wodurch auch die Belastung an den Verschraubungen abnimmt.



Anhang C- 15: Konzept\_2\_Final\_Statisch\_ISO\_Y

Die Animation zeigt, wie die Halterung um die X-Achse kippt. Gerade bei dieser Animation sei noch einmal auf den Verstärkungsfaktor von 1000 hingewiesen. Trotz dieser Verstärkung fallen die Bewegungen minimal aus. In Realität sind sie damit de facto nicht vorhanden.

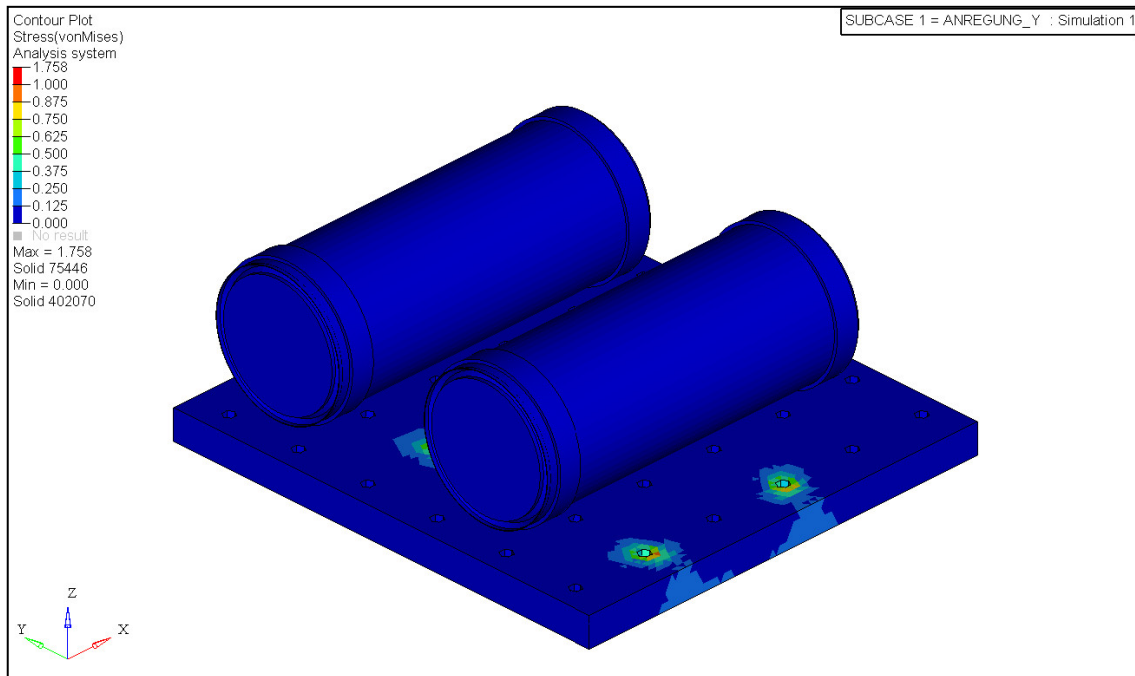


Abbildung 55: Konzept 2 – statische Belastung in Y-Richtung Ansicht ohne Halterungen

Gegenüber der Anregung in X-Anregung nimmt die Belastung an den Generatoren weiter ab. Auch dies ist wieder in der Geometrie der Halterungen begründet. Die Generatoren können sich aus der Halterung nicht lösen. Daher fallen auch die Relativbewegung zwischen Halterung und Generator sehr gering aus. Die Relativbewegung ist nur aufgrund der weichen Silikonringe möglich.

## 7.3 Testversuche

### 7.3.1 Testbedingungen

Im Anschluss zu den theoretischen Untersuchungen nach der Finite Elemente Methode werden die gefertigten Halterungen auf einem Shaker untersucht.

Es werden zwei Test-Arten angewendet:

- Response Search je Achse
- Endurance Test für jede Achse für je 60min

Um Vergleichsergebnisse zu erhalten, werden die genannten Tests sowohl mit den zwei neuen Konzepten wie auch mit der bestehenden Halterung durchgeführt. Zusätzlich wird ein Response Search an Konzept 1 vorgenommen, bei dem sich die Messsensoren auf den Abstandshülsen befinden. Somit ergeben sich insgesamt 19 Testläufe.

Der Endurance Test wurde bereits in Abschnitt 3 erklärt. Es wird aber kein Frequenzprofil nach DO-160F, sondern ein spezielles Boeing-Frequenzprofil gefahren. Die Flugzeughersteller entscheiden selbst, mit welchen Profilen ihre Generatoren getestet werden.

Beim Response Search wird ein Sinussignal erzeugt mit 3 bis 2000Hz. Auch bei der FEM-Analyse wurde mit einem Sinussignal gearbeitet. Die FEM-Analyse hat daher weiterhin Bestand, auch wenn nicht nach DO-160F getestet wird. Die DO-160F wurde lediglich zur Beurteilung der Eigenfrequenzen herangezogen, ging aber nicht in die Berechnung mit ein. Die Profile von Boeing und der DO-160F ähneln sich zudem. Angeregt wird jeweils mit 0,5g.

Bei den realen Tests ist die Achsdefinition gegenüber Abbildung 3 verändert. Das Achsensystem für die Testversuche ist abhängig vom Flugzeughersteller und genauso von seinem jeweiligen Generatortyp. Die Achsen sind wie folgt definiert:

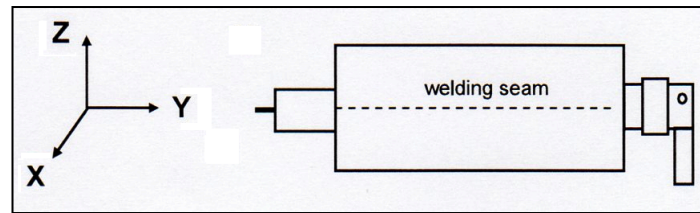


Abbildung 56: Achsdefinition bei Shaker-Tests

*Hinweis: Bei nachfolgenden Achsenbezeichnungen wird sich auf das System aus den Shaker-Tests bezogen, außer es ist explizit anders angegeben.*

### 7.3.2 Aufbau

Für die Shaker-Tests müssen je zwei Regelsensoren und Messsensoren angebracht werden. Bei beiden Sensortypen handelt es sich um Beschleunigungssensoren. Die Regelsensoren sind für den Shaker zur Frequenzregelung entscheidend. Wichtig ist, dass die gewünschte Frequenz am Generator ankommt. Die Frequenz, die der Shaker erzeugen muss, damit über die Halterung die gewünschte Anregung angreift, kann sich unterscheiden. Aus diesem Grund wird über die zwei Regelsensoren die Frequenz an der Halterung ermittelt. Der Shaker regelt dann nach dem Mittelwert dieser zwei Sensoren. Die Messsensoren ermitteln die auftretenden Beschleunigungen direkt am Generator. Die Sensorpositionen sind anhand von Konzept 1 dargestellt. Bei Konzept 2 befinden sich die Sensoren an identischer Stelle.

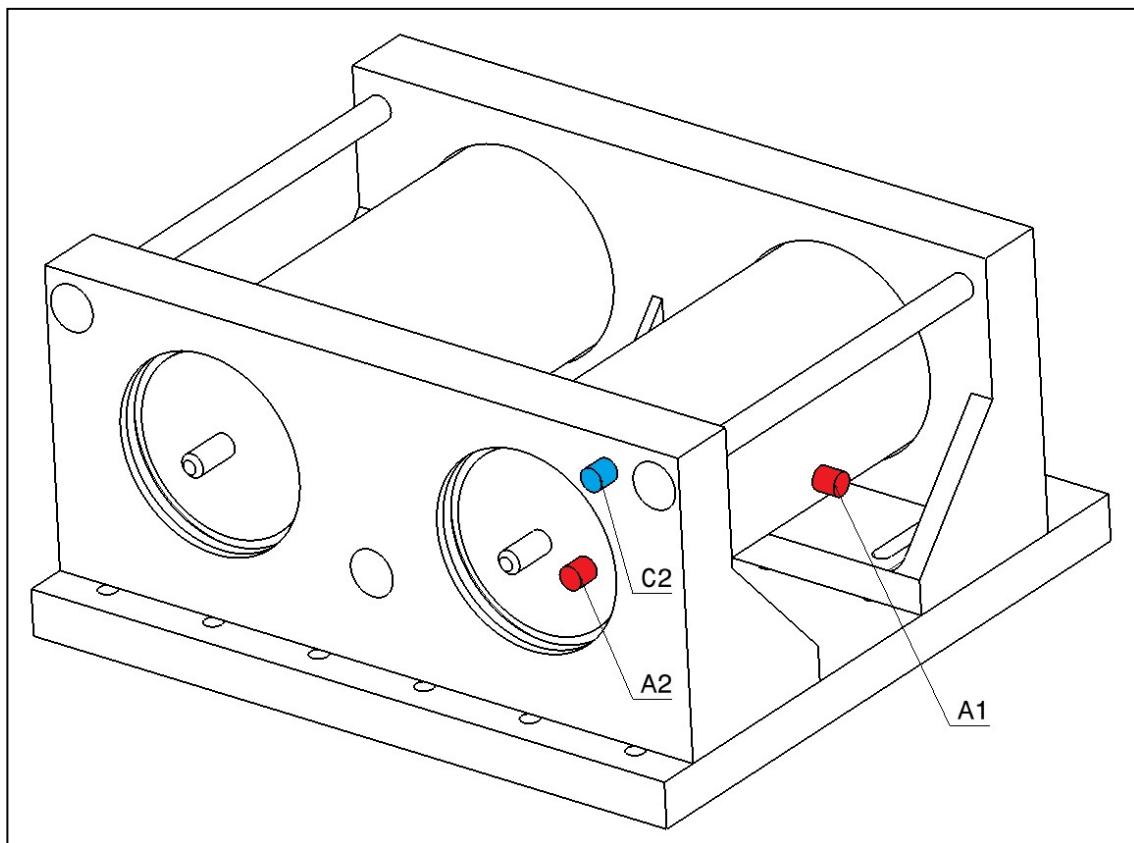


Abbildung 57: Sensorposition Konzept 1 – Vorderseite

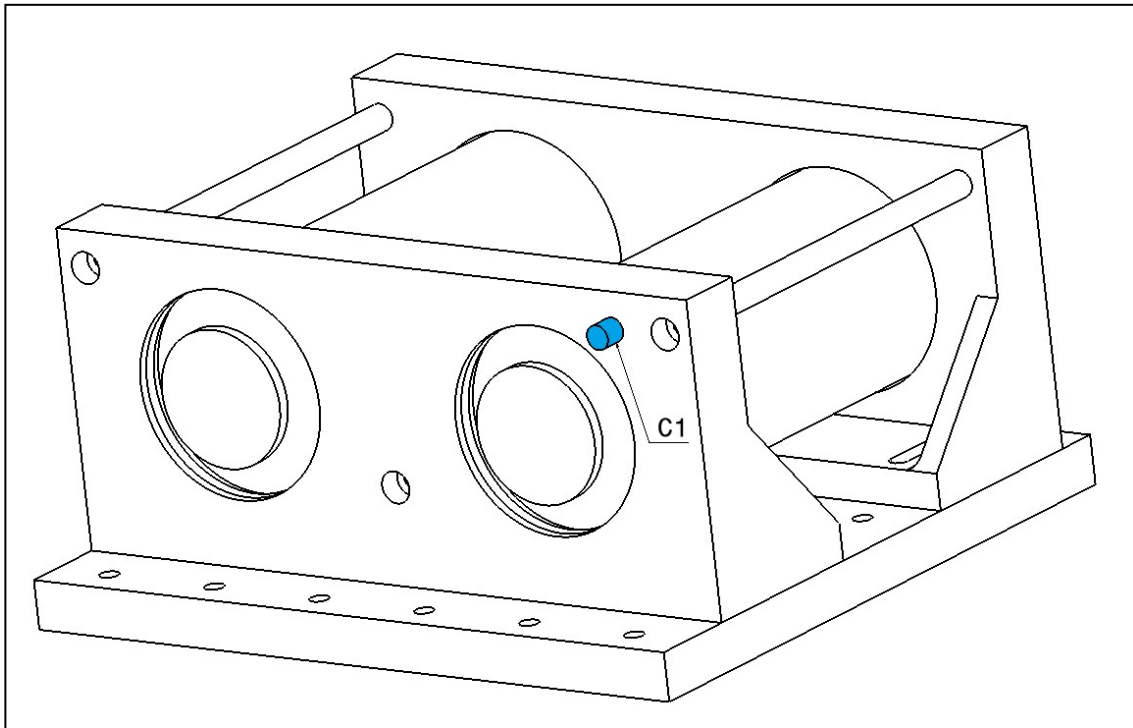


Abbildung 58: Sensorposition Konzept 1 – Rückseite

A1 und A2 sind die Messsensoren am Generator, C1 und C2 die Regelsensoren für den Shaker. Bei der bisherigen Halterung ist es nicht möglich, die Regelsensoren direkt an der Halterung zu befestigen. Sie werden daher an der Shaker-Grundplatte fixiert. Auf diesen Umstand wird im weiteren Verlauf noch näher eingegangen.

### 7.3.3 Response Search

#### 7.3.3.1 Vorwort

Im Folgenden müssen immer zwei Diagramme in Kombination betrachtet werden. Das eine Diagramm zeigt die Anregung, die durch den Shaker erzeugt wird und damit den Verlauf der Regelsensoren. Diese sind im Diagramm als  $Sensor\_1(f)$  und  $Sensor\_2(f)$  aufgeführt. Das andere Diagramm dokumentiert den Graph der Messsensoren.  $Sensor\_3(f)$  entspricht A1 und  $Sensor\_4(f)$  entspricht A2 (siehe Abbildung 57). Ziel ist es, möglichst nah an der gewünschten Frequenz und Anregung zu sein. In den Diagrammen ist dies die  $profile(f)$  Linie. Alles oberhalb dieser Linie stellt eine Verstärkung, alles unterhalb stellt eine Dämpfung der Frequenz dar. Die Diagramme zeigen die Beschleunigungen die bei der jeweiligen Frequenz auftreten. Zu beachten ist die logarithmische Achsenbezeichnung und die veränderte Achsendefinition.

#### 7.3.3.2 Bisherige Halterung

Abbildung 59 zeigt die Einbauposition am Shaker in X-Anregung. Um die Z-Anregung zu erzeugen, wird der Generator lediglich um  $90^\circ$  in der Halterung gedreht. Die Halterung weist damit weiterhin dieselbe Position auf. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf bei der Betrachtung der Z-Achse keine Einbauposition aufgeführt.

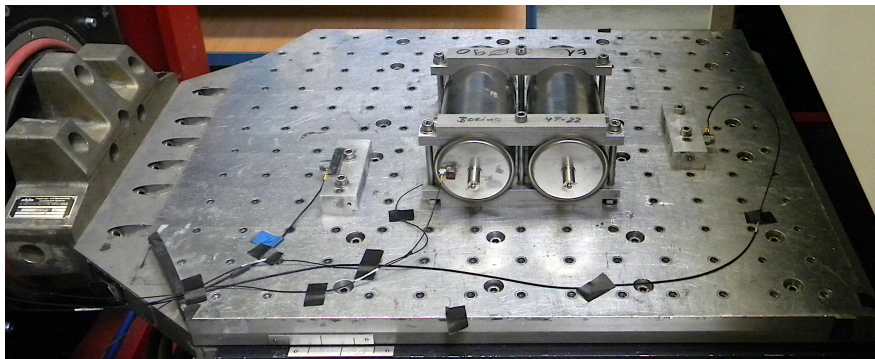


Abbildung 59: Einbauposition in X-Richtung – bisherige Halterung

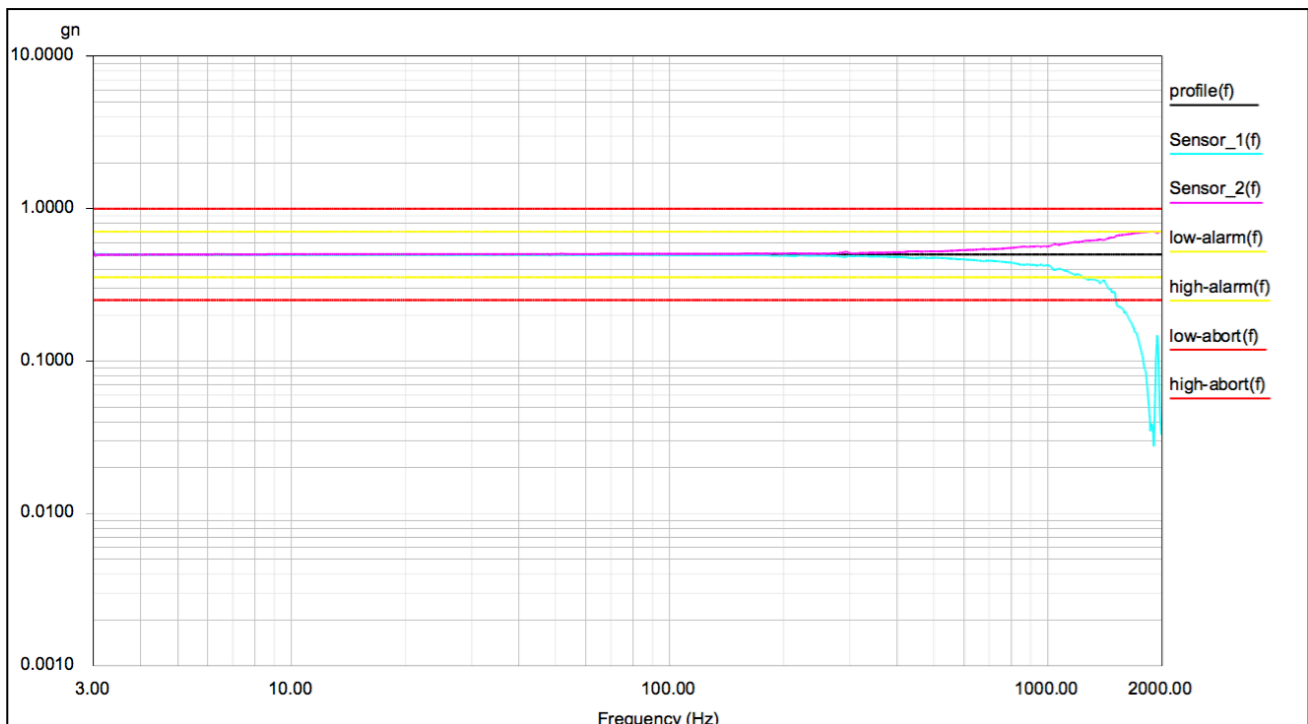


Abbildung 60: Shaker-Regelung bisherige Halterung – X-Richtung (RS)

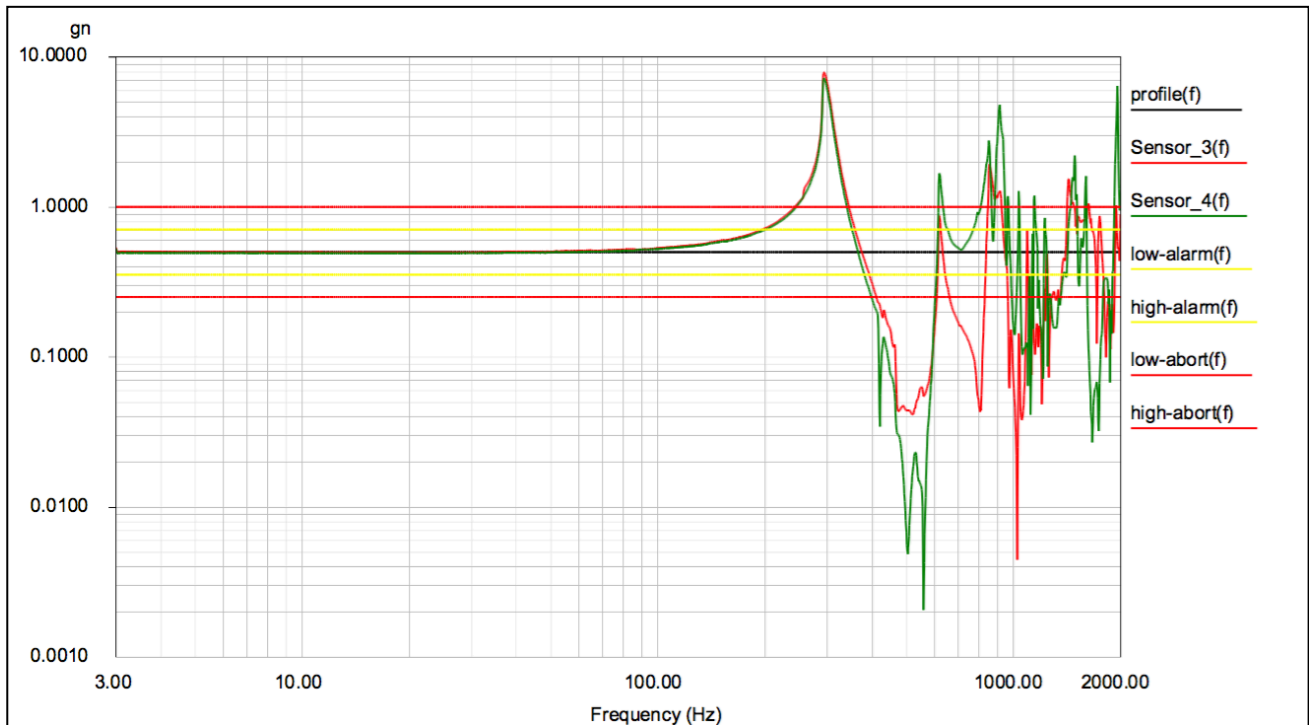


Abbildung 61: Sensoren am Generator bisherige Halterung – X-Richtung (RS)

Bei der bisherigen Halterung entsteht bis 100Hz keine Abweichung von der Profillinie. Der erste Peak zeigt sich bei  $\sim 300$ Hz. Im weiteren Verlauf wird deutlich, dass es sich hierbei um ein Eigenverhalten des Generators handelt. Dieser Peak tritt bei jeder Halterung und bei jeder Achse auf. Die Halterungen beeinflussen diesen Peak, aber sie erzeugen ihn nicht. Es ist ein Phänomen, das unabhängig von der Halterung entsteht.

Zwischen 500 und 1000Hz treten Dämpfungseffekte auf. Zwischen 1000 und 2000Hz befinden sich die Messwerte zentrierter an der Profillinie. Gegenüber dem Bereich von 3 bis 100Hz treten hier deutliche Beschleunigungen auf. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Bereich Eigenfrequenzen der Halterungen oder des Generators selbst liegen. Mit zunehmend steigender Frequenz steigt auch die Anregung, die der Shaker erzeugen muss (Abbildung 60). Aufgrund der logarithmischen Darstellung wird der Bereich von 1000 bis 2000Hz sehr klein, in Wahrheit entspricht er dem halben Spektrum.

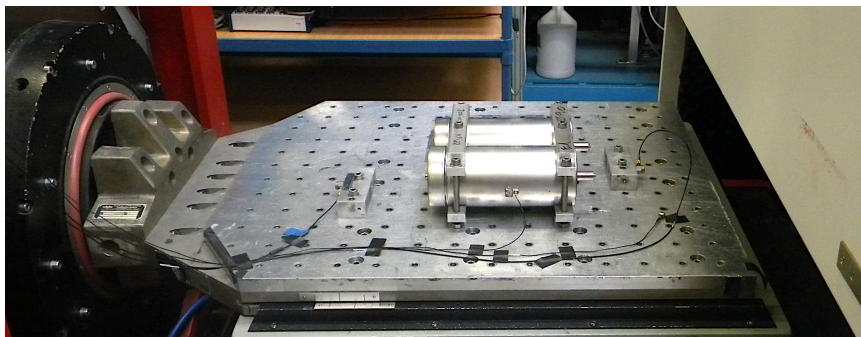


Abbildung 62: Einbauposition in Y-Richtung – bisherige Halterung

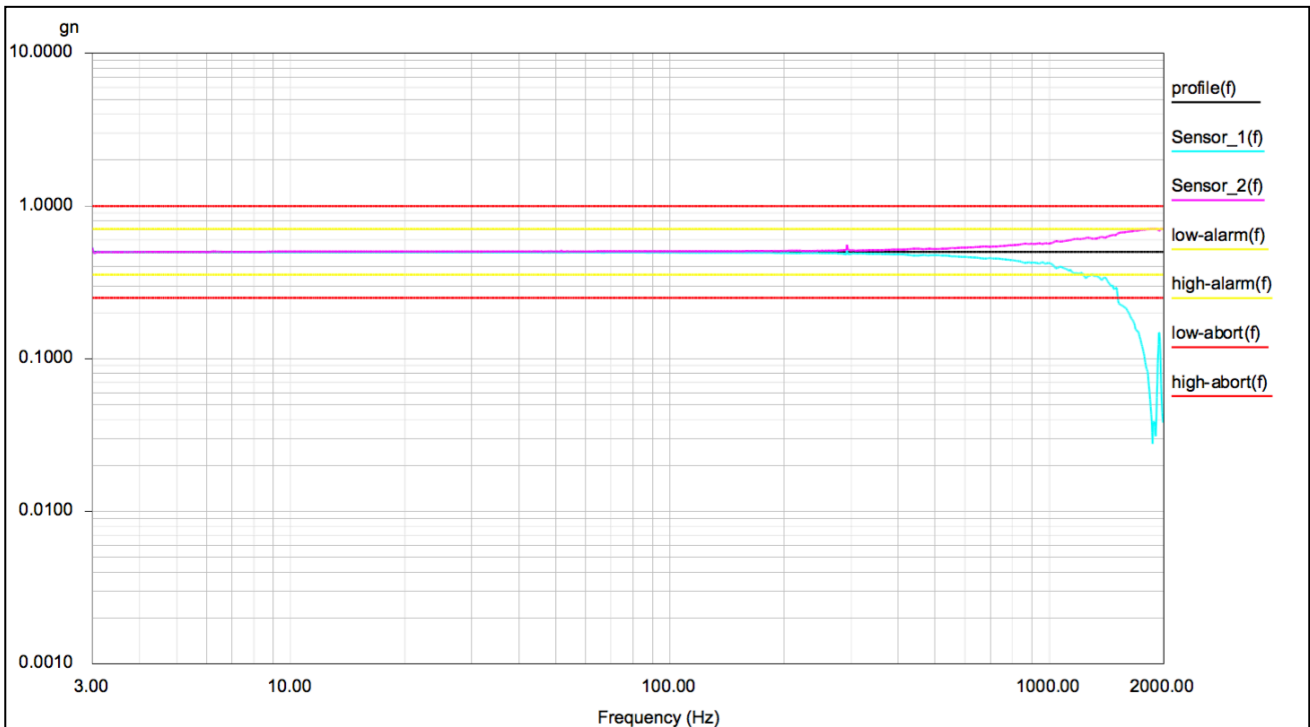


Abbildung 63: Shaker-Regelung bisherige Halterung – Y-Richtung (RS)

Die Anregung, die der Shaker in Y-Richtung erzeugen muss, unterscheidet sich nicht signifikant von der Kurve in X-Richtung. In Abbildung 59 sind zwei auf der Grundplatte montierte Aluminiumblöcke zu sehen. Auf diesen Blöcken sind die Regelsensoren befestigt. Die Vorrichtung ist in jeder Achslage der Generatoren gleich montiert. Der Shaker regelt somit nach der Grundplatte und nicht nach den Halterungen. Die nicht veränderte Position der Regelsensoren erklärt die nahezu identischen Diagramme aus Abbildung 60 und Abbildung 63. Dies bedeutet einen weiteren Nachteil der bisherigen Halterung. Es ist nicht gewährleistet, dass die korrekten Frequenzen übertragen werden. Das hat auch Einfluss auf die Ergebnisse der Beschleunigungssensoren am Generator.

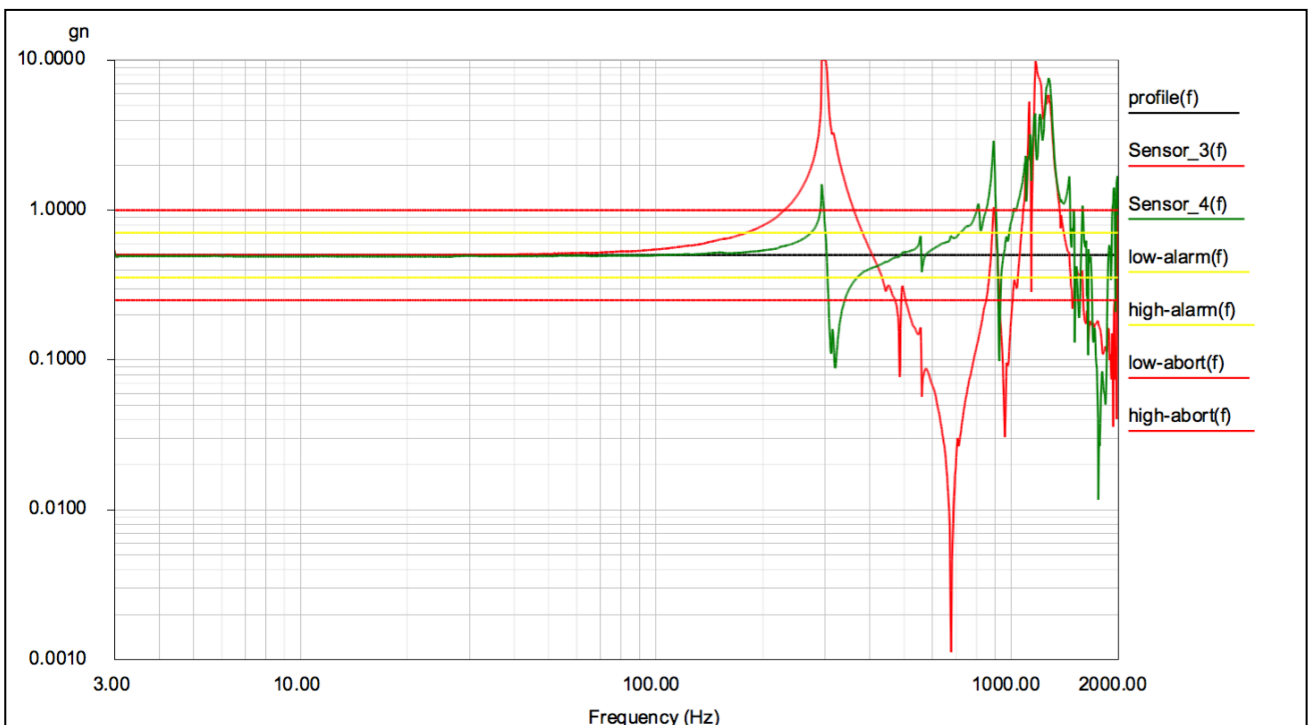


Abbildung 64: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Y-Richtung (RS)

In Y-Anregung ähnelt sich der Verlauf grob dem der X-Anregung. Die Ausschläge fallen insgesamt aber stärker aus. Gerade die Verstärkung bei  $\sim 1400\text{Hz}$  deutet auf eine Eigenfrequenz hin. Der bereits erwähnte Peak bei  $300\text{Hz}$  ist auch hier gegeben. Interessant ist jedoch die starke Dämpfung des Sensors 4 gegenüber Sensor 3. Die Y-Anregung entspricht der Längsachse des Generators (siehe Abbildung 56) und Sensor 3 befindet sich auf dem Mantel des Generators. Der Unterschied lässt sich also durch die Sensorposition erklären. Sensor 4 ist auf dem Deckel des Generators positioniert und damit nahe an der Halterung. Dadurch erfährt er bei einer Y-Anregung eine niedrigere Beschleunigung als Sensor 3, da er sich sehr nahe an der Fixierung des Generators befindet.

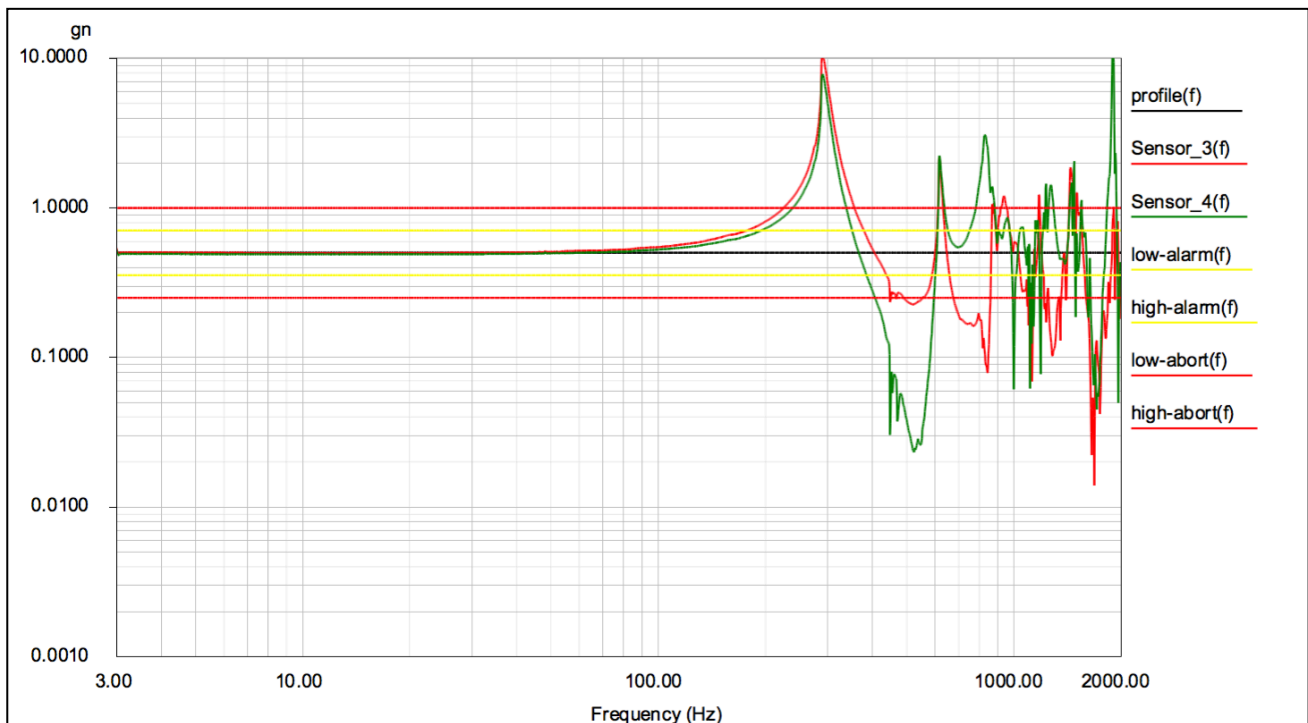


Abbildung 65: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Z-Richtung (RS)

Da wie bereits beschrieben die Diagramme der Shaker-Anregung nahezu identisch sind, wird an dieser Stelle auf das Diagramm verzichtet.

Das Verlaufsdiagramm der Z-Achse entspricht sehr der Anregung in X-Richtung (Abbildung 61). Das ist auch nachvollziehbar, weil der Wechsel von der X- auf die Z-Achse lediglich durch eine  $90^\circ$  Drehung des Generators in der Halterung erreicht wird. Die Halterung erfährt also bei beiden Achsen die gleiche Anregung, auch die Sensoren befinden sich an der gleichen Position. Das erklärt die Ähnlichkeit der Verlaufskurven. Ziel des Prüfstandes ist es, die Haltbarkeit der Generatoren zu testen. Da die Generatoren im Inneren nicht symmetrisch zur Längsachse sind, hat der Achswechsel durchaus Einfluss auf die Haltbarkeit. Mit Blick auf die Halterung macht das aber kaum einen Unterschied, wie die beiden Diagramme zeigen.

Nun kann die bisherige Halterung mit den neuen Konzepten verglichen werden.



### 7.3.3.3 Konzept 1

Abbildung 66 zeigt die neue Halterung in der Einbauposition für die X-Achse. Die Regelsensoren befinden sich jetzt direkt an der Halterung (siehe Markierung) und nicht mehr auf der Grundplatte des Shakers.

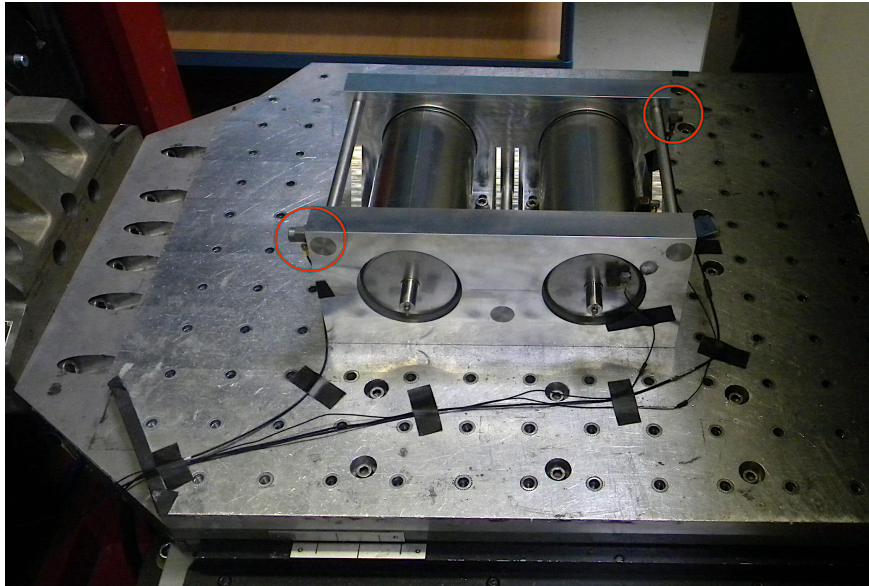


Abbildung 66: Einbauposition in X-Richtung – Konzept 1

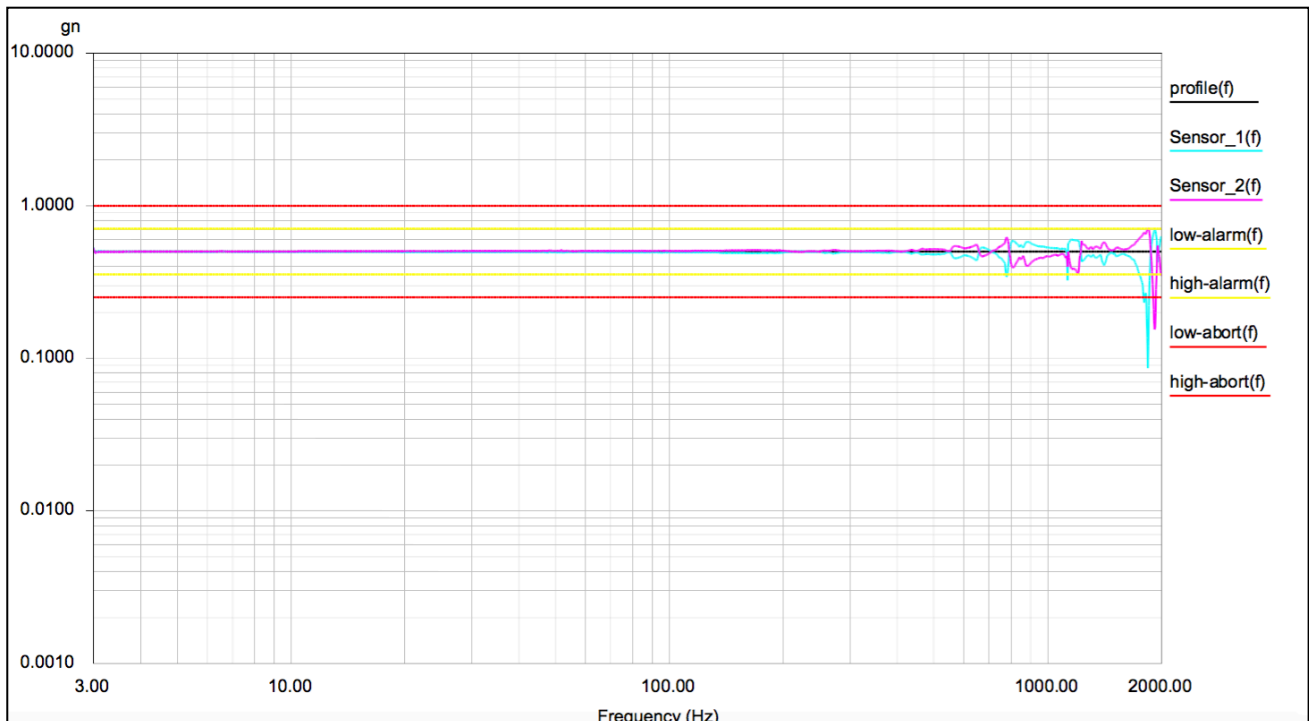


Abbildung 67: Shaker-Regelung Konzept 1 – X-Richtung (RS)

Bei der Shaker-Anregung fällt im höheren Frequenzbereich sofort ein Unterschied gegenüber der bisherigen Halterung auf. Beim Konzept 1 besteht die Möglichkeit, die Regelsensoren direkt an der Halterung anzubringen. Dadurch regelt der Shaker nach der Halterung und nicht nach der Grundplatte. Bei der massiven Grundplatte, die kaum Resonanzen zulässt, musste der Shaker kaum nachregeln. Die Abbildung 67 zeigt, dass sich dies ändert, sobald der Shaker über die Halterung die Frequenzen steuert. Dass die Halterung gegenüber der Grundplatte mehr Resonanzen aufweist und der Shaker mehr gegenregeln muss, entspricht daher den Erwartungen.

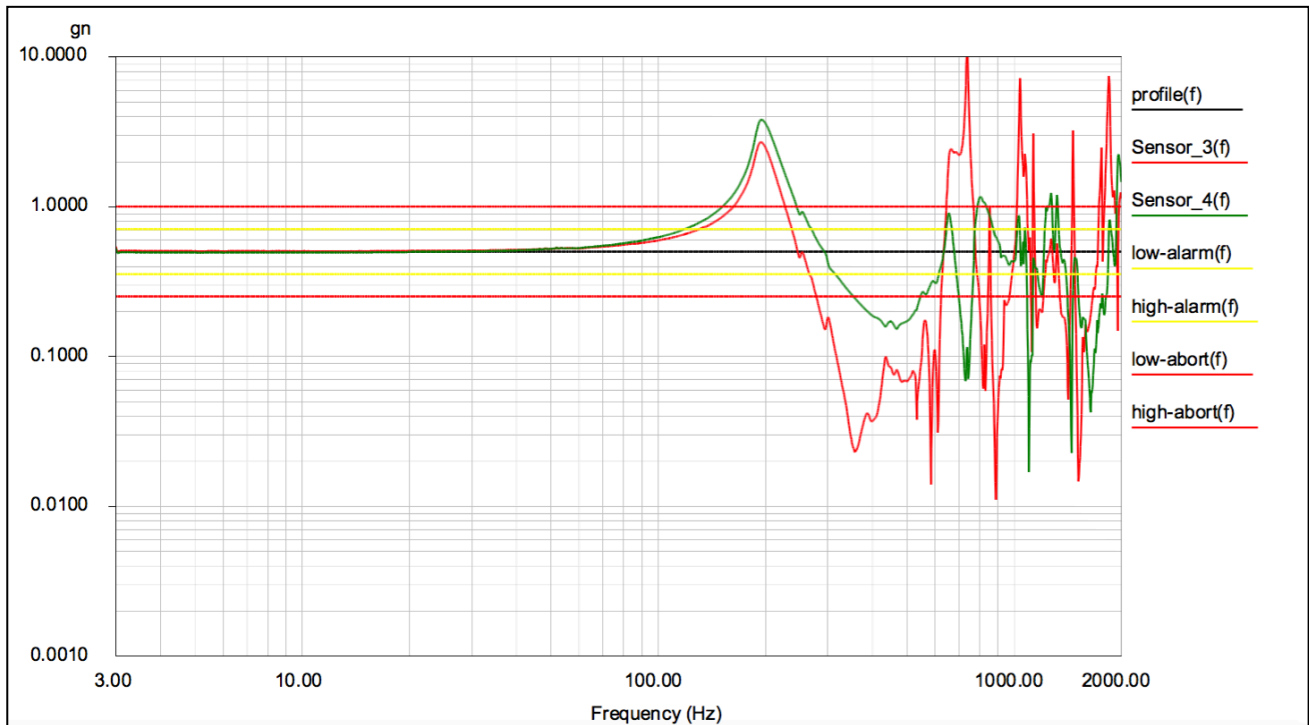


Abbildung 68: Sensoren am Generator Konzept 1 – X-Richtung (RS)

Auch die auftretenden Beschleunigungen am Generator zeigen im Vergleich zum bisherigen Konzept eine Abweichung. Der Peak bei 300Hz wurde deutlich gedämpft und liegt damit näher am gewünschten Signal. Der Sensor 4 (am Generatordeckel) befindet sich ebenso im Schnitt näher an der gewünschten Frequenz. Sensor 3 (am Generatormantel) zeigt gegenüber der bisherigen Halterung eine deutliche Verstärkung. Auch die FEM Analyse (Abbildung 34, anderes Achsensystem in der FEM beachten) zeigte im Bereich von 1000 bis 2000Hz drei Spitzen. Dies lässt auf Eigenfrequenzen des Generators in diesem Bereich schließen.

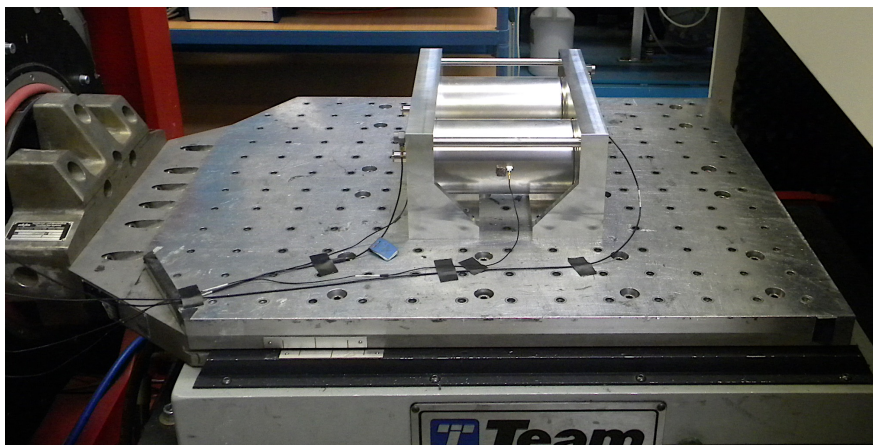


Abbildung 69: Einbauposition in Y-Richtung – Konzept 1

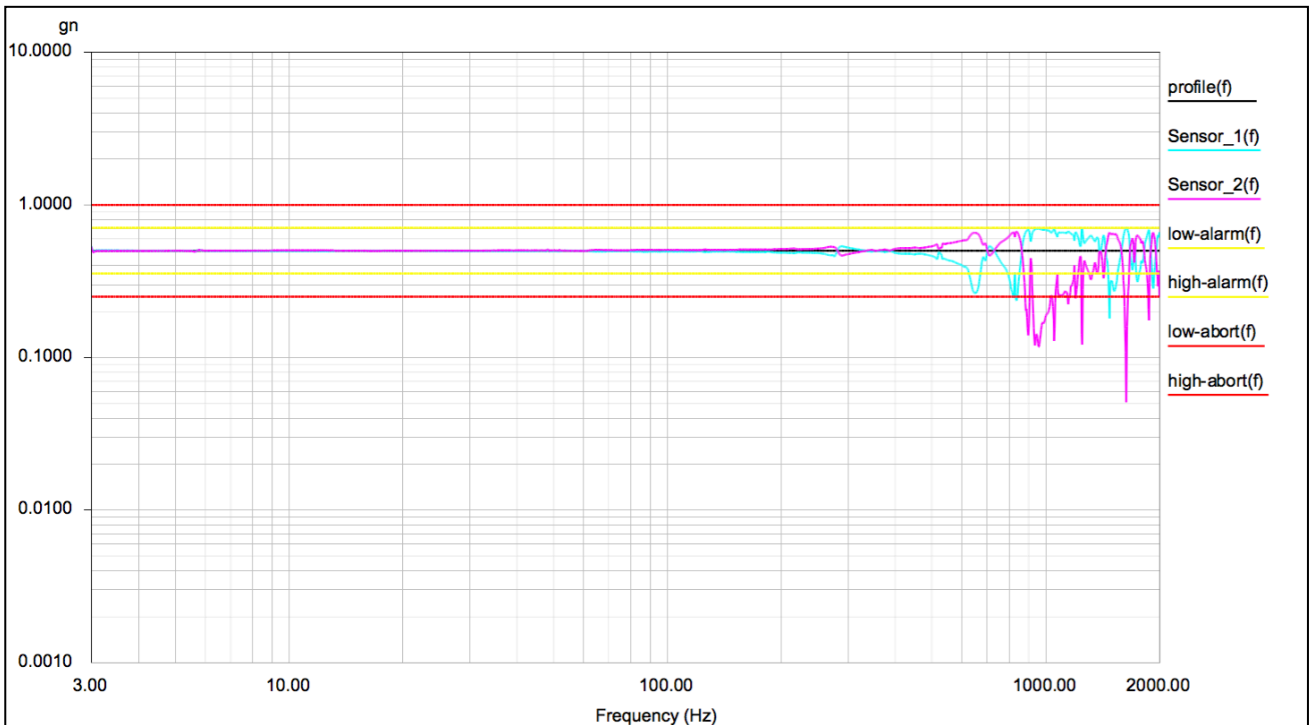


Abbildung 70: Shaker-Regelung Konzept 1 – Y-Richtung (RS)

In der Y-Richtung gibt es ebenfalls klare Unterschiede zur bisherigen Halterung. Auch dass der Shaker stärker regeln muss als bei der X-Anregung, entspricht den Erwartungen. In Abbildung 69 sind die Regelsensoren an der Halterung zu erkennen. Diese befinden sich weit oben an der Halterung. Bei einer Anregung in Y-Richtung treten daher Hebelkräfte auf. Dadurch schwingt der obere Teil der Halterung mehr als der Fuß der Halterung, der an der Grundplatte befestigt ist.

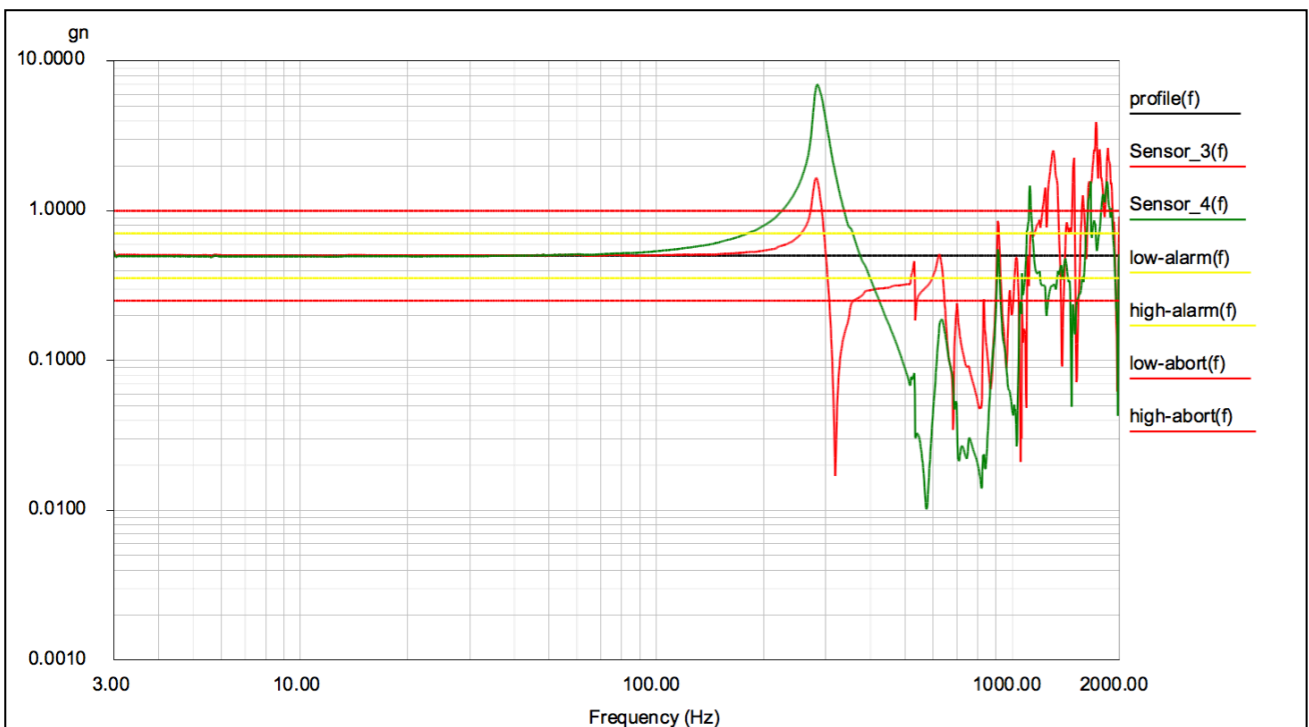


Abbildung 71: Sensoren am Generator Konzept 1 – Y-Richtung (RS)

Die Ergebnisse der Messsensoren zeigen grob einen bekannten Verlauf. Interessant ist der Unterschied der Sensoren 3 und 4 bei 300Hz. Der Sensor 3 (am Generatormantel) zeigt wie Sensor 4 eine starke Dämpfung in Längsrichtung, aber wesentlich stärker. Ursache

könnten die Abstandshülsen sein, die eine dauerhafte Vorspannkraft auf die Generatoren ausüben. Außerdem drücken sie den Generatorrand in die Silikonringe. Dadurch entsteht nur sehr wenig Spiel zwischen den Generatoren und der Halterung. Anders als beim bisherigen Konzept entsteht im Bereich bis 1000Hz eine deutliche Dämpfung. Bis 2000Hz kommt es nur zu leichten Verstärkungen. Insgesamt fallen die Abweichungen vom gewünschten Sinussignal geringer als beim aktuellen Konzept aus.

Auch die FEM-Analyse (Abbildung 33) ergab im Bereich von 1000 bis 2000Hz mehrere Spitzen, die auf Eigenfrequenzen schließen ließen. Einen hohen Ausschlag bei ~750Hz wie in der FEM-Analyse konnte die Realität nicht bestätigen.

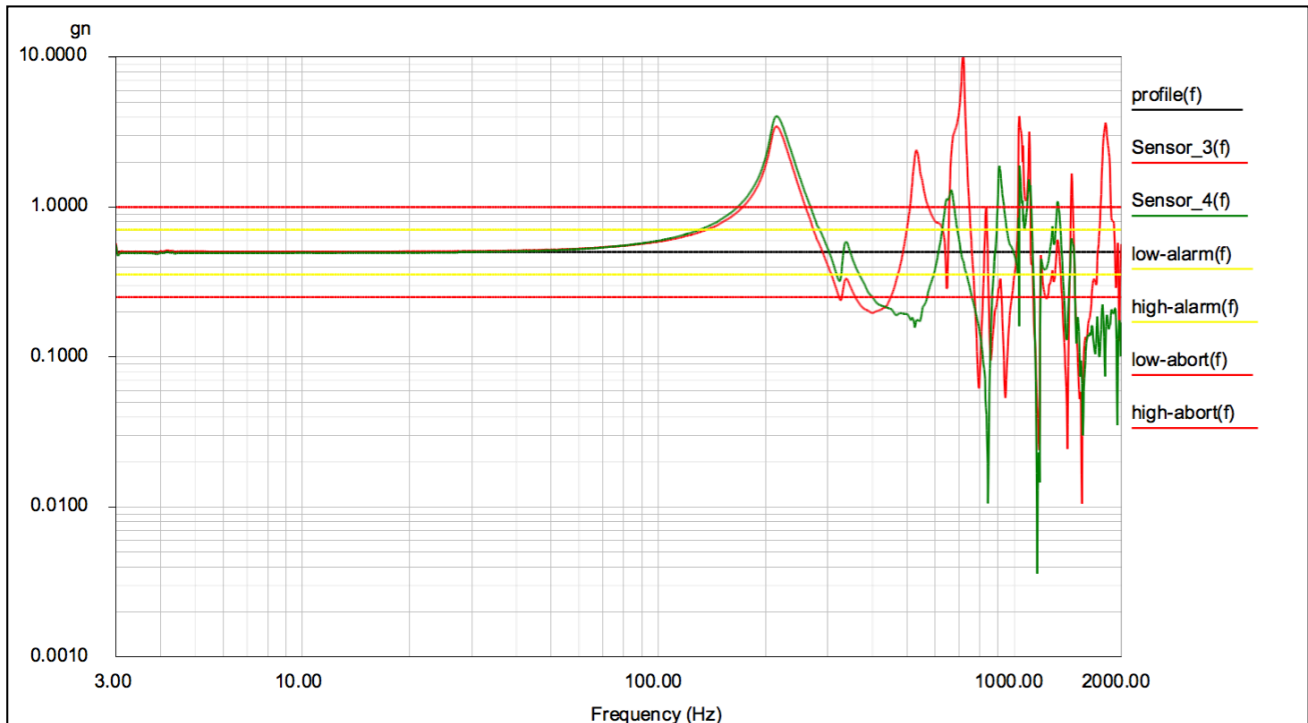


Abbildung 72: Sensoren am Generator Konzept 1 – Z-Richtung (RS)

Erwartungsgemäß ähnelt das Ergebnis in Z-Richtung sehr dem Verlauf in X-Anregung. Allerdings fällt die Dämpfung zwischen 300Hz und 1000Hz deutlich geringer aus und liegt näher an der Profillinie.

In Z-Richtung wird ein zusätzlicher Testlauf durchgeführt. Hierbei befinden sich die Messsensoren auf den Abstandshülsen, so wird die Eigenfrequenz der Hülsen ermittelt. Für diesen Versuch befindet sich Sensor 3 auf der mittleren und Sensor 4 auf einer der äußeren Abstandshülsen (Abbildung 73).

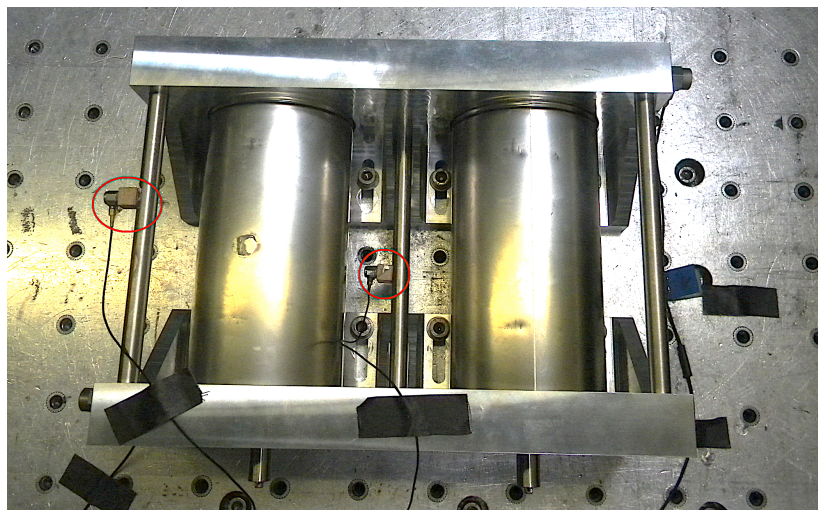


Abbildung 73: Testaufbau mit Sensoren an Abstandshülsen – Konzept 1

Auch bei diesem Test entspricht die Shaker-Anregung dem Verlauf der X-Anregung und wird deshalb weggelassen.

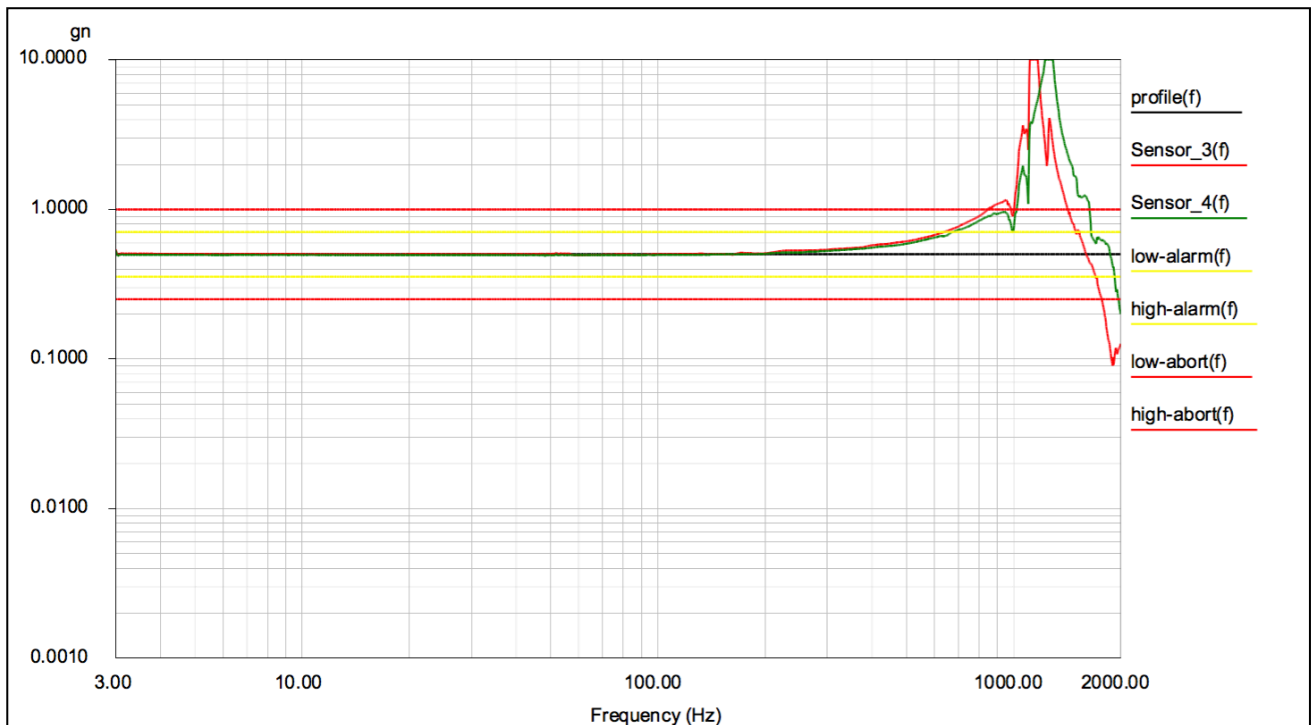


Abbildung 74: Sensoren an Abstandshülsen Konzept 1 – Z-Richtung (RS)

Bei diesem Test stimmen die realen Messergebnisse mit denen aus der FEM-Analyse (Abbildung 32) überein. In der FEM-Analyse wurden die Eigenfrequenzen der Abstandshülsen im Bereich von 1200-1400Hz ermittelt. Auch die Abbildung 74 bestätigt, dass die Eigenfrequenzen in diesem Bereich zu finden sind. Die FEM-Analyse prognostizierte zudem unterschiedliche Eigenfrequenzen der mittleren und der äußeren Abstandshülse. Das lässt sich bei den realen Testläufen beobachten.

Der Vergleich zwischen den Messergebnissen der Generatoren (Abbildung 72) und den Abstandshülsen (Abbildung 74) zeigt, dass die Eigenfrequenzen der Abstandshülsen keinen Einfluss auf die Generatoren haben. Die Spitzen finden sich in Abbildung 72 nicht wieder.

#### 7.3.3.4 Konzept 2

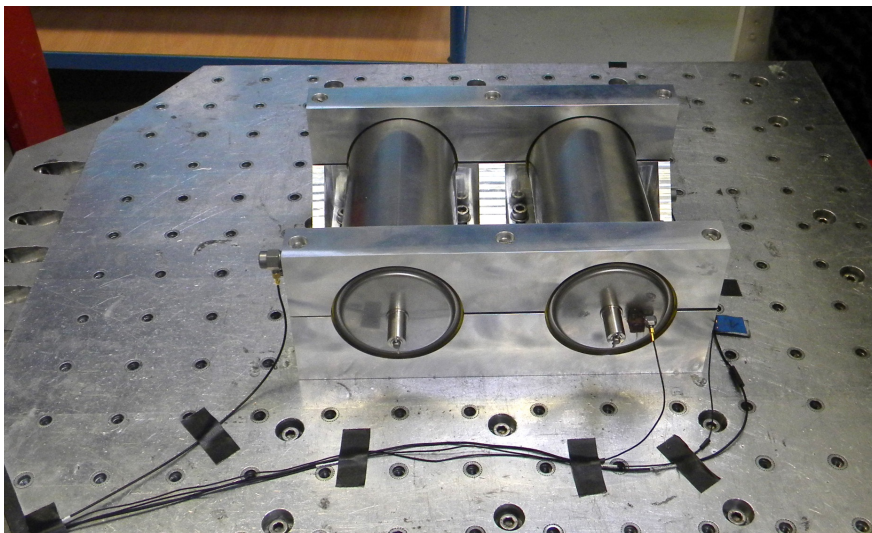


Abbildung 75: Einbauposition in X-Richtung – Konzept 2

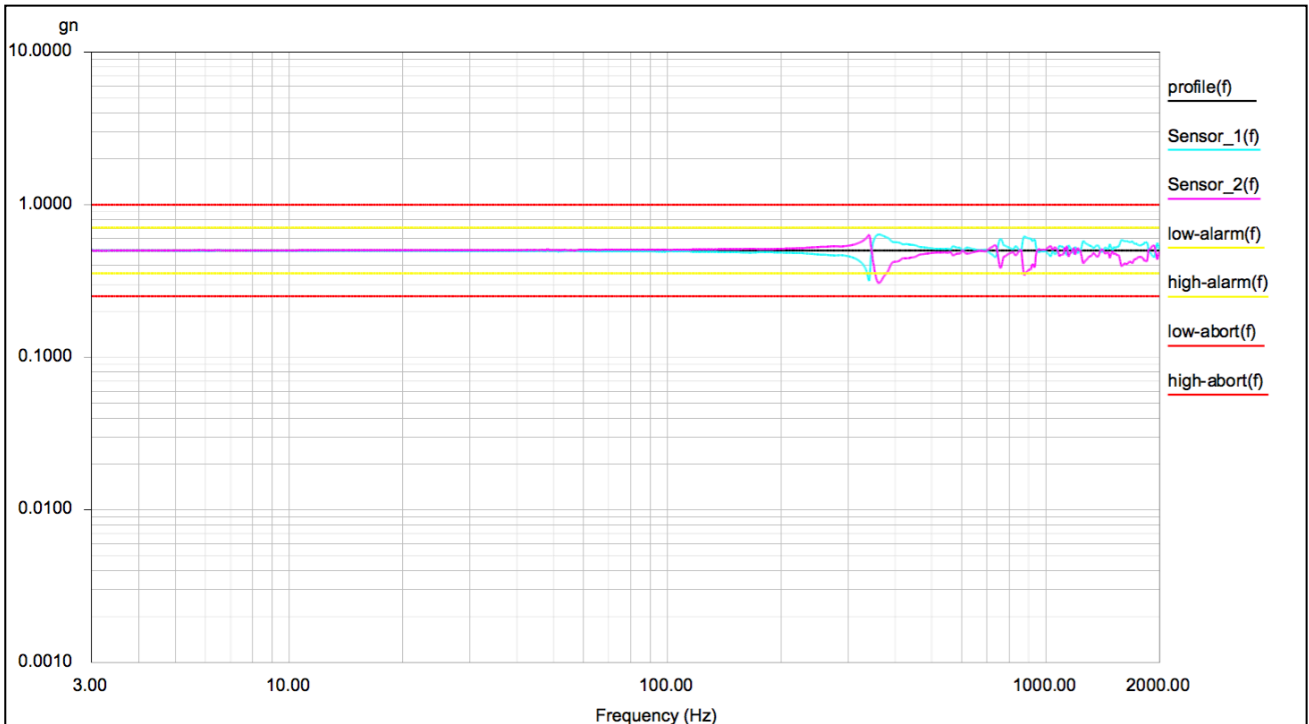


Abbildung 76: Shaker-Regelung Konzept 2 – X-Richtung (RS)

Beim zweiten Konzept muss der Shaker schon bei niedrigeren Frequenzen mehr regeln als beim bisherigen Konzept und auch beim Konzept 1. Dafür fallen die Ausschläge bei höheren Frequenzen deutlich niedriger aus.

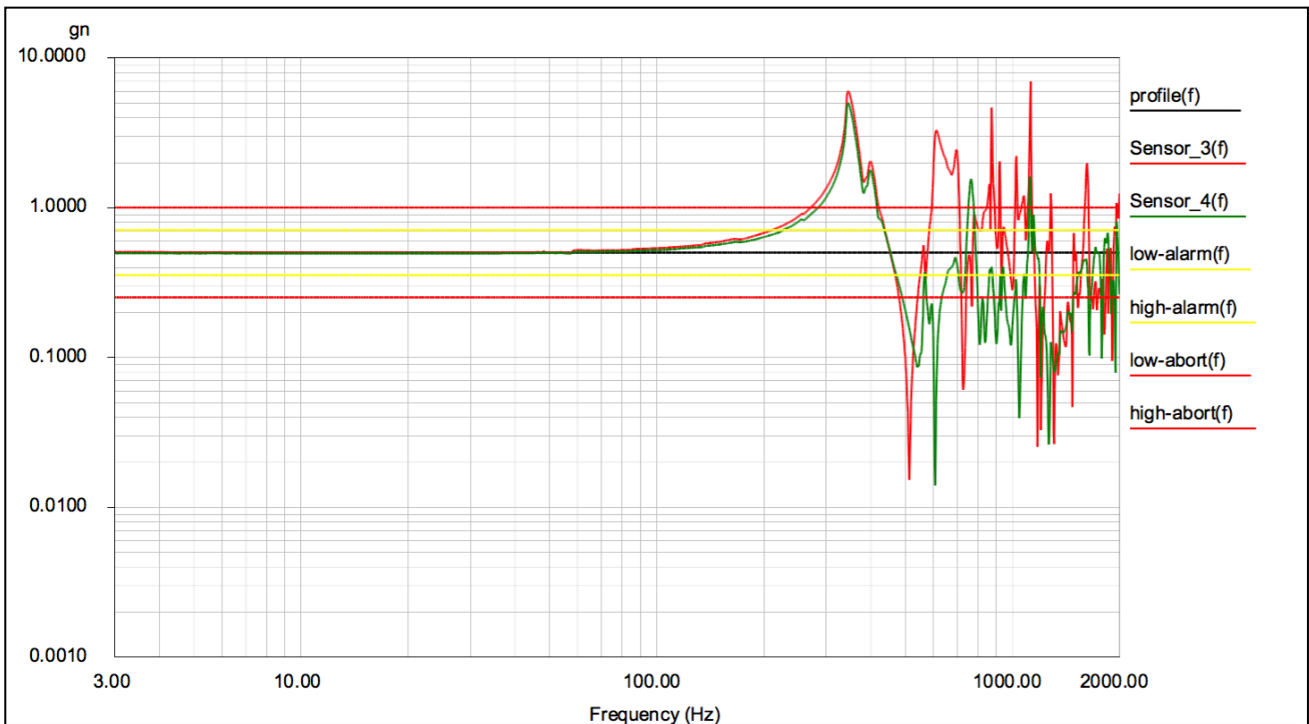


Abbildung 77: Sensoren am Generator Konzept 2 – X-Richtung (RS)

Die Ergebnisse dieses Testlaufes sind vergleichbar mit dem Test des ersten Konzeptes. Beide Konzepte weisen eine ähnliche Geometrie auf. Dies könnte ein Grund sein, warum sich auch die Resultate ähneln. Gegenüber dem Konzept 1 dämpft dieses Konzept den Peak bei 300Hz weniger stark. Die Begründung könnte sein, dass dieses Konzept keine Vorspannkraft auf den Generator aufbringt. Auch die FEM-Analyse ermittelte die Eigenfrequenzen überwiegend im Bereich 1000-2000Hz auftreten (Abbildung 38).

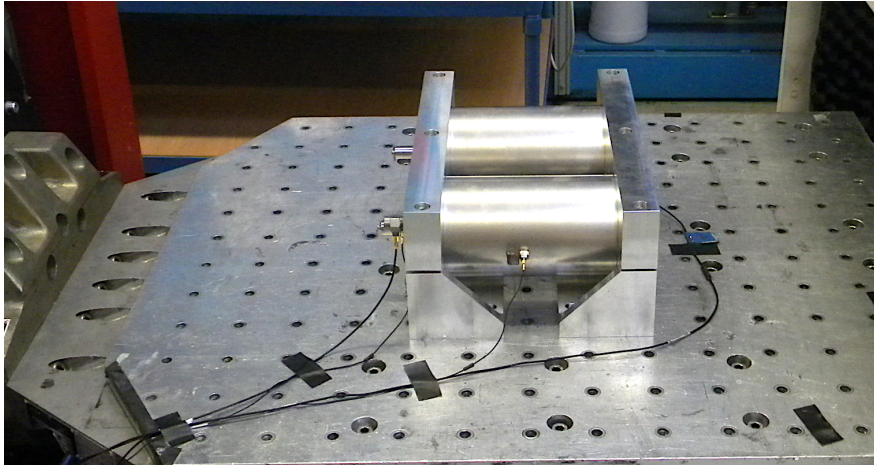


Abbildung 78: Einbauposition in Y-Richtung – Konzept 2

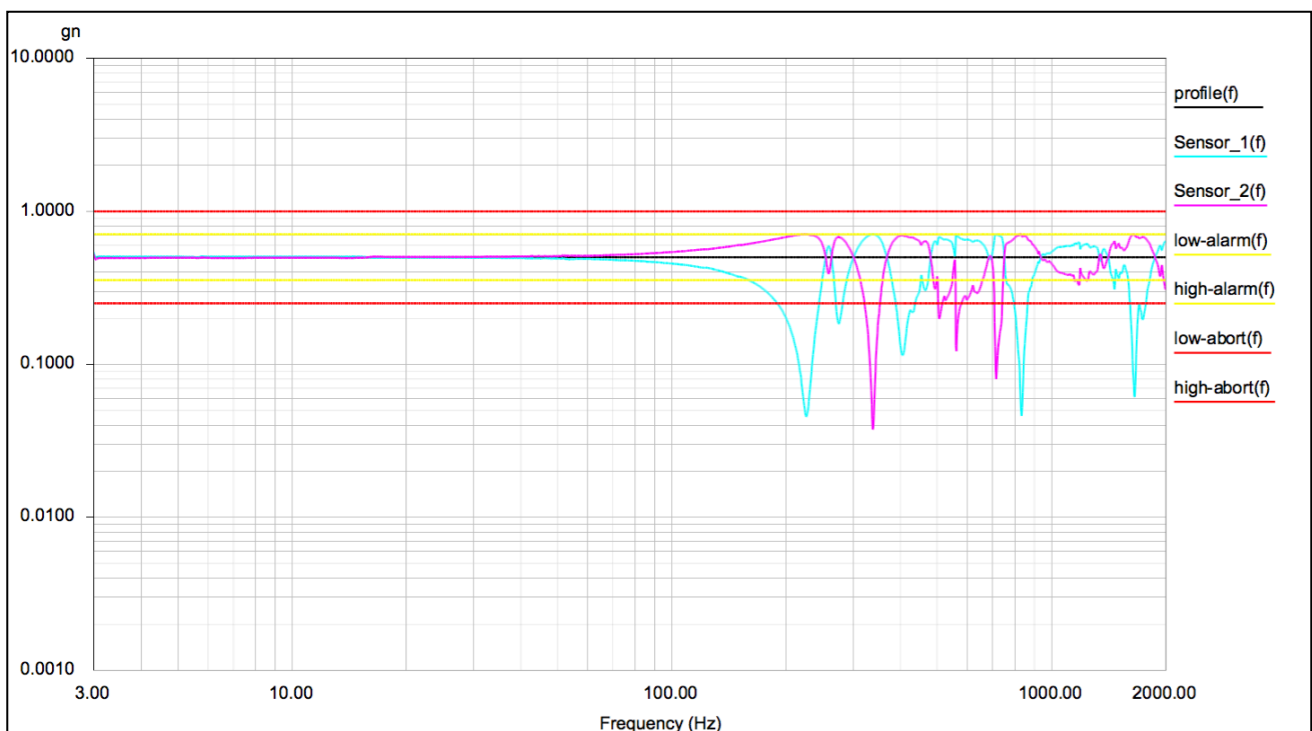


Abbildung 79: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (RS)

Die Anregung des Shakers zeigt einen deutlich anderen Verlauf als bei bisherigen Testläufen. Hierfür kann es verschiedene Ursachen geben. Wie bereits im vorherigen Verlauf beschrieben, sind die beiden Halterungen nur über die Generatoren miteinander gekoppelt (entgegen Konzept 1). Der Shaker regelt nach dem Mittelwert der beiden Regelsensoren. Aus diesem Grund verlaufen die Ausschläge der Kurven immer entgegengesetzt zueinander. Da sich die Sensoren auf jeweils einer der Halterungen befinden und diese nicht miteinander gekoppelt sind, können die Messwerte der Regelsensoren weit auseinander liegen.

Eine weitere Ursache könnte ein nicht richtig angebrachter Regelsensor sein. Auch das könnte zu einer großen Differenz der Messwerte führen.

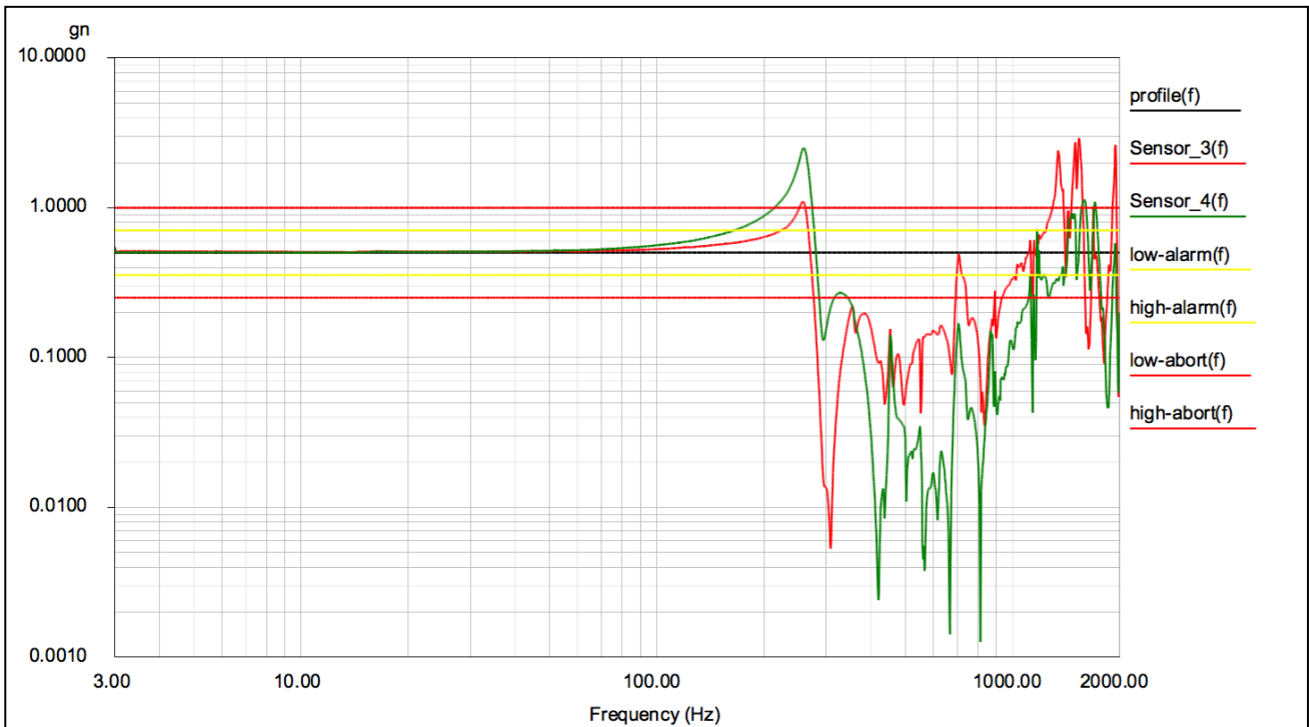


Abbildung 80: Sensoren am Generator Konzept 2 – Y-Richtung (RS)

Wie auch im vorherigen Diagramm weichen die auftretenden Beschleunigungen an den Generatoren stark ab – und zwar sowohl von der Profillinie als auch von den vorangegangenen Untersuchungen.

Die Y-Achse entspricht einer Anregung in Längsachse (siehe Abbildung 78). In dieser Lage hindern auch die Silikonringe den Generator daran, sich in Längsrichtung zu verschieben. Dies könnte die starke Dämpfung zwischen 300 und 1000Hz erklären. Bis zu einem gewissen Grad decken sich die Ergebnisse mit der FEM-Analyse. In der FEM-Analyse konnte eine starke Eigenfrequenz des Gesamtsystems im Bereich zwischen 800-900Hz festgestellt werden (Abbildung 39). Die Analyse zeigte darüberhinaus weniger Eigenfrequenzen im Bereich jenseits von 1000Hz. Auch die realen Tests bestätigen dies.

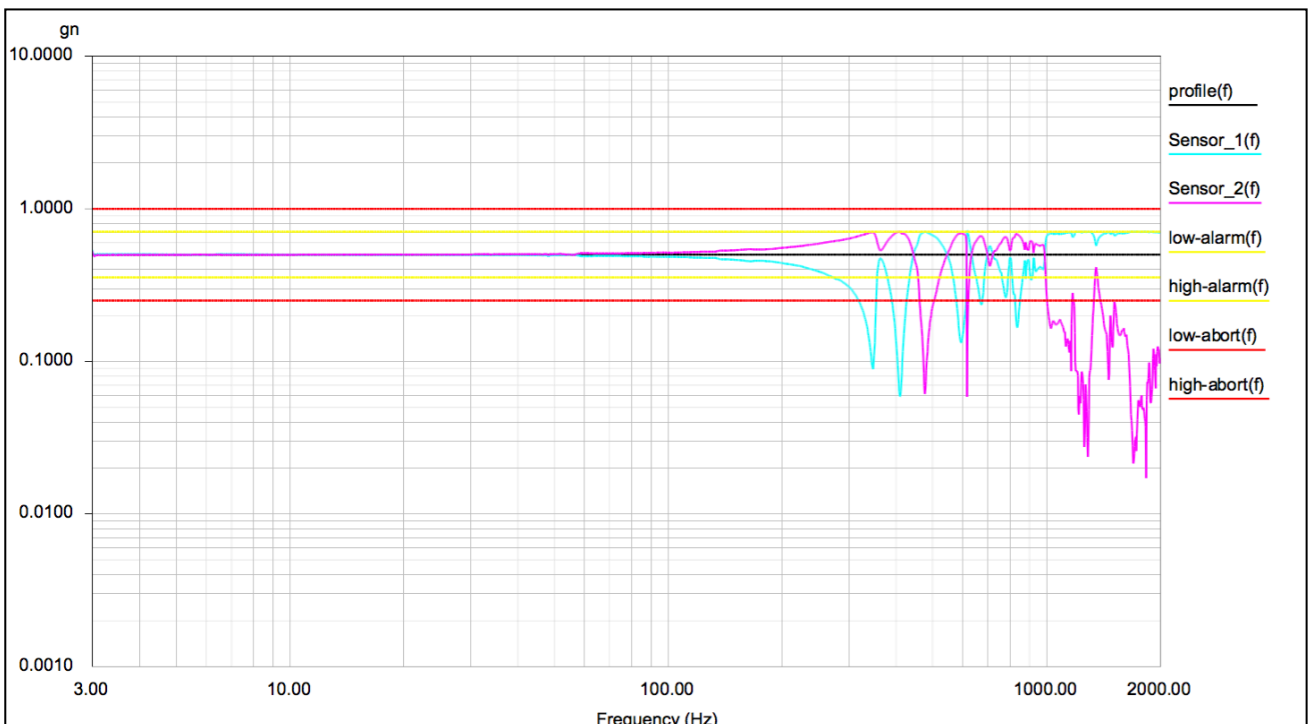


Abbildung 81: Shaker-Regelung Konzept 2 – Z-Richtung (RS)



Die Shaker-Regelung in Z-Richtung ähnelt sehr der Regelung in Y-Richtung, unterscheidet sich aber deutlich von der X-Richtung. Das ist erstaunlich, da die X- und Z-Anregung dieselbe Position der Halterung aufweisen. Der Verlauf aus Abbildung 81 belegt, dass es sich bei Abbildung 79 nicht um einen falsch angebrachten Sensor handelt.

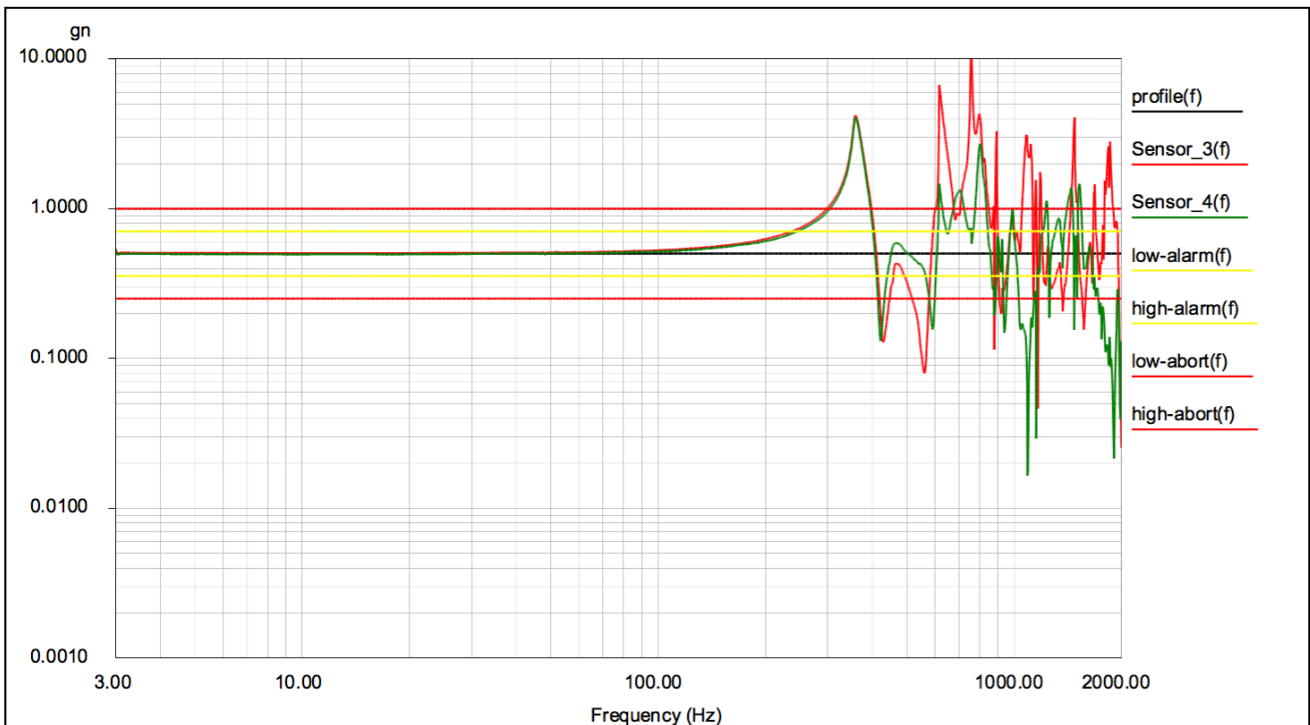


Abbildung 82: Sensoren am Generator Konzept 2 – Z-Richtung (RS)

Die Beschleunigung und damit die Eigenfrequenzen stimmen in Z-Richtung wieder mit denen aus der X-Richtung überein. Der Umstand, dass bei deutlichem Nachregeln des Shakers vergleichbare Ergebnisse entstehen, müsste durch weitere Testläufe untersucht werden.

### 7.3.3.5 Erkenntnisse – Response Search

Allgemein zeigen die neuen Konzepte vergleichbare Ergebnisse wie die bisherige Halterung. Die Eigenfrequenzen liegen hierbei meist im höherfrequenten Bereich. Dies ergaben bereits die FEM-Analysen. In manchen Bereichen übertragen die neuen Konzepte die gewünschte Frequenz besser als die bisherige Halterung.

Aber auch stärkere Abweichungen sind feststellbar. Weitere Tests müssten zeigen, wie stark sich das Platzieren der Regelsensoren auf der Halterung auf die Ergebnisse auswirkt. Möglicherweise fallen die Ergebnisse der bisherigen Halterung besser aus, weil der Shaker gar nicht nach der Halterung, sondern nach seiner eigenen Grundplatte regelt. Dies würde bedeuten, dass der Shaker gar nicht die Frequenz an die Halterung abgibt, die er abgeben soll, was die Messergebnisse beeinflussen könnte.

Auch der Einfluss der Silikonringe müsste näher untersucht werden. Die Ringe haben ebenfalls einen Einfluss auf die Messwerte. Da das aktuelle Konzept nicht über Silikonringe verfügt, fehlt es an Vergleichswerten.

Die bisher ermittelten Verlaufskurven spiegeln lediglich die Auswertungen eines einzelnen Tests wider. Um fundierte Aussagen treffen zu können, müssten mehrere Testläufe erfolgen. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit aber nicht möglich.

## 7.3.4 Endurance Test

### 7.3.4.1 Vorwort

Der Endurance Test soll die auftretenden Belastungen simulieren, denen ein Generator innerhalb von 15 Jahren im Flugzeug ausgesetzt ist. Üblicherweise wird der Generator hierfür für fünf Stunden je Achse einem Random Vibration Profile ausgesetzt. Da in den folgenden Untersuchungen das Verhalten der Halterungen untersucht wird und die Alterung des Generators nicht von Bedeutung ist, wird nur eine Stunde je Achse gefahren. Das Vibrationsprofil ist aber identisch.

Die Diagramme des Endurance Test sind aufgebaut wie die in der Resonanzsuche. Die Profillinie entspricht dabei der Anregungskurve, die Boeing für diese Generatoren vorschreibt. Auch hier gilt: Alles oberhalb der Profillinie ist eine Verstärkung, alles unterhalb eine Dämpfung. Ziel ist weiterhin, möglichst nah an die Profillinie zu kommen.

Die Einbaupositionen der jeweiligen Achsen sind identisch mit denen aus der Resonanzsuche und werden deswegen nicht noch einmal aufgeführt. Auch die Positionen der Sensoren sind unverändert geblieben.

### 7.3.4.2 Bisherige Halterung

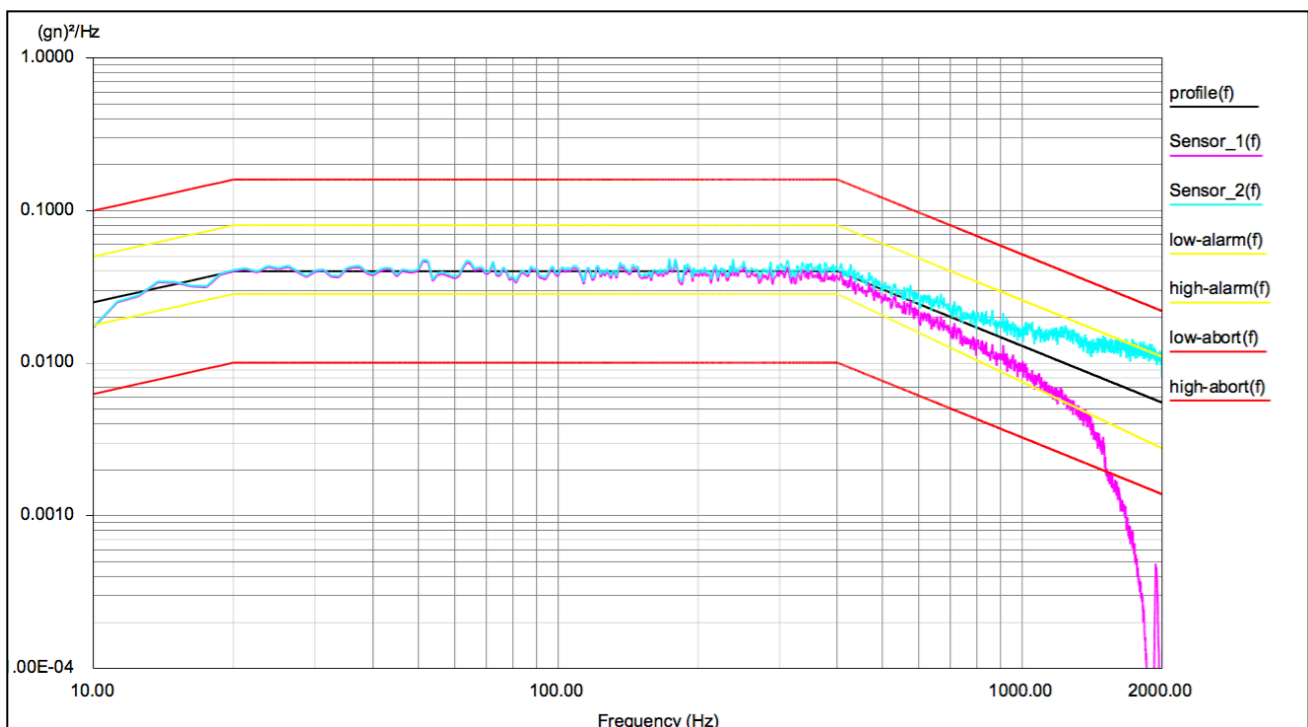


Abbildung 83: Shaker-Regelung bisherige Halterung – X-Richtung (ET)

Der Graph zeigt die Regelung des Shakers und den Soll-Verlauf (profil(f)). Der Shaker agiert bis 1000Hz nahe an der Profillinie. Auch beim Endurance Test der aktuellen Halterung befinden sich die Regelsensoren auf der Grundplatte und nicht an der Halterung. Die Abweichungen im hohen Frequenzbereich scheinen daher auf den Shaker selbst zurückzuführen zu sein.

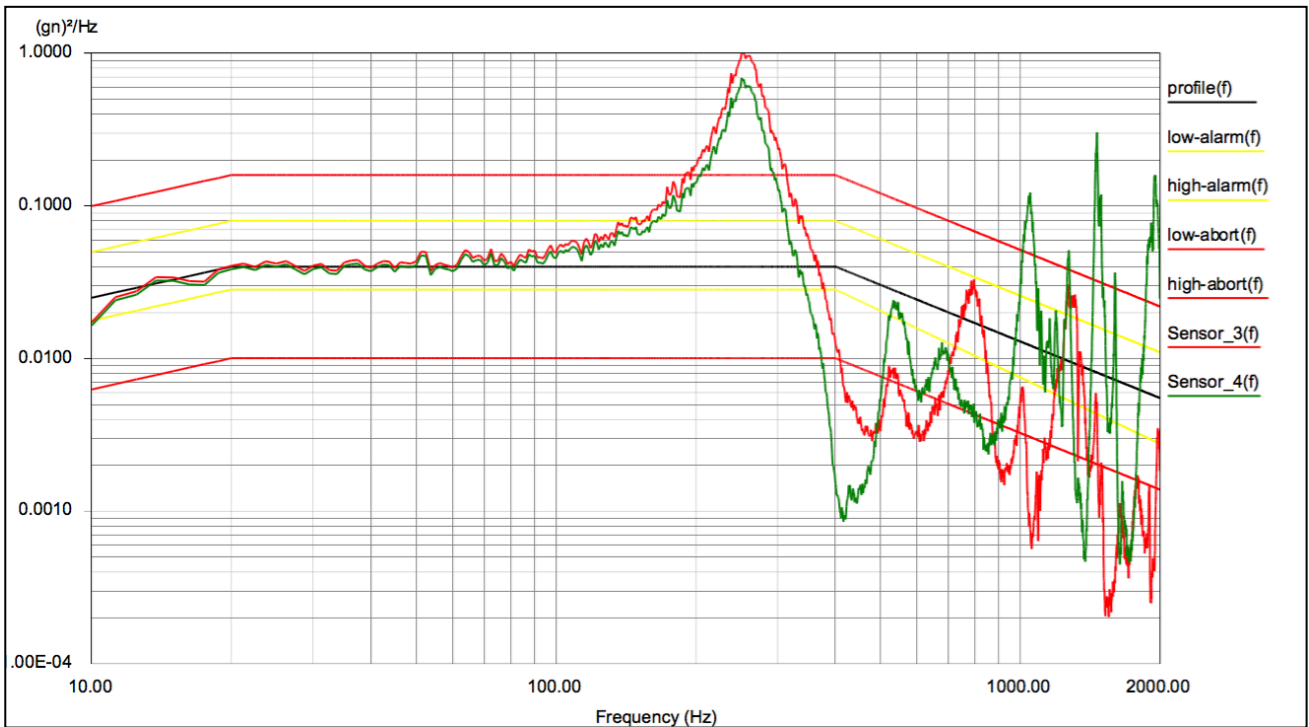


Abbildung 84: Sensoren am Generator bisherige Halterung – X-Richtung (ET)

Auch im Endurance Test ergibt sich der bekannte Peak bei 300Hz. Wie bereits erwähnt lässt das auf ein Eigenverhalten des Generators schließen, da dieser Peak bei jeder Halterung und jeder Achse auftritt. Bis 1000Hz entwickelt die Halterung eine Dämpfung. Darüber hinaus kommt es vor allem bei Sensor 4 (am Generatordeckel) zu verstärkten Beschleunigungen.

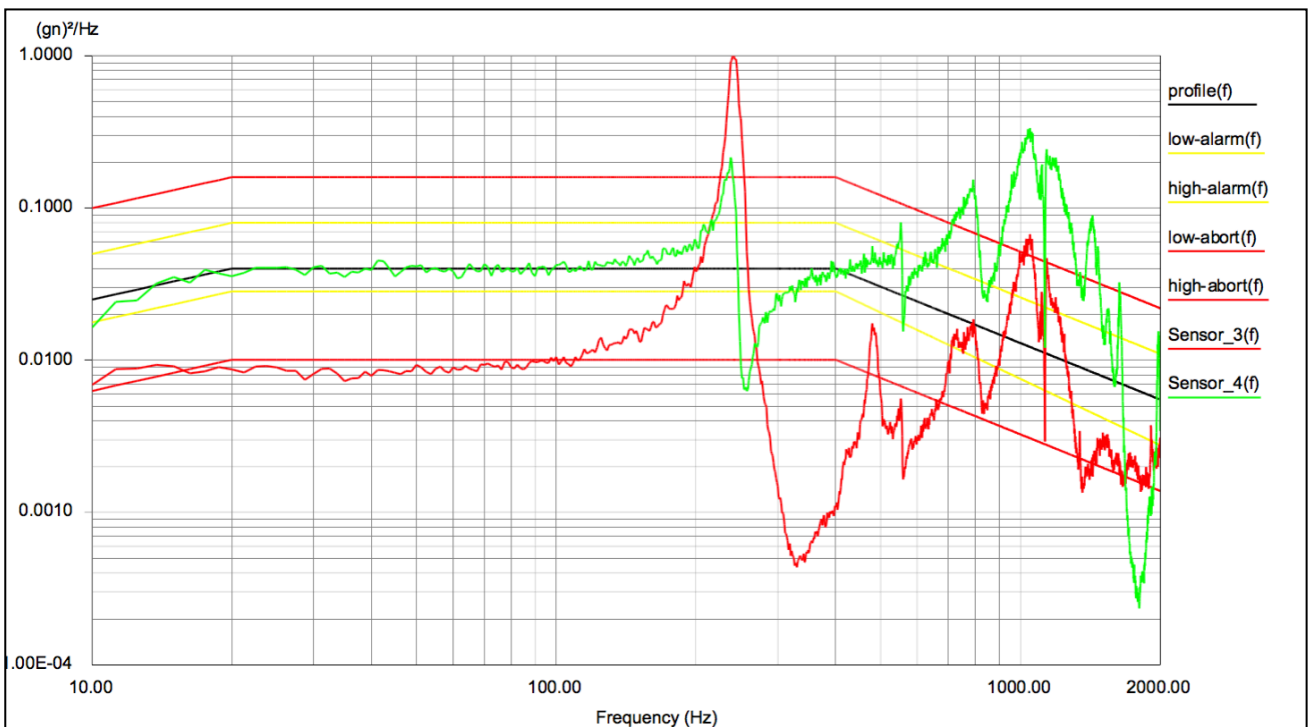


Abbildung 85: Sensoren am Generator bisherige Halterung – Y-Richtung (ET)

Wie bereits bei der Resonanzsuche der bisherigen Halterung festgestellt wurde, bleibt der Verlauf der Regelsensoren unverändert. Er wird daher nicht weiter aufgeführt.

In der Y-Anregung (Abbildung 85) entwickelt die bisherige Halterung schon bei niedrigen Frequenzen starke Abweichungen gegenüber der Profillinie. Dieser Trend setzt sich bei höheren Frequenzen fort. Interessant ist, dass in Längsrichtung (Sensor 3) überwiegend Dämpfung eintritt, wohingegen am Generatordeckel (Sensor 4) vermehrt eine Verstärkung auftritt.

Bei der Y-Achse kann es sein, dass die Halterung leicht ins Schwingen gerät, weil alle Schrauben in einer Reihe liegen (siehe Abbildung 62). Auch bei diesem Konzept sind die Halterungen nicht miteinander gekoppelt, was die hohen Beschleunigungen in Längsrichtung erklären könnte.

Der Verlauf der Z-Anregung ist erwartungsgemäß vergleichbar mit dem Graph der X-Richtung. Der Zusammenhang wurde bereits bei der Resonanzsuche mehrmals erörtert, das Diagramm dokumentiert nichts Neues und wird deshalb weggelassen.

7.3.4.3 Konzept 1

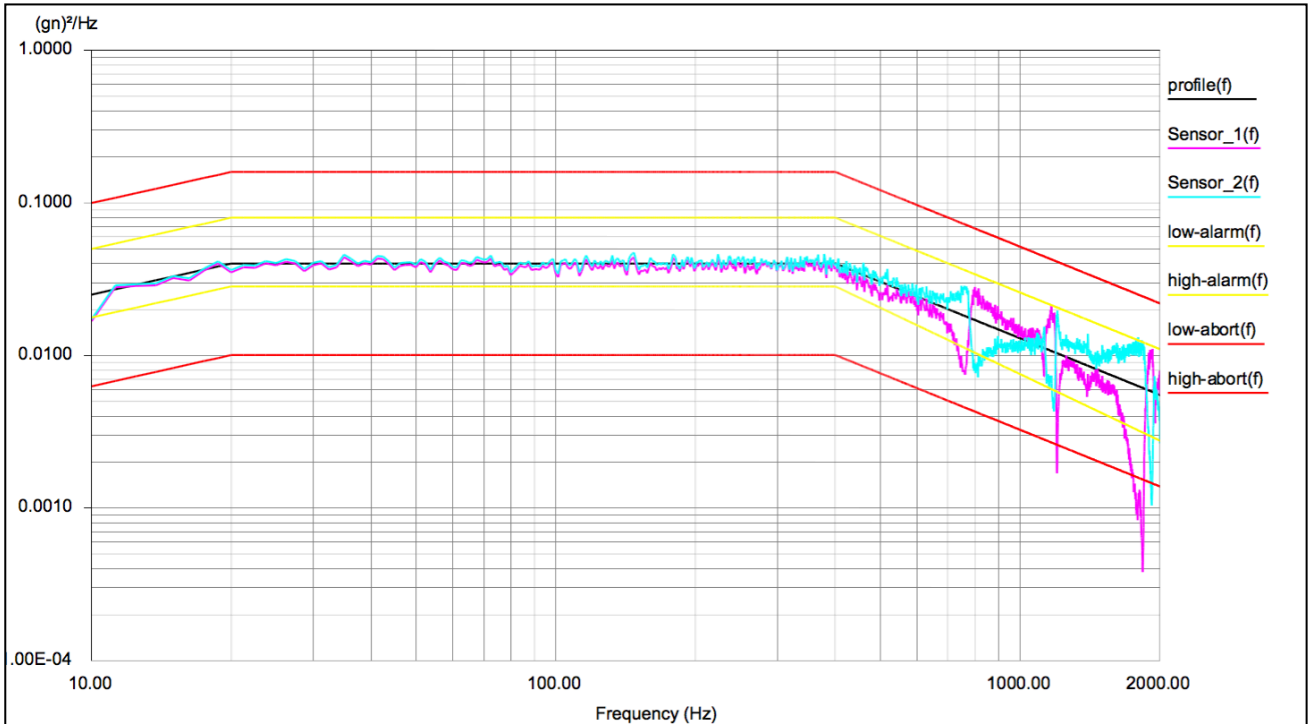


Abbildung 86: Shaker-Regelung Konzept 1 – X-Richtung (ET)

Der Graph der Regelsensoren liegt beim Konzept 1 deutlich näher an der Profillinie. Dies ist vor allem auf die Befestigung der Regelsensoren an der Halterung zurückzuführen. Ein Auseinanderdriften der Messkurven findet nicht statt.

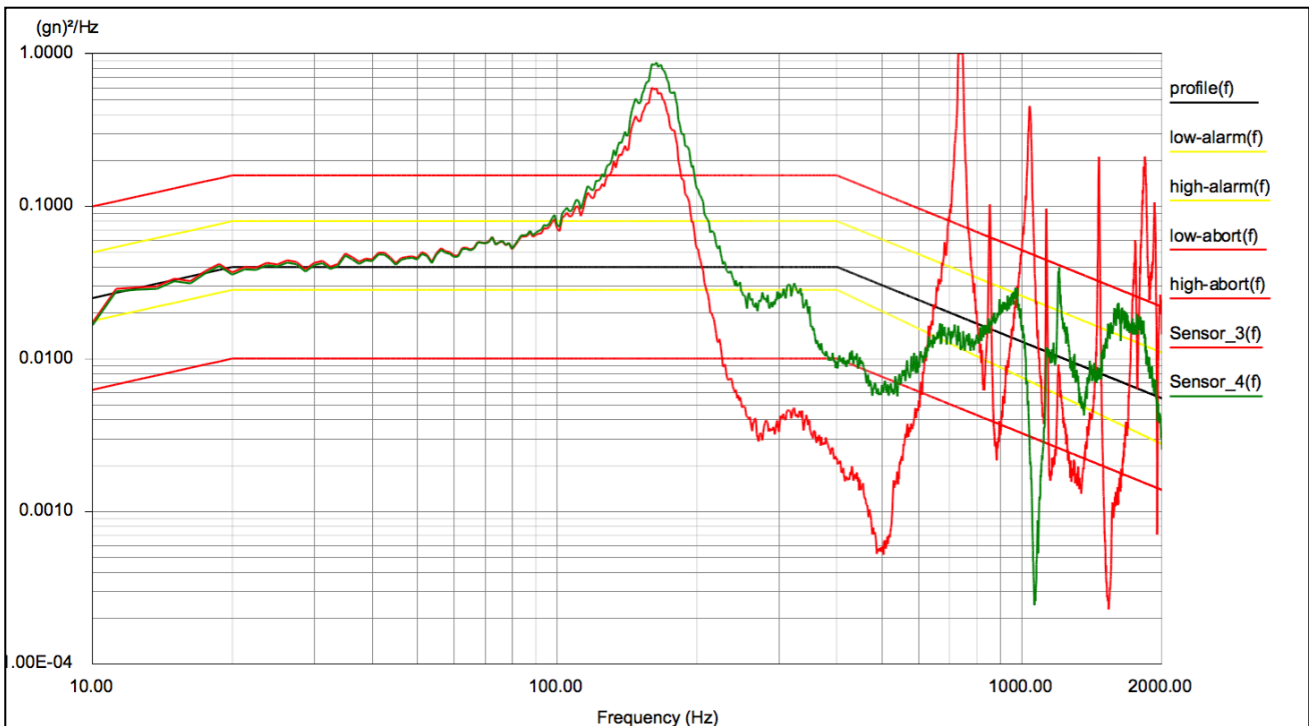


Abbildung 87: Sensoren am Generator Konzept 1 – X-Richtung (ET)

Während sich die Beschleunigungen am Deckel (Sensor 4) anders als bei der bisherigen Halterung näher an der Profillinie bewegen, kommt es am Generatormantel (Sensor 3) zu deutlichen Verstärkungen. Die Tendenzen entsprechen der bisherigen Halterung, sind aber stärker ausgeprägt.

Hierfür könnte es mehrere Gründe geben. Der Generator ist bei diesem Konzept nur am äußeren Ende gelagert. Zudem steht der Generatormantel aufgrund der Vorspannung durch die Abstandshülsen unter einer Druckspannung. Diese zwei Umstände könnten dazu führen, dass sich der Generatormantel in der Mitte beult, was eine Erklärung für die höheren Beschleunigungen wäre. Außerdem könnte sich der Generator durch die Silikonringe innerhalb der Halterung in X-Richtung verschieben (siehe Abbildung 66).

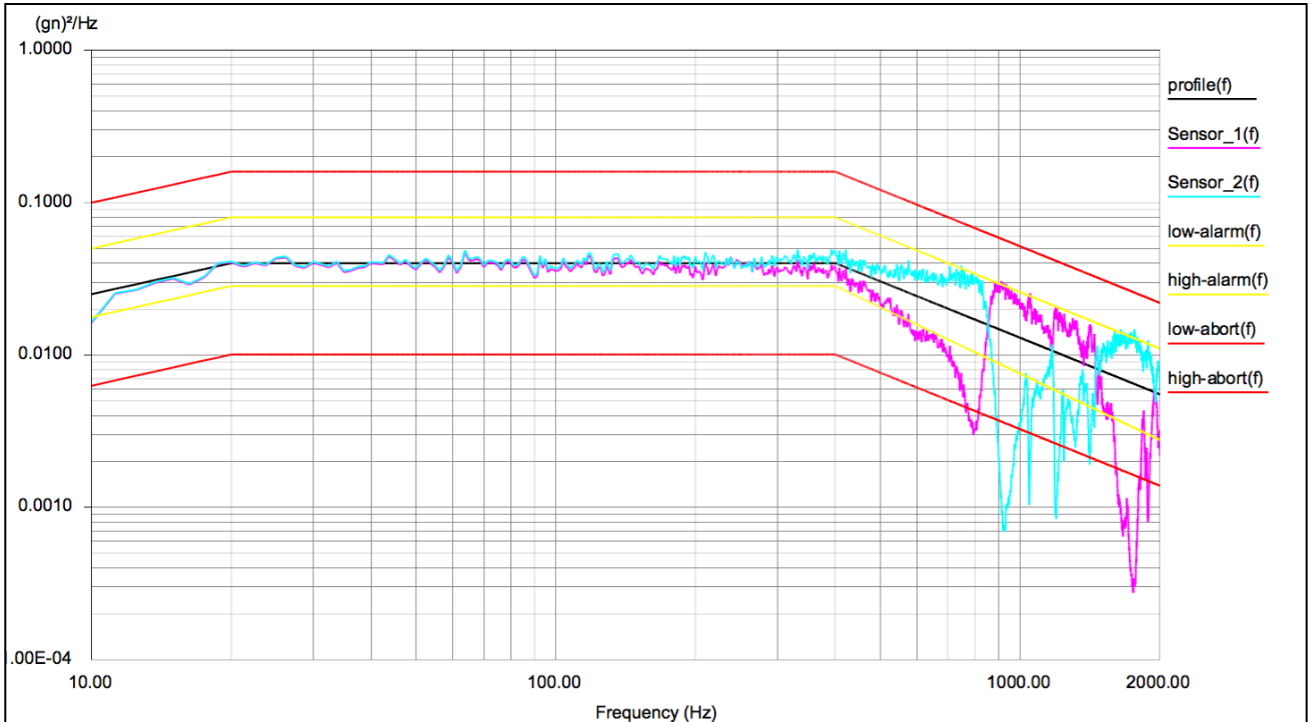


Abbildung 88: Shaker-Regelung Konzept 1 – Y-Richtung (ET)

Bei der Anregung in Y-Richtung ist ein ähnliches, aber verstärktes Verhalten im Vergleich zur X-Richtung zu beobachten. Der Nachteil der Sensorpositionierung der vorhandenen Halterung wird erkennbar, weil sich die Anregungen je nach Achse stark unterscheiden.

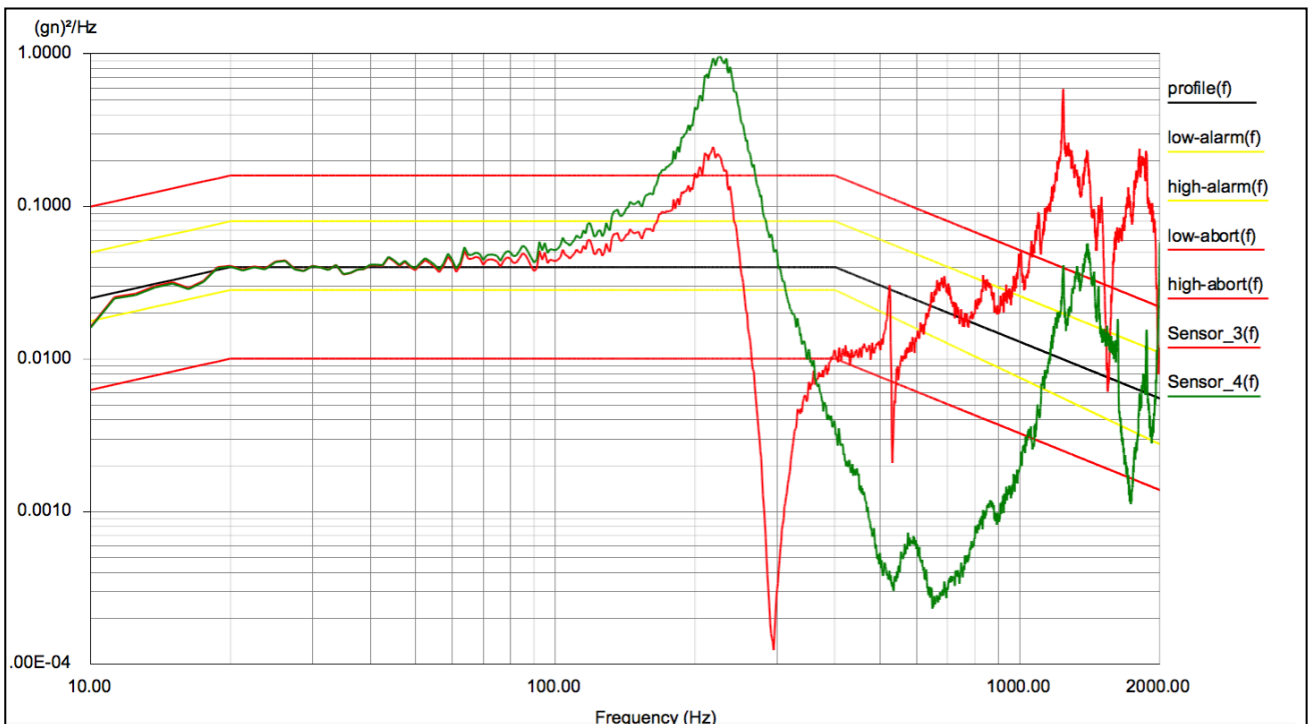


Abbildung 89: Sensoren am Generator Konzept 1 – Y-Richtung (ET)

Das Konzept 1 verhält sich bei der Y-Anregung ähnlich wie die bisherige Halterung (Abbildung 85). Auch hier liegt vermutlich eine Resonanz des Generators vor, beeinflusst durch die Halterung. Die Ausschläge sind anders als beim aktuellen Konzept stärker. Gerade bei den Dämpfungen im Bereich von 200 bis 1000Hz könnte dies durch die Silikonringe entstehen.

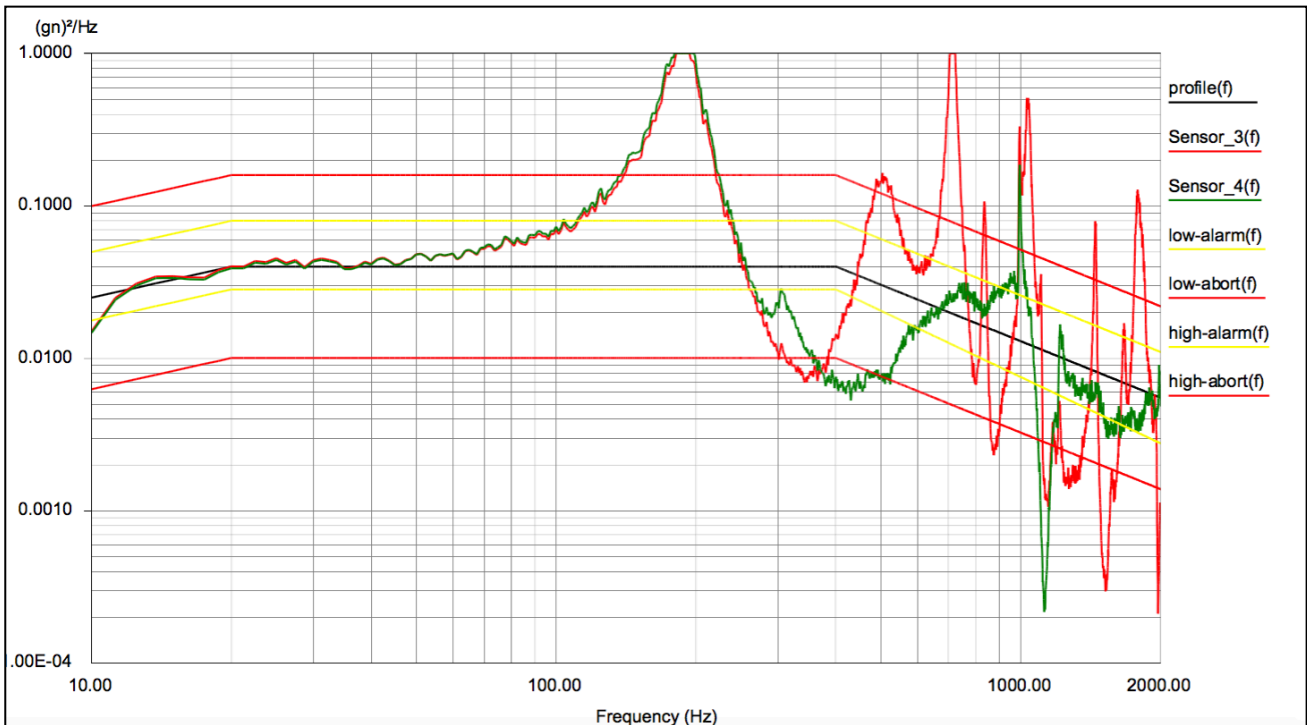


Abbildung 90: Sensoren am Generator Konzept 1 – Z-Richtung (ET)

Es zeigt sich das gleiche Phänomen wie bei der Resonanzsuche. Der Verlauf ähnelt der X-Achse, aber im Bereich von 300Hz bis 1000Hz tritt im Vergleich zur X-Richtung wieder eine starke Dämpfung auf. Die Messwerte bewegen sich näher an der Profillinie, was eine Verbesserung im Vergleich zu der X-Anregung ist. Wieso die Ergebnisse von X- und Z-Achse gerade in diesem Bereich signifikante Unterschiede aufweisen, müsste durch weitere Testläufe untersucht werden. Wie bereits beschrieben, ist die Position der Halterung in beiden Achsen identisch.

7.3.4.4 Konzept 2

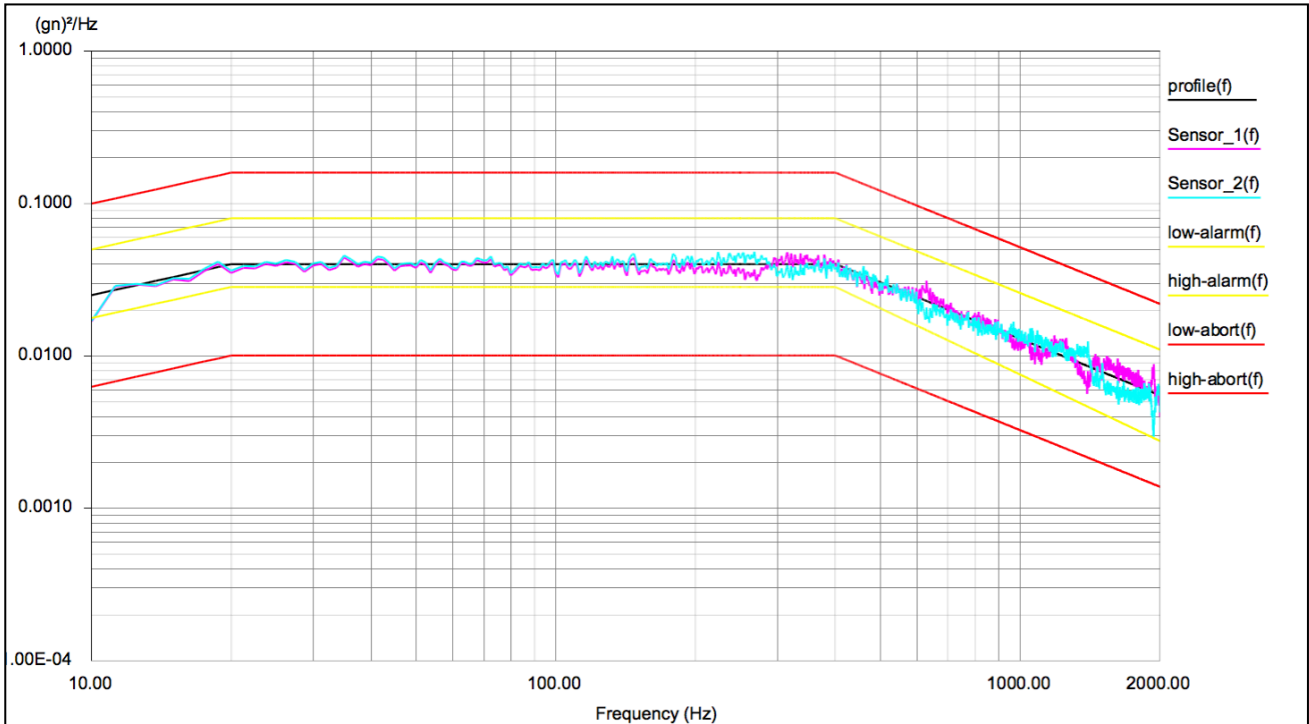


Abbildung 91: Shaker-Regelung Konzept 2 – X-Richtung (ET)

Der Graph der Regelsensoren weist bei Konzept 2 eine Verbesserung im Vergleich zu den anderen beiden Halterungen auf. Die Verlaufslinien sind durchgehend nahe an der Profillinie, der Shaker muss also nur wenig nachregeln.

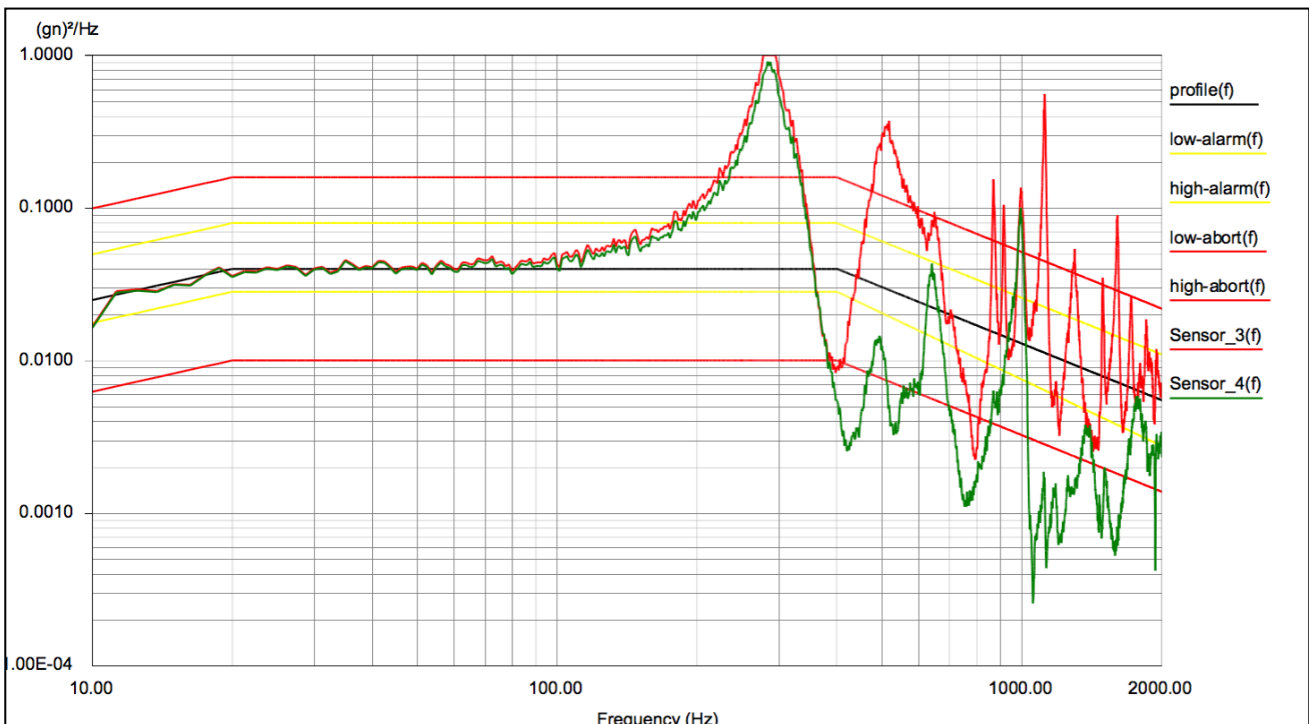


Abbildung 92: Sensoren am Generator Konzept 2 – X-Richtung (ET)

Die Beschleunigungen an den Generatoren sind ebenfalls etwas besser als bei der vorhandenen Halterung. Der grobe Verlauf ist vergleichbar, die Ausschläge fallen aber nicht so stark aus. Die Konstruktion des zweiten Konzepts ist deutlicher steifer als die jetzige,



obendrein umschließt sie den Generator nahezu vollständig. Dies könnte der Grund für die im Verlauf vergleichbaren, aber besseren Ergebnisse sein.

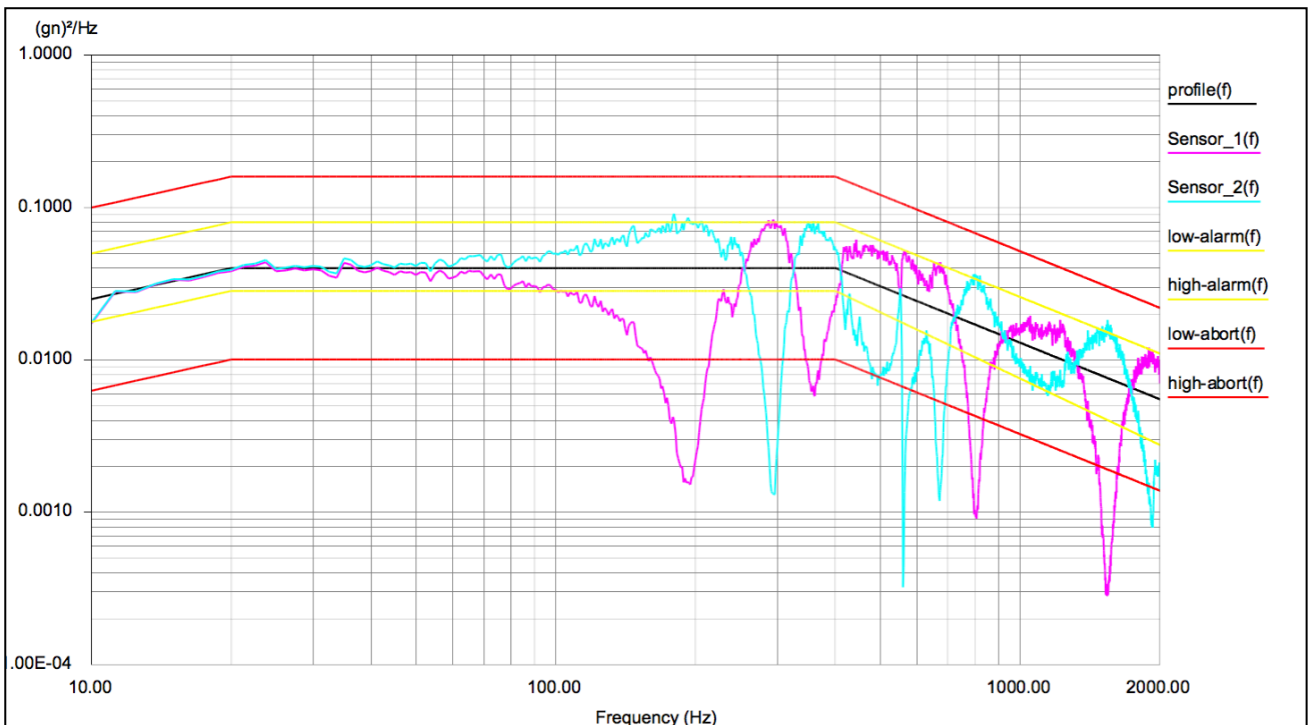


Abbildung 93: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (ET)

Die positive Entwicklung bei der X-Anregung konnte sich bei der Y-Richtung nicht fortsetzen. Die Regelkurven weisen hier große Differenzen zueinander auf. Dadurch verschiebt sich der Mittelwert.

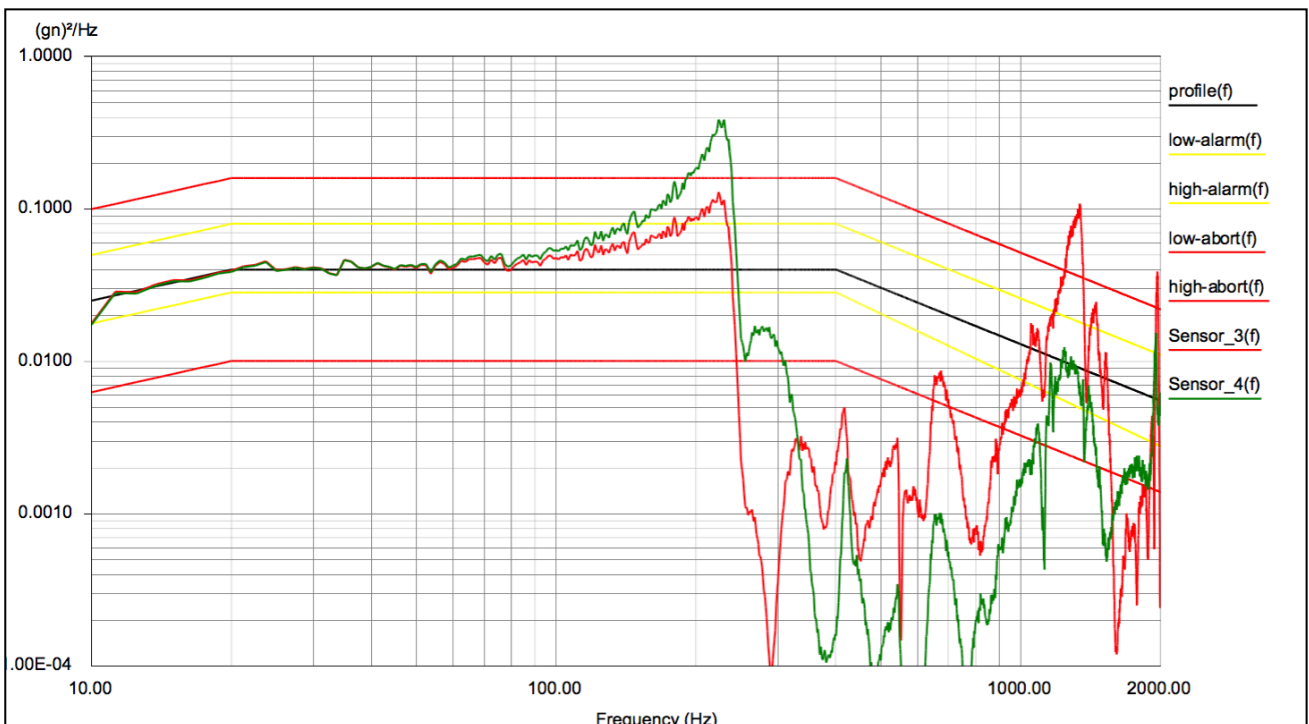


Abbildung 94: Sensoren am Generator Konzept 2 – Y-Richtung (ET)

Der Verlauf der Messsensoren zeigt wie bei der Resonanzsuche (Abbildung 80) wieder eine starke Dämpfung zwischen 300 und 1000Hz. Mögliche Ursachen wurden bereits bei der Resonanzsuche angesprochen. Sie haben auch hier Gültigkeit, da sich der Testaufbau

zwischen dem Endurance Test und der Resonanzsuche nicht verändert hat. Lediglich das Frequenzprofil und die Anregung unterscheiden sich.

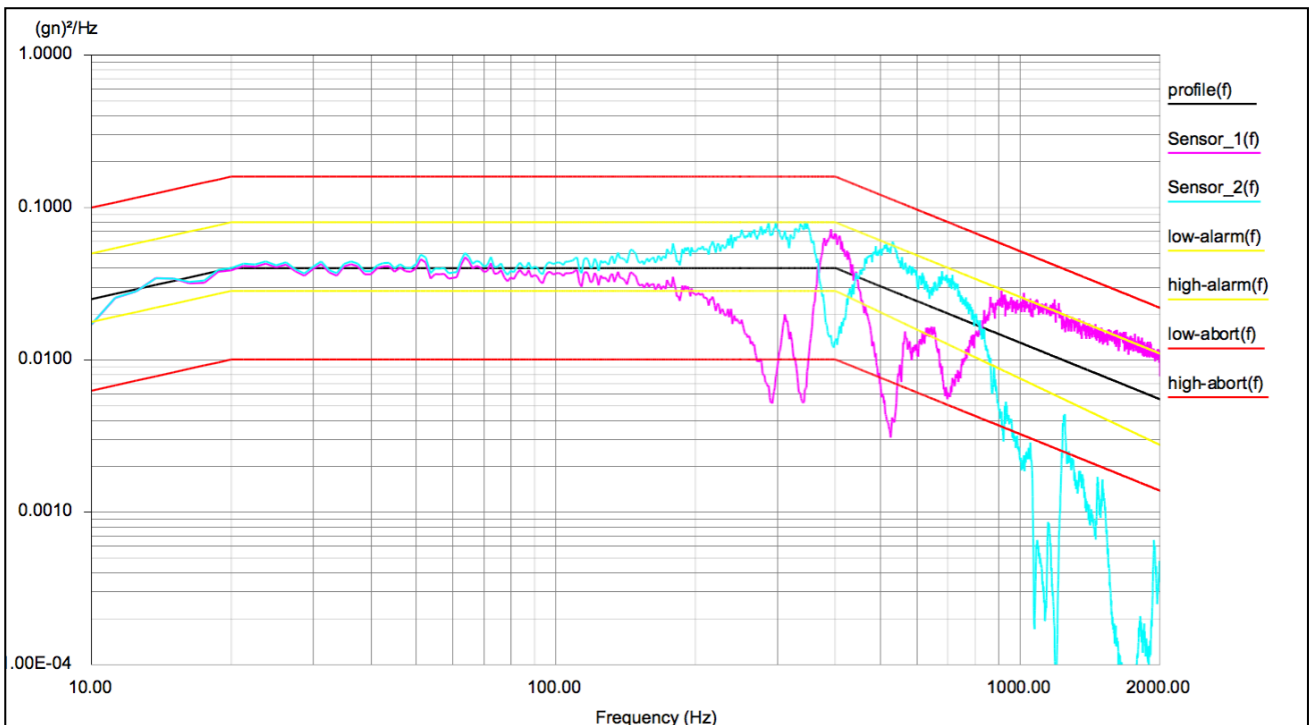


Abbildung 95: Shaker-Regelung Konzept 2 – Y-Richtung (ET)

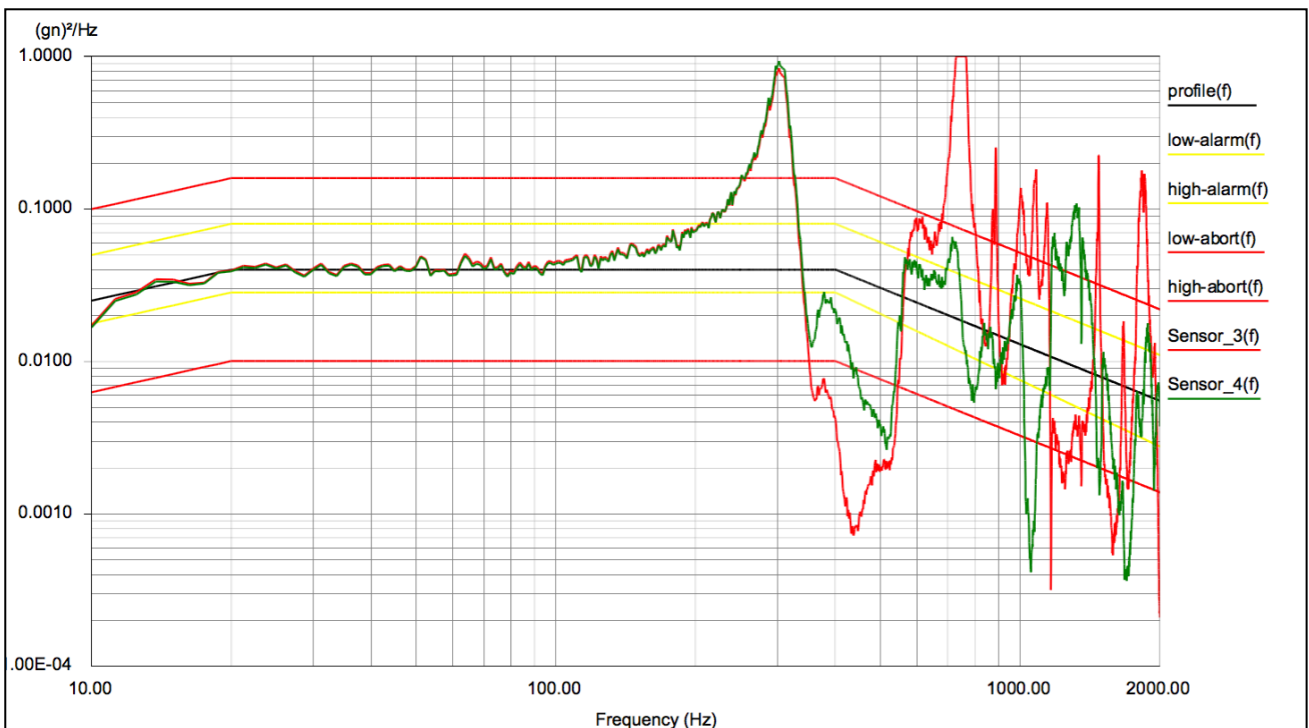


Abbildung 96: Sensoren am Generator Konzept 2 – Z-Richtung (ET)

Beim Vergleich der Anregung in Z- und X-Richtung (Abbildung 92) fällt eine Verstärkung im Bereich von 300Hz bis 800Hz auf. Das gleiche Muster konnte bereits bei Konzept 1 (Abbildung 87 und Abbildung 90) festgestellt werden, lediglich die Achsen sind vertauscht. Dies könnte wie der 300Hz-Peak ein Eigenverhalten des Generators sein, weil es unabhängig von der Halterung auftritt. Der Achswechsel von X auf Z hat auf die Halterung kaum Einfluss, für den Generator können sich aber Unterschiede ergeben.

### 7.3.4.5 Erkenntnisse – Endurance Test

Beim Endurance Test fallen die Ergebnisse je nach betrachteter Achse teilweise deutlich abweichend aus. Sie sind teils besser, teils schlechter als bei der Bestandshalterung. Auch hier muss erwähnt werden, dass sich die Regelsensoren bei den neuen Konzepten direkt an der Halterung befinden. Die Ergebnisse der bisherigen Halterung könnten dadurch verfälscht werden.

Der Einfluss der Silikonringe ist nicht klar definierbar. Es fehlt zudem an Vergleichswerten. Für eine fundierte Bewertung müssten mehr Testläufe gefahren werden, die auch den Einfluss von härteren oder weicheren Silikonringen untersuchen. Darüber hinaus müssten bei Konzept 1 die Auswirkungen verschiedener Vorspannkräfte der Abstandshülsen ermittelt werden. Stärkere oder schwächere Anzugsmomente könnten das Dämpfungsverhalten der Halterung beeinflussen. Gerade das Zusammenspiel aus Silikonringen und Vorspannkräften lässt viel Variation bei den Ergebnissen zu, die mit einem einmaligen Test nicht ermittelt werden können. Wie bereits bei der Resonanzsuche angemerkt, kann dies im Rahmen dieser Arbeit aber nicht geleistet werden.

## 7.3.5 Konstruktive Verbesserungen, Handhabung und Erkenntnisse

### 7.3.5.1 Konzept 1

Ein großer Vorteil des ersten Konzeptes besteht darin, dass es unabhängig vom Shaker vorbereitet werden kann. Aufgrund der Abstandshülsen werden die beiden Halterungen parallel zueinander ausgerichtet. Daher kann die Halterung anschließend direkt am Shaker montiert werden.

Die Silikonringe erweisen sich als widerstandsfähig. In wie vielen Zyklen die Silikonringe nutzbar sind, müssen Langzeittests untersuchen.

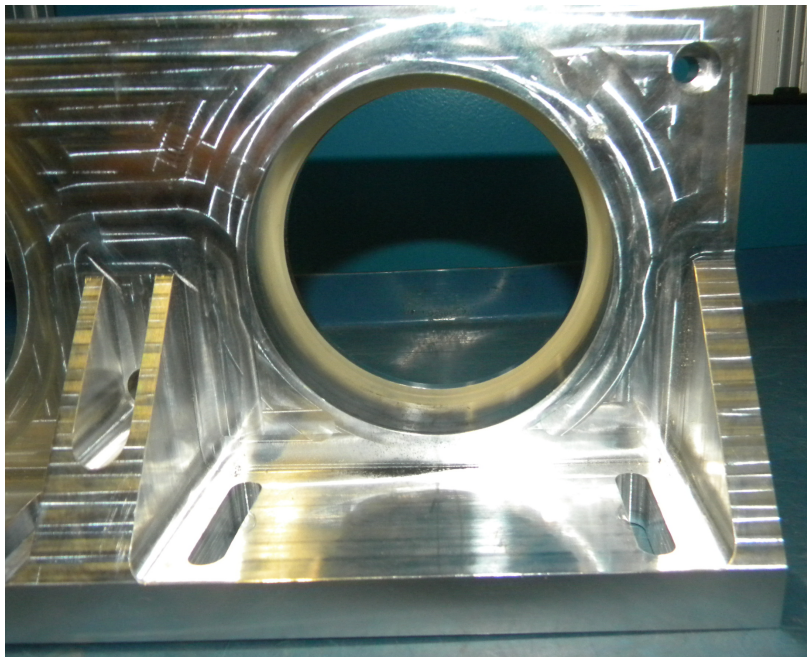


Abbildung 97: Silikonringe in der Halterung

Abbildung 97 zeigt die Silikonringe nach den Testversuchen. Sie waren dabei über Nacht der vollen Vorspannkraft ausgesetzt. Nach den Testversuchen ist keine Beschädigung der Ringe festzustellen. Als Shore-Härte wurde für die Ringe 50 gewählt.

Die Kombination aus Einspannen des Generators in Längsrichtung und Verwendung von Silikonringen hat das Risiko einer Beschädigung des Generators deutlich gesenkt. Auch bei hoher Vorspannkraft der Abstandshülsen konnte kein Schaden am Generator festgestellt werden. Die Vorspannkraft wird zusätzlich durch einen Hülsenanschlag in der Halterung begrenzt.

Die Handhabung ist allgemein besser als bei der vorhandenen Halterung. Die Abstandshülsen erlauben einen schnellen Achswechsel, es müssen lediglich die Schrauben am Shaker gelöst werden. Das Vorbereiten abseits des Shakers spart zusätzlich Zeit und ermöglicht ein Arbeiten auf komfortabler Arbeitshöhe.

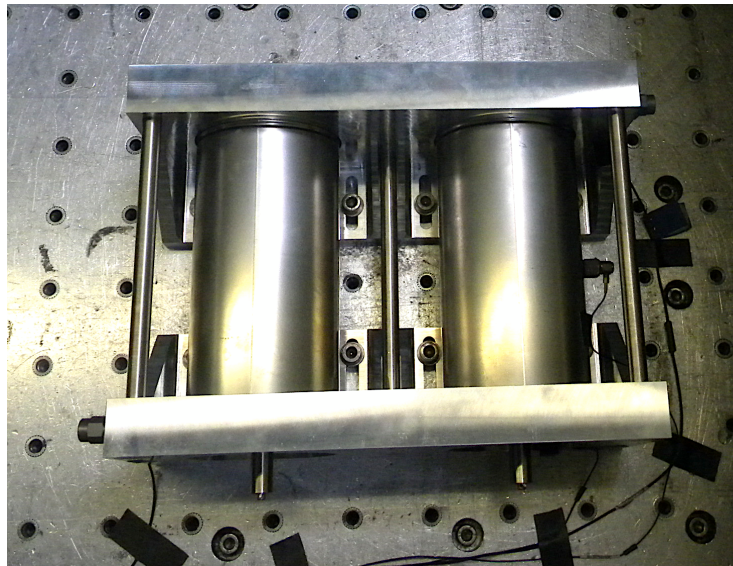


Abbildung 98: Arbeitsraum Konzept 1

Allerdings besteht beim konkret getesteten Generatortyp eine Einschränkung, wie Abbildung 98 zeigt. Es bleibt wenig Platz, um die Befestigungsschrauben am Shaker anzuziehen, das gilt insbesondere für das Arbeiten mit Drehmomentschlüsseln. Abstandshülsen und Generator liegen eng beieinander.

Dieses Manko ist aber auf den verwendeten Generator mit einem Durchmesser von 90mm zurückzuführen. Der Abstand der Langlöcher in der Halterung beträgt nur 100mm. Die Halterung müsste um zwei Lochabstände (100mm bzw. 33%) breiter werden, um dieses Problem zu lösen. Allerdings würde die Halterung dann nicht mehr auf jede Shakerplatte passen und wäre schwerer und unhandlicher. Die verwendeten Generatoren sind die größten ihrer Art. Es handelt sich also nicht um einen generellen Nachteil der Halterung, er ergibt sich ausschließlich bei diesem Generatortyp. Bei kleinerem Generator-Durchmesser kommt es nicht mehr zu dieser Einschränkung.

Ein Punkt sollte am Konzept 1 konstruktiv verbessert werden. Die Bohrungen, durch die die Abstandshülsen geführt werden, sollten etwas größere Toleranzen aufweisen. Dadurch könnten die Hülsen bei unebenem Arbeitsuntergrund leichter eingeführt werden. Mehr Spiel ist möglich, da die Hülsen unter Vorspannung und damit dauerhaft unter einer Zugbelastung stehen. Zu einem Verschieben innerhalb der Bohrung kommt es daher nicht. Außerdem empfiehlt es sich, die Abstandshülsen am vorderen Ende trichterförmig zu gestalten. Das würde das Einführen in die Bohrung erleichtern.

Nr.	Anforderung	Beschreibung	Kategorie	Forderung
1	Geometrie	Halterung für zwei baugleiche Generatoren	Should	Erfüllt
2	Geometrie	Kraftschlüssige Verbindung	Should	Erfüllt
3	Geometrie	Wärmeabfuhr ohne Beeinträchtigung zwischen Generatoren	Should	Erfüllt
4	Geometrie	Kein scharfer Übergang (Generator / Halterung)	Should	Erfüllt
5	Geometrie	Anschlüsse am Generator müssen zugänglich sein	Shall	Erfüllt
6	Geometrie	Getrennte Verschraubung (Shaker / Generator)	May	Erfüllt
7	Ergonomie	Einfache Handhabung	Should	Grundsätzlich erfüllt
8	Ergonomie	Kein Drehmomentschlüssel	May	ungewiss
9	Ergonomie	Kurze Umrüstzeiten	Should	Erfüllt
10	Ergonomie	Für unterschiedliche Generatorlängen	May	Nur durch unterschiedliche Hülsen
11	Technisch	Geringes Gewicht	Should	-
12	Technisch	Fertigungstoleranzen ausgleichen	Should	Erfüllt
13	Technisch	Konzept anwendbar auf unterschiedliche Durchmesser	Should	Erfüllt
14	Technisch	Halterung aus hitzebeständigen Material	Shall	Erfüllt
15	Technisch	Generatoren müssen nach Prüfung voll funktionsfähig sein	Shall	Nicht getestet
16	Technisch	Crash Shocks ohne Lockerung	Shall	Nicht getestet
17	Technisch	Rauschen in alle Raumachsen (X-Y-Z) ohne Lockerung	Shall	Erfüllt
18	Technisch	Sinusförmige Vibration (X-Y-Z) ohne Lockerung	Shall	Erfüllt
19	Technisch	Auslösevorrichtung für Zeiterfassung	Should	Nicht konstruiert
20	Technisch	Keine sichtbare Verformung/Beschädigung des Generators	Shall	Erfüllt
21	Technisch	Funktionsfähig im zu prüfenden Frequenzbereich	Shall	Erfüllt
22	Technisch	Die Halterung darf das Flussprofil nicht beeinflussen	Shall	Nicht getestet
23	Technisch	Konzept muss mit Zulassung konform sein	Shall	-
24	Fertigung	Kostengünstig Herstellung	Should	-
25	Fertigung	Leicht herstellbar	Should	-

Tabelle 12: Erfüllte Anforderungen – Konzept 1

*Hinweis: Bei Anforderungen ohne Bewertung fehlten die genauen Vorgaben. Deshalb konnte nicht beantwortet werden, ob die Anforderung erfüllt wurde oder nicht.*

Tabelle 12 listet noch einmal auf, welche gesetzten Anforderungen das Konzept 1 erfüllt.

### 7.3.5.2 Konzept 2

Das Konzept 2 ist eine Weiterentwicklung der jetzigen Halterung mit zwei wesentlichen Vorteilen. Es erlaubt, die Halterung frei am Generator zu positionieren. Hierdurch wird die Gefahr einer Beschädigung des Generators minimiert, weil die Halterung gezielt an seinen stabilen Stellen angebracht werden kann. Zweiter Vorteil ist, dass die Verschraubungen für die Befestigung am Shaker und die zum Halten des Generators getrennt wurden. Hierdurch können unterschiedliche Momente aufgetragen werden.

Allerdings kämpft auch dieses Konzept mit den Problemen seines Vorgängers. Durch die Silikonringe zwischen Halterung und Generator wird eine so große Haftkraft erzeugt, dass die Oberschale nur mit einem sehr geringen Drehmoment an der Unterschale verschraubt werden darf. Dieses geringe Drehmoment zu bemessen, ist aber schwierig. Es ist zudem darauf zu achten, dass es nicht zu Verkantungen kommt. Zwischen Ober- und Unterschale muss ein gleichmäßiger Spalt entstehen (Abbildung 99).

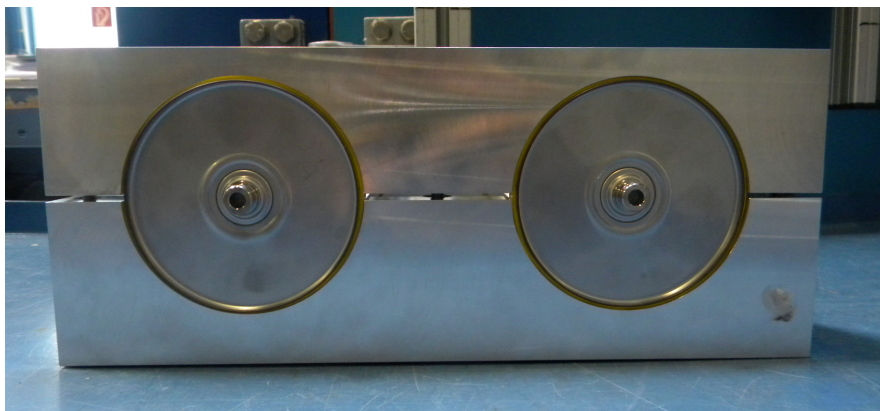


Abbildung 99: Verschraubung – Konzept 2

Die Gefahr, die Generatoren zu beschädigen, besteht weiter, auch wenn das Risiko geringer ist als bei der bisherigen Halterung.

Die neu entwickelte Konstruktion kann nicht außerhalb des Shakers vorbereitet werden. Die beiden Halterungen sind mechanisch nicht verbunden wie beim Konzept 1. Wird die Oberschale mit der Unterschale verschraubt, kann es passieren, dass sich die Halterungen gegenseitig verschieben. Hierdurch passen die Langlöcher der Halterung nicht zu den Bohrungen der Shakergrundplatte. Die Halterung muss daher zunächst am Shaker montiert werden. Für einen Achswechsel brauchen die Generatoren dann aber nicht mehr entnommen zu werden. Ein schneller Achswechsel ist also möglich. Im Gegensatz zum Konzept 1 lässt sich aber keine Zeit durch Vorbereiten der Halterung sparen.

Nr.	Anforderung	Beschreibung	Kategorie	Forderung
1	Geometrie	Halterung für zwei baugleiche Generatoren	Should	Erfüllt
2	Geometrie	Kraftschlüssige Verbindung	Should	Erfüllt
3	Geometrie	Wärmeabfuhr ohne Beeinträchtigung zwischen Generatoren	Should	Erfüllt
4	Geometrie	Kein scharfer Übergang (Generator / Halterung)	Should	Erfüllt
5	Geometrie	Anschlüsse am Generator müssen zugänglich sein	Shall	Erfüllt
6	Geometrie	Getrennte Verschraubung (Shaker / Generator)	May	Erfüllt
7	Ergonomie	Einfache Handhabung	Should	Mit Einschränkung erfüllt
8	Ergonomie	Kein Drehmomentschlüssel	May	Nicht erfüllt
9	Ergonomie	Kurze Umrüstzeiten	Should	Mit Einschränkung erfüllt
10	Ergonomie	Für unterschiedliche Generatorlängen	May	Erfüllt
11	Technisch	Geringes Gewicht	Should	-
12	Technisch	Fertigungstoleranzen ausgleichen	Should	Erfüllt
13	Technisch	Konzept anwendbar auf unterschiedliche Durchmesser	Should	Erfüllt
14	Technisch	Halterung aus hitzebeständigen Material	Shall	Erfüllt
15	Technisch	Generatoren müssen nach Prüfung voll funktionsfähig sein	Shall	Nicht getestet
16	Technisch	Crash Shocks ohne Lockerung	Shall	Nicht getestet
17	Technisch	Rauschen in alle Raumachsen (X-Y-Z) ohne Lockerung	Shall	Erfüllt
18	Technisch	Sinusförmige Vibration (X-Y-Z) ohne Lockerung	Shall	Erfüllt
19	Technisch	Auslösevorrichtung für Zeiterfassung	Should	Nicht konstruiert
20	Technisch	Keine sichtbare Verformung/Beschädigung des Generators	Shall	Nicht erfüllt
21	Technisch	Funktionsfähig im zu prüfenden Frequenzbereich	Shall	Erfüllt
22	Technisch	Die Halterung darf das Flussprofil nicht beeinflussen	Shall	Nicht getestet
23	Technisch	Konzept muss mit Zulassung konform sein	Shall	-
24	Fertigung	Kostengünstig Herstellung	Should	-
25	Fertigung	Leicht herstellbar	Should	-

Tabelle 13: Erfüllte Anforderungen – Konzept 2

Tabelle 13 fasst die Anforderungen zusammen, die das Konzept 2 erfüllt.

## 8 Abschließende Bewertung und Fazit

Den klaren „Sieger“ zu bestimmen, fällt schwer. Beide Konzepte haben die Testläufe erfolgreich absolviert. Beide Male gibt es sowohl bessere als auch schlechtere Werte als bei der aktuellen Halterung. Es ist unklar, wie stark sich die Positionierung der Regelsensoren – einmal auf der Grundplatte, einmal an der Halterung – auf die Messwerte auswirkt. Auch der Einfluss der Silikonringe ist noch nicht ausreichend untersucht. Zusammenfassend: Für ein sicheres Urteil müssten deutlich mehr Testreihen vorgenommen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit gab es pro Halterung und Achse nur einen Testlauf. Die Aussagekraft ist damit gering. Mit einem Test lässt sich nicht zuverlässig ermitteln, wie unterschiedliche Vorspannkräfte der Abstandshülsen, andere Härtegrade der Silikonringe oder falsche Anzugsmomente sich auf die Ergebnisse auswirken. Gerade Konzept 1 mit der Kombination aus Silikonringen und Vorspannkräften eröffnet Spielraum für eine Beeinflussung der Messergebnisse. Eins lässt sich aber aus den Untersuchungen ableiten: Die neuen Konzepte liefern zumindest vergleichbare Resultate wie das bisherige.

In die Gesamtbewertung fließen aber noch andere Faktoren als die Beschleunigungsmesswerte ein. Beide Konzepte verringern deutlich das Risiko, den Generator zu beschädigen. Das ist für die anschließende Flow-Messung elementar, da sich nur so eventuelle Produktionsfehler ermitteln lassen. Hier liegt das Konzept 1 vorn. Durch die Abstandshülsen wird die Vorspannkraft limitiert, ein zu starkes Anziehen wird konstruktiv verhindert. Dadurch können auch unerfahrene Mitarbeiter mit der Halterung arbeiten. Bei Konzept 2 muss dagegen weiterhin sorgfältig darauf geachtet werden, das richtige Anzugsmoment aufzubringen. Das Risiko einer Beschädigung des Generators ist aber auch hier deutlich eingegrenzt.

Im Vergleich zur bisherigen Halterung bieten beide Konzepte eine höhere Benutzerfreundlichkeit. Die Umspannzeiten fallen kürzer aus. Konzept 1 erlaubt obendrein, die Halterung unabhängig vom Shaker vorzubereiten. Das spart zusätzlich Zeit. Dennoch: Bis jetzt ist keines der beiden neuen Konzepte dem jeweils anderem klar überlegen, beide haben aber zahlreiche Vorteile gegenüber der jetzigen Halterung. Konzept 1 bietet das bessere Handling, Konzept 2 erreicht nach bisherigem Stand die besseren Messwerte. Im Detail erhärten können das nur weitere Tests. Die Entscheidung darüber liegt beim Kunden, er muss letzten Endes seinen „Sieger“ küren.

## Literaturverzeichnis

- Airbus 2007** „Flight Operations Briefing Notes“ [[http://www.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/safety\\_library\\_items/AirbusSafetyLib\\_-FLT\\_OPS-CAB\\_OPS-SEQ09.pdf](http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/safety_library_items/AirbusSafetyLib_-FLT_OPS-CAB_OPS-SEQ09.pdf)], 04/2007, aufgerufen 23.05.2016
- Boeing 2016** „Lower Cabin Altitude, More Comfortable Flight“, [<http://www.boeing.com/commercial/787/#/design-highlights/passenger-experience/lower-cabin-altitude/>], aufgerufen 17.05.2016
- CSB 2016** „Safety Advisory Dangers of Unspent Aircraft Oxygen Generators“ [[http://www.csb.gov/assets/1/19/EQ\\_Safety\\_Advisory\\_Final.pdf](http://www.csb.gov/assets/1/19/EQ_Safety_Advisory_Final.pdf)], aufgerufen 25.05.2016
- FAA 2003** „AC 61-107A - OPERATIONS OF AIRCRAFT AT ALTITUDES ABOVE 25,000 FEET MSL AND/OR MACH NUMBERS (MMO) GREATER THAN .75 “, [[http://www.faa.gov/pilots/training/airman\\_education/media/ac%2061-107a.pdf](http://www.faa.gov/pilots/training/airman_education/media/ac%2061-107a.pdf)], 02.01.2003, aufgerufen 23.05.2016
- Gross 2011** GROSS, DIETMAR; HAUGER, WOLFGANG; SCHRÖDER, JÖRG; WALL, WOLFGANG A.: *Technischen Mechanik I*, 11. Auflage, Springer-Verlag, 2011
- Hering 2009** HERING, EKBERT; MARTIN, ROLF; STOHER, MARTIN: *Taschenbuch der Mathematik und Physik*, 5. Auflage, Springer-Verlag, 2009



## Abbildungsquellen

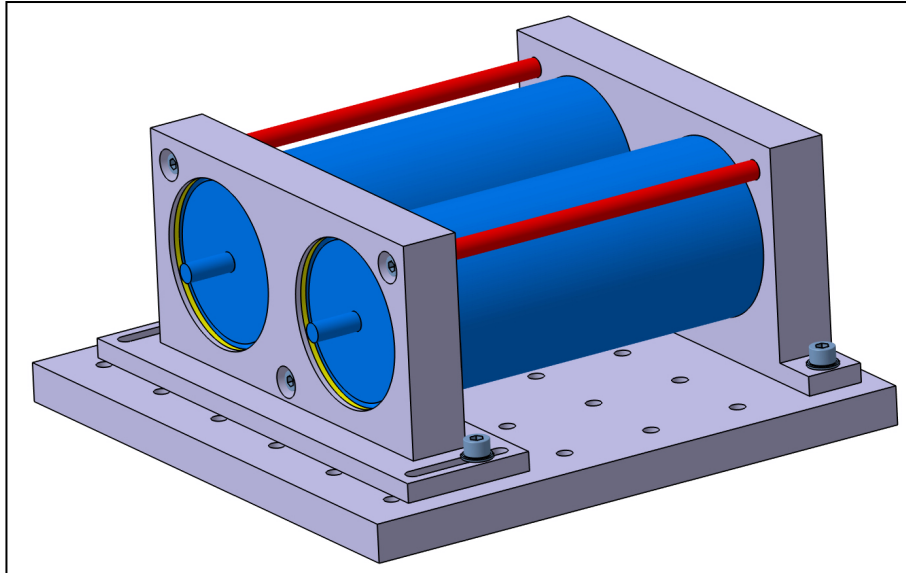
- Abbildung 1 B/E AEROSPACE.: *Qualification Test Programme Chemical Qxygen Generator Assembly E670XX-XX Series*, B/E Aerospace, 25.03.2014, Revision 0, Seite 14
- Abbildung 2 B/E AEROSPACE.: *Qualification Test Programme Chemical Qxygen Generator Assembly E670XX-XX Series*, B/E Aerospace, 25.03.2014, Revision 0, Seite 13
- Abbildung 3 B/E AEROSPACE.: *Qualification Test Programme Chemical Qxygen Generator Assembly E670XX-XX Series*, B/E Aerospace, 25.03.2014, Revision 0, Seite 56
- Abbildung 23 RTCA INC.: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborn Equipment*, RTCA Inc., 2010, Seite 8-15
- Abbildung 56 B/E AEROSPACE.: *Qualification Test Programme Chemical Qxygen Generator Assembly E670XX-XX Series*, B/E Aerospace, 25.03.2014, Revision 0, Seite 56
- Abbildung 59 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
- Abbildung 60 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
- Abbildung 61 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
- Abbildung 62 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
- Abbildung 63 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
- Abbildung 64 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
- Abbildung 65 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1*, B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 10
- Abbildung 66 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
- Abbildung 67 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
- Abbildung 68 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
- Abbildung 69 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
- Abbildung 70 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 8

Abbildung 71	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
Abbildung 72	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
Abbildung 73	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Anhang
Abbildung 74	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 11
Abbildung 75	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
Abbildung 76	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
Abbildung 77	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 6
Abbildung 78	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 4
Abbildung 79	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
Abbildung 80	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 8
Abbildung 81	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 10
Abbildung 82	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 10
Abbildung 83	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1</i> , B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
Abbildung 84	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1</i> , B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
Abbildung 85	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 1</i> , B/E Aerospace, 27.07.2016, Revision 0, Datasheet 9
Abbildung 86	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
Abbildung 87	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
Abbildung 88	B/E AEROSPACE.: <i>Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2</i> , B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 9

- Abbildung 89 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 9
- Abbildung 90 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 2*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 12
- Abbildung 91 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
- Abbildung 92 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
- Abbildung 93 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 9
- Abbildung 94 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
- Abbildung 95 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 9
- Abbildung 96 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016 / Test 3*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Datasheet 7
- Abbildung 97 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Anhang
- Abbildung 98 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Anhang
- Abbildung 99 B/E AEROSPACE.: *Test Report D1379-TR-195-2016*, B/E Aerospace, 28.07.2016, Revision 0, Anhang

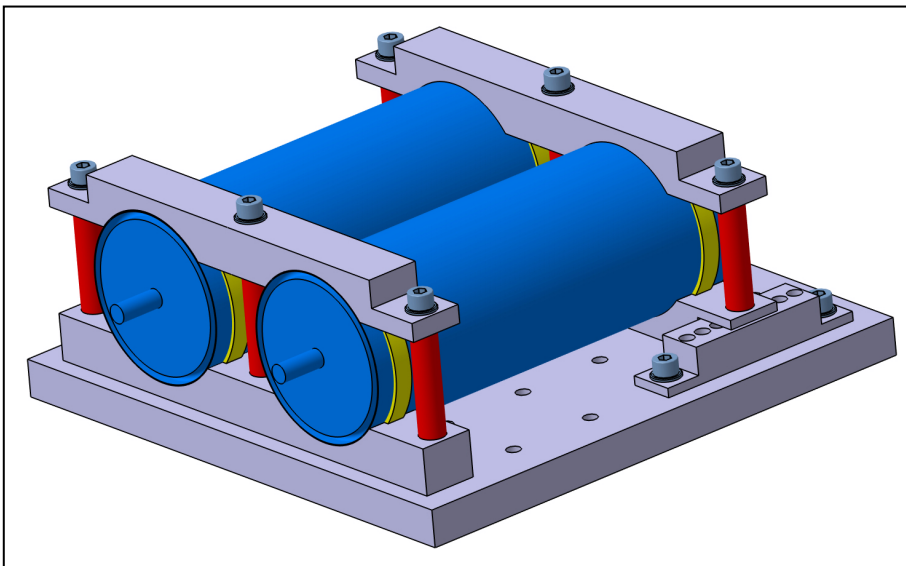
## **Anhang A – Vorherige Versionen**

**Konzept 1:**

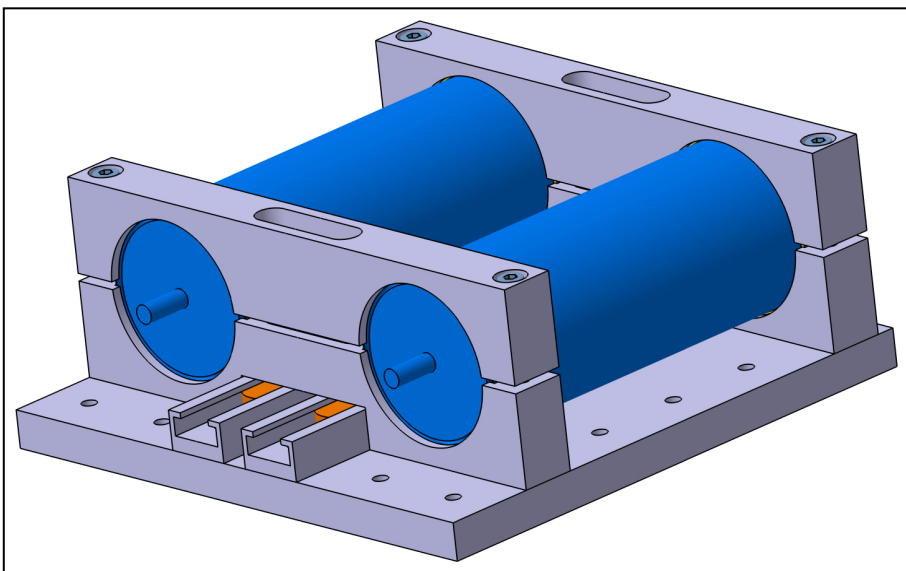


*Konzept 1 –Version 1*

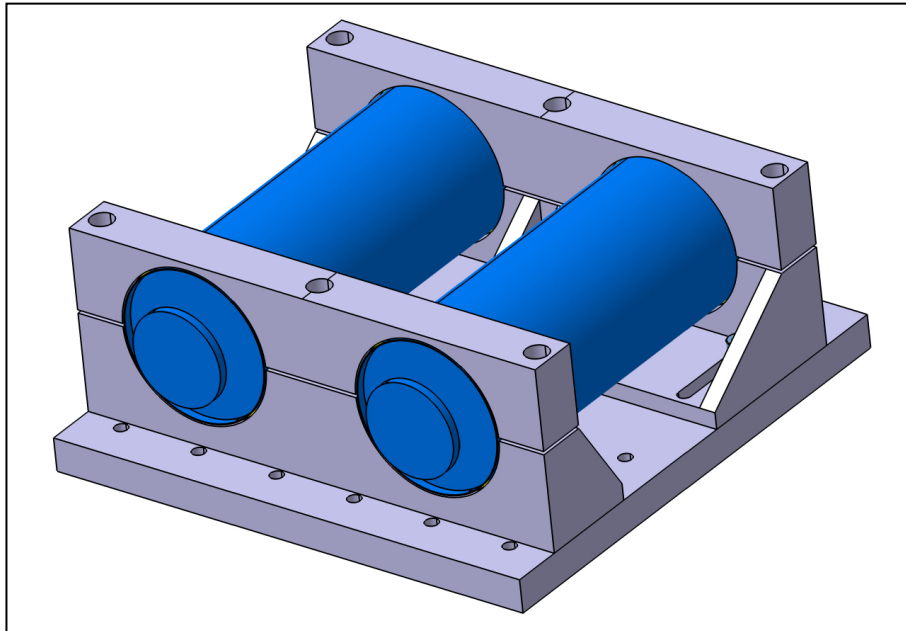
**Konzept 2:**



*Konzept 2 – Version 1*

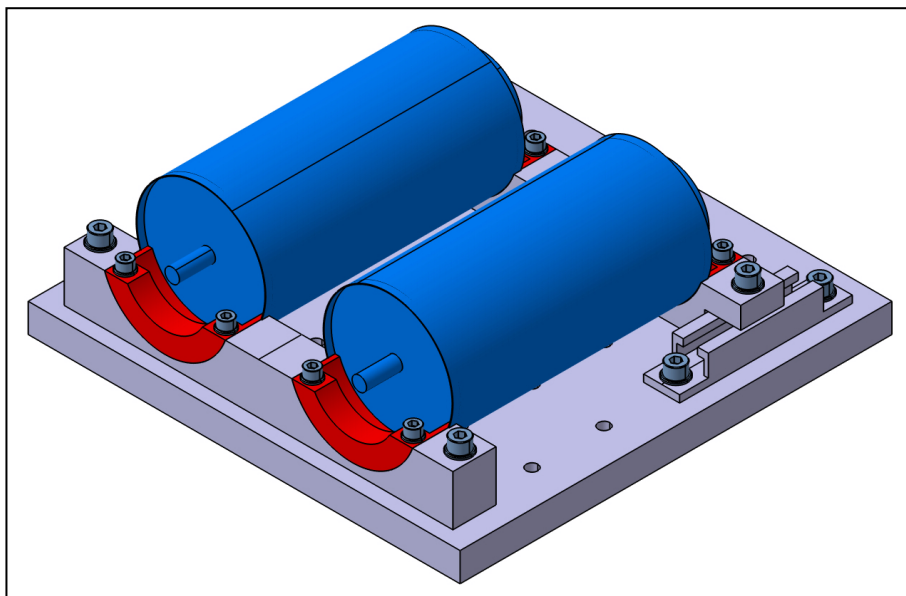


*Konzept 2 – Version 4*



*Konzept 2 – Version 6*

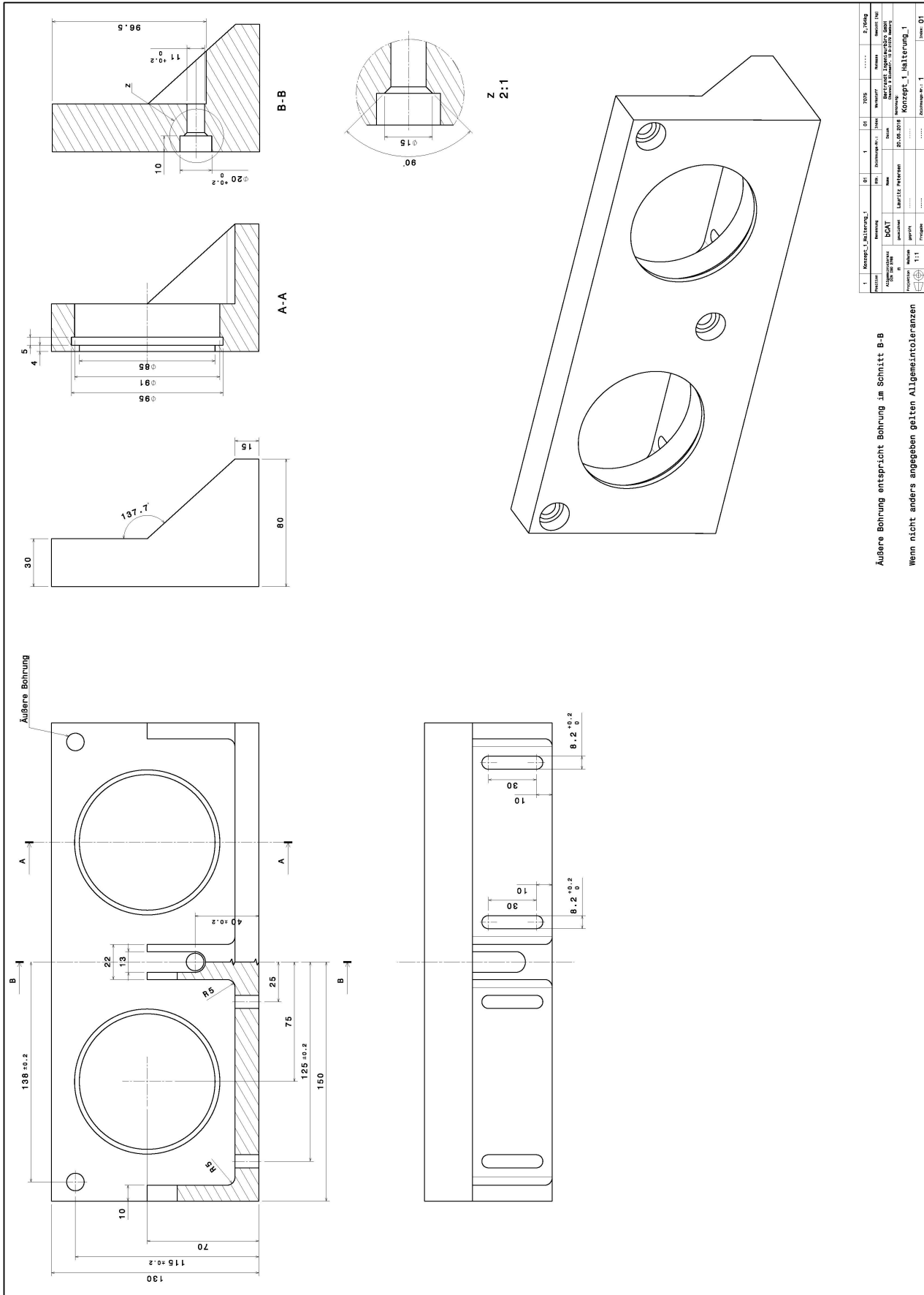
**Konzept 3:**



*Konzept 3 – Version 1*

## **Anhang B – Fertigungszeichnungen**

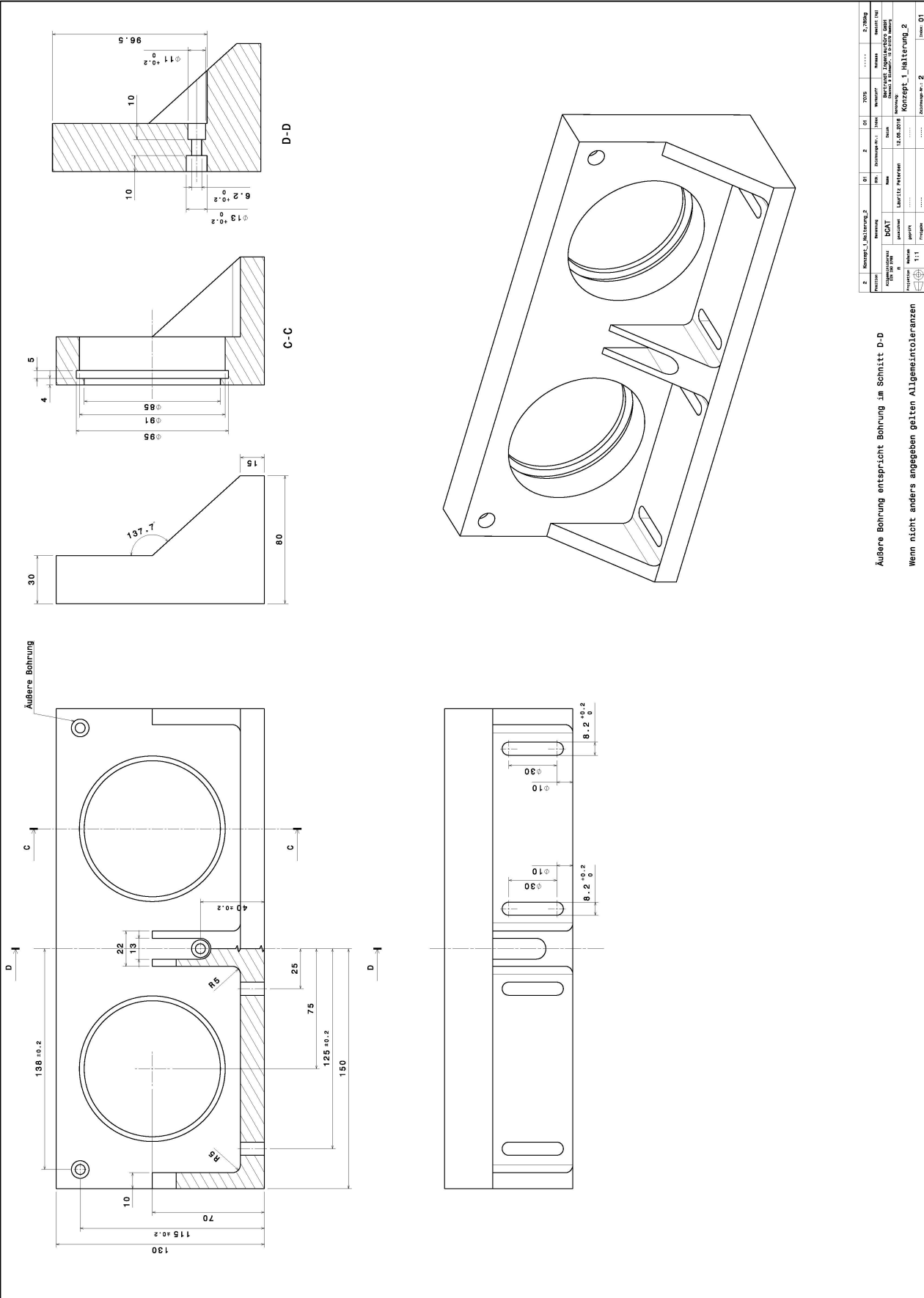
**Konzept 1:**



1		Konzept_1_Halterung_1		01		1		01		2_2016		2_2016	
Position		Bezeichnung		Menge		Material		Maßstab		Gezeichnet		Geprüft	
Konzept_1_Halterung_1		Konzept_1_Halterung_1		1		Alu		1:1		Lauritz		Lauritz	
Projekt		Konzept_1_Halterung_1		1		Alu		1:1		Lauritz		Lauritz	
Autor		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz	
Datum		30.08.2016		30.08.2016		30.08.2016		30.08.2016		30.08.2016		30.08.2016	
Projektor		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz	
Projektor		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz	
Projektor		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz		Lauritz	

Äußere Bohrung entspricht Bohrung im Schnitt B-B  
Wenn nicht anders angegeben gelten Allgemeintoleranzen

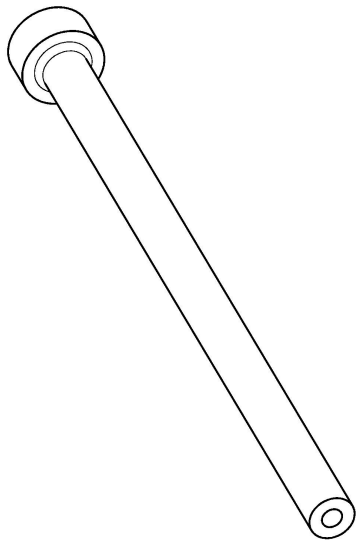
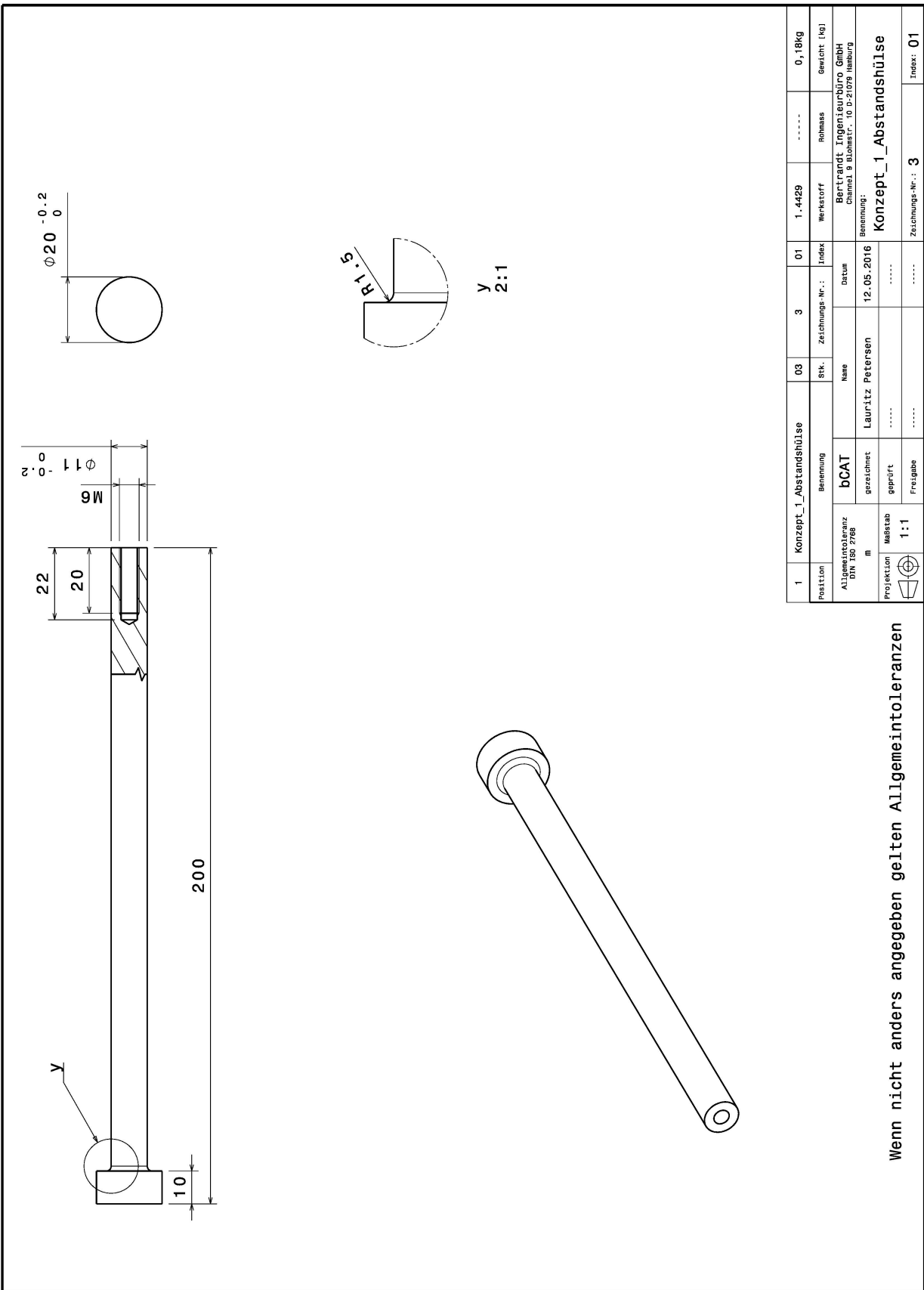




2	Montageplan_Halterung_2	01	2	01	2025	-----	2.2025
Projektion	Abbildung	Blatt	Blattzahl	Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel
Abbildung	Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel
Blattname	Blattformat	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel	Blattgröße	Blatttitel

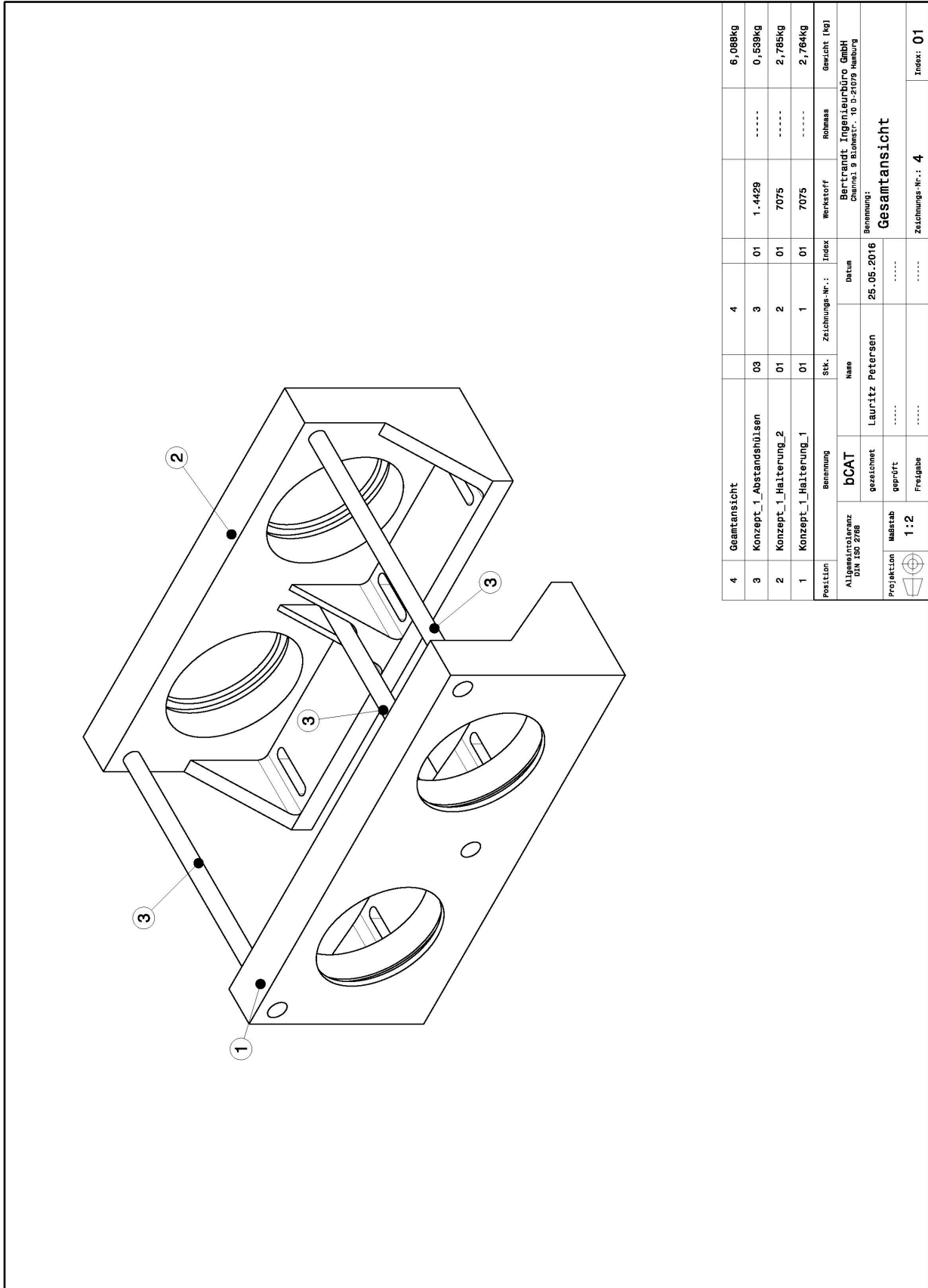
Äußere Bohrung entspricht Bohrung im Schnitt D-D

Wenn nicht anders angegeben gelten Allgemeintoleranzen



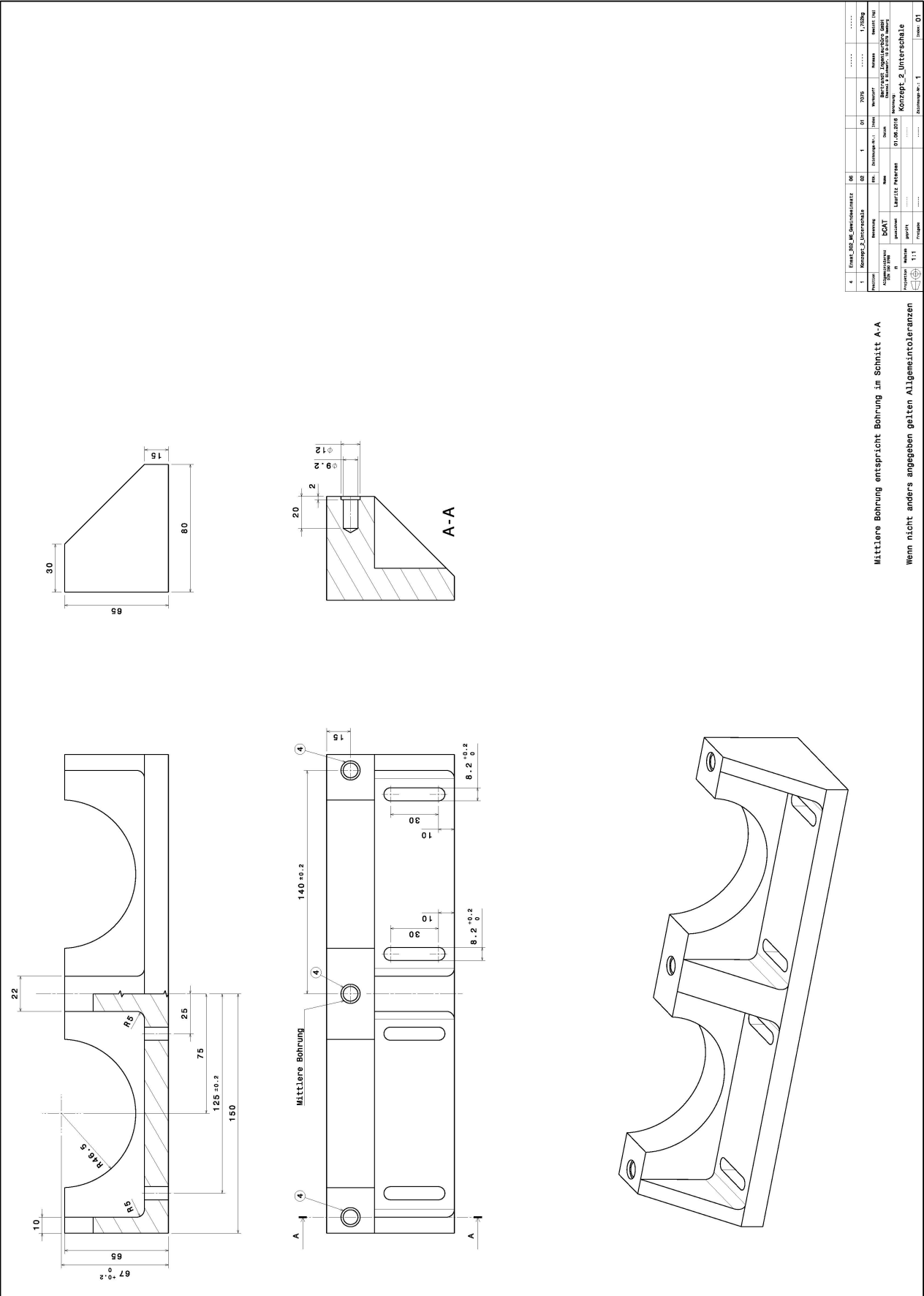
Wenn nicht anders angegeben gelten Allgemeintoleranzen

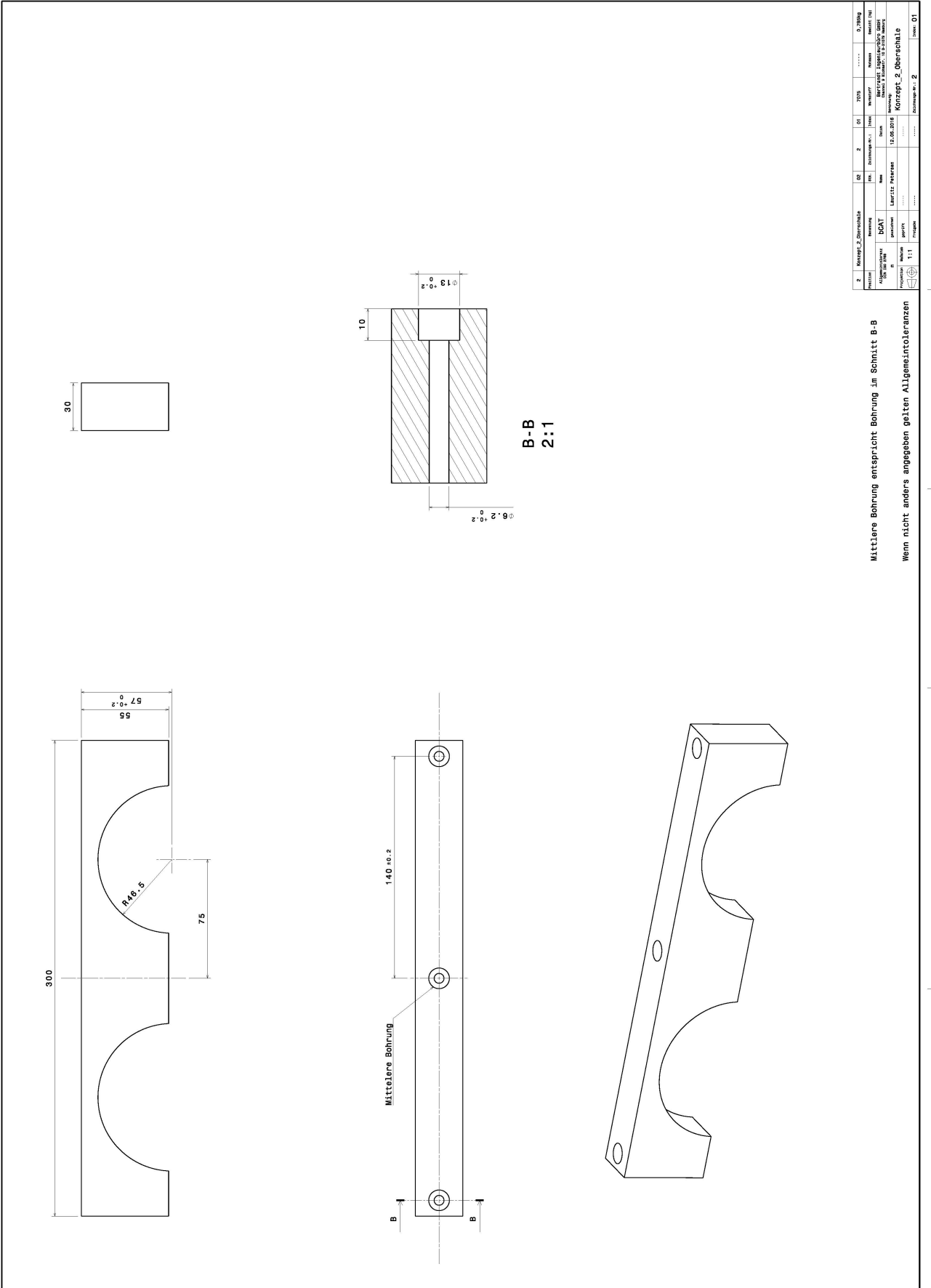
1	Konzept_1_Abstandshülse	03	3	01	1.4429	-----	0,18kg
Position		Stk.		Index		Gewicht [kg]	
Allgemeintoleranz DIN ISO 2768		Name		Datum		Bertrand Ingenieurbüro GmbH Chimmel & Blomestr. 10 D-21079 Hamburg	
m		Lauritz Petersen		12.05.2016		Bezeichnung: <b>Konzept_1_Abstandshülse</b>	
Projektion		gezeichnet		geprüft		Zeichnungs-Nr.: 3	
Maßstab		1:1		Freigabe		Index: 01	



4	Geamtansicht		4			6,088kg
3	Konzept_1_Abstandshülsen	03	3	01	1.4429	0,539kg
2	Konzept_1_Halterung_2	01	2	01	7075	2,785kg
1	Konzept_1_Halterung_1	01	1	01	7075	2,784kg
Position		Stk.		Zschungs-Nr.:	Index	Gericht [kg]
Allgemeintoleranz DIN ISO 2768		Name		Bertrandt Ingenieurbüro GmbH Chemel. 9 Klosterstr. 10 D-21079 Hamburg		
Projektion		gezeichnet		25.05.2016		
Maßstab		geprüft		Benennung:		
1:2		Freigabe		Gesamtansicht		
				Zschungs-Nr.:		Index: 01
				4		

**Konzept 2:**

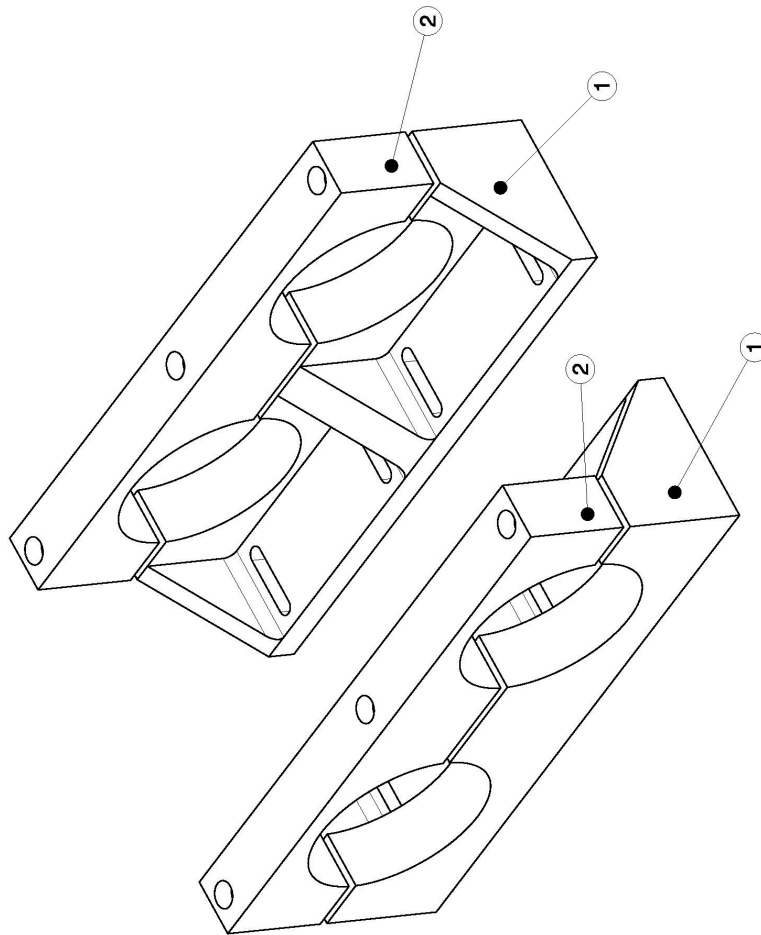




2	Konzept_2_Oberseite	08	Z	01	01	D. 2018	.....	D. 2018	
Person	Verantwortl.	IB	Erstellt	IB	Prüfer	Prüfer	Prüfer	Prüfer	
Abgefragt	GCAT	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	
Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	

Mittlere Bohrung entspricht Bohrung im Schnitt B-B  
Wenn nicht anders angegeben gelten Allgem. Intoleranzen

2	Konzept_2_Oberseite	08	Z	01	01	D. 2018	.....	D. 2018	
Person	Verantwortl.	IB	Erstellt	IB	Prüfer	Prüfer	Prüfer	Prüfer	
Abgefragt	GCAT	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	
Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	
Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung		Prüfung	



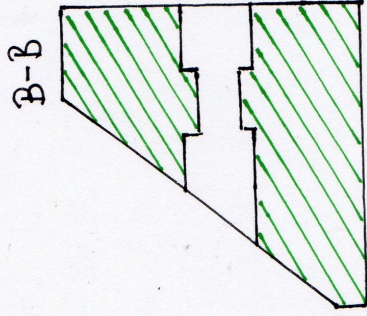
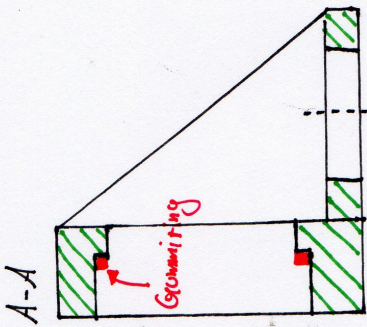
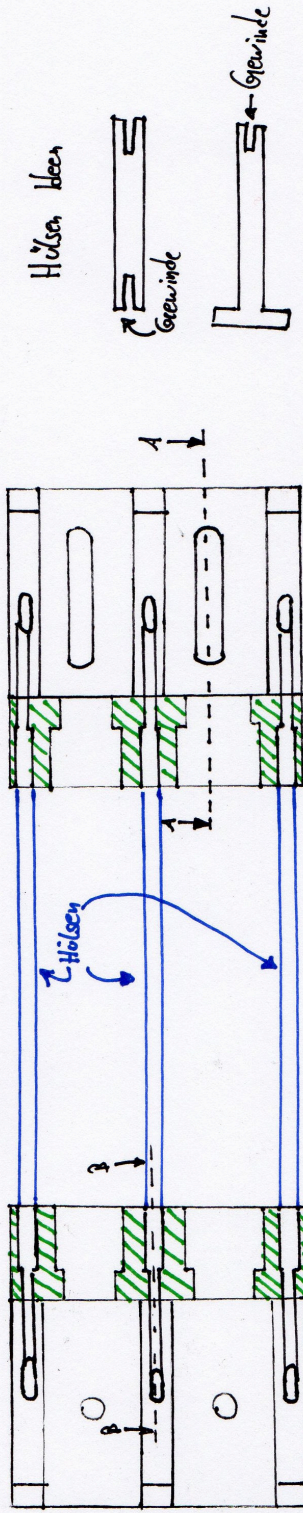
3	Gesamtansicht		3			5,094kg
2	Konzept_2_Oberschale	02	2	01	7075	1,589kg
1	Konzept_2_Unterschale	02	1	01	7075	3,504kg
Position	Benennung	Stk.	Zuschungs-Nr.:	Index	Werkstoff	Reinmass
Allgemeintoleranz DIN ISO 2768	bcAT				Bertrandt	Gericht [kg]
gezeichnet	Lauritz Petersen	Name		Datum	Bertrandt Ingenieurbüro GmbH	
geprüft	.....			25.05.2016	Chemel, S. Blumestr., 10 D-21079 Hamburg	
Freigabe	.....				<b>Gesamtansicht</b>	
Projektion	Maßstab 1:2				Zuschungs-Nr.:	Index: 01
					3	

## Anhang C – Digitaler Anhang

Anhang C- 1: Konzept_1_Anregung_X_Erste_Biegemode.....	29
Anhang C- 2: Konzept_1_Anregung_X_1340Hz.....	31
Anhang C- 3: Konzept_1_Anregung_X_1200HZ_Rund.....	32
Anhang C- 4: Konzept_2_Anregung_X_560Hz.....	33
Anhang C- 5: Konzept_1_Final_Huelsen_Anregung_X_1330Hz.....	41
Anhang C- 6: Konzept_1_Final_Huelsen_Anregung_X_1370Hz.....	42
Anhang C- 7: Konzept_1_Final_Huelsen_Anregung_X_720Hz.....	42
Anhang C- 8: Konzept_1_Final_Huelsen_Anregung_Y_1370Hz.....	43
Anhang C- 9: Konzept_1_Final_Generator_Anregung_X_720Hz.....	45
Anhang C- 10: Konzept_2_Final_Generatoren_Anregung_X_840Hz.....	46
Anhang C- 11: Konzept_2_Final_Generatoren_Anregung_Y_1400Hz.....	46
Anhang C- 12: Konzept_1_Final_Statisch_ISO_X.....	52
Anhang C- 13: Konzept_1_Final_Statisch_ISO_Y.....	54
Anhang C- 14: Konzept_2_Final_Statisch_ISO_X.....	56
Anhang C- 15: Konzept_2_Final_Statisch_ISO_Y.....	57

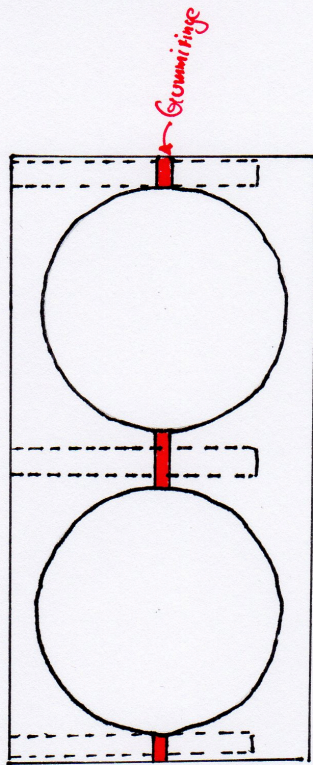
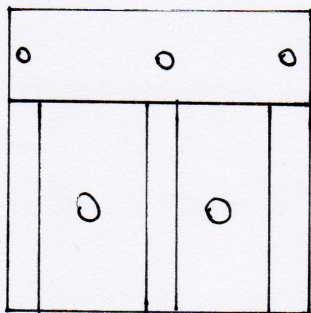
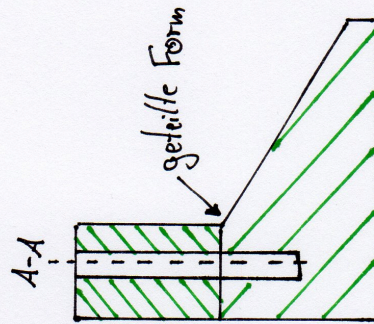
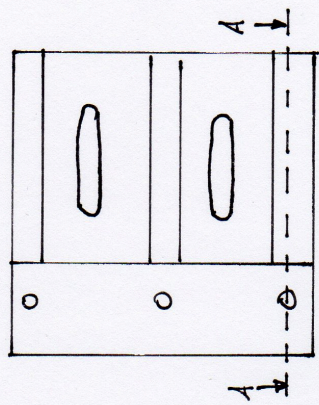
## **Anhang D – Handskizzen**





- Nachteile
- für jede Generatorlänge eigene Hölzer
  - Viele Schrauben
  - Bohrlöcher für Hölzer aufwendig zu fertigen
  - relativ schwer
  - braucht viel Platz

- Vorteile:
- + flexible Montage (Langlöcher)
  - + Toleranz ausgleich (Gummiring)
  - + Generatorstand sehr steif/stabil
  - + zu starkes festziehen nicht möglich (Anschlag Hölzer)
  - + Generator kann sich nicht aus Halterung lösen
  - + Generatormantel wird nicht eingedrückt

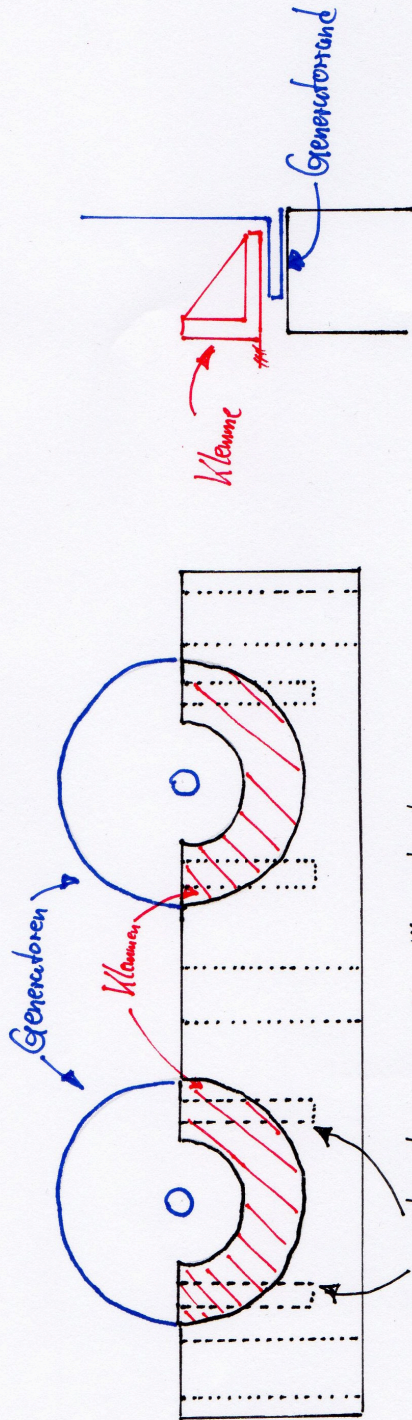


Vorteile

- + flexible Montage (Langlöcher)
- + Fertigung insgesamt einfach
- + Toleranz ausgleich (Gummiringe)
- + Generatoranschlüsse gut zugänglich

Nachteile:

- Durchmesser mit geringer Toleranz
- Viele Schrauben
- Generator kann sich aus Halterung lösen
- relativ schwer
- braucht viel Platz



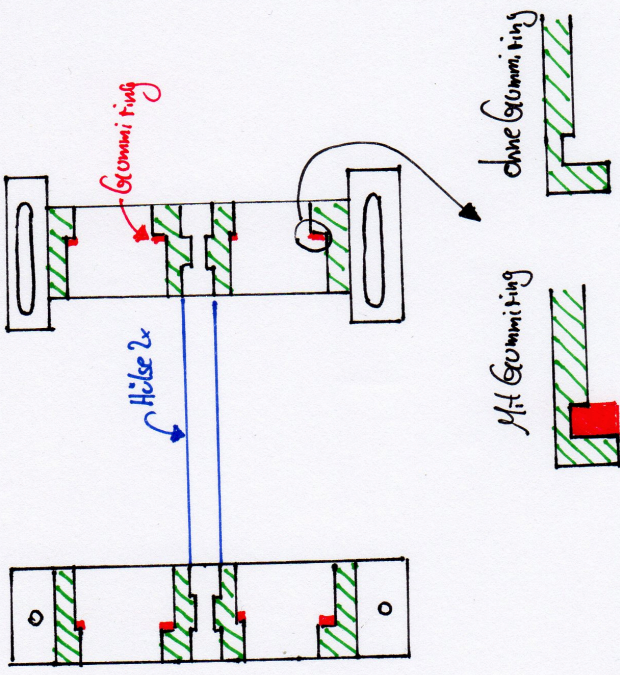
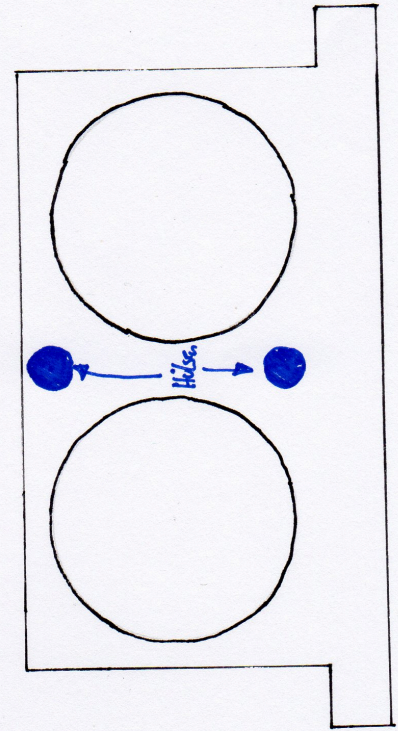
Zwei Schrauben nötig, da mittlere Schraube wegen Generatoranschlüssen nicht möglich

**Vorteile:**

- + leicht
- + kompakt
- + Toleranzgleich
- + Generator kann sich aus Wartung nicht lösen
- + gute Handhabung

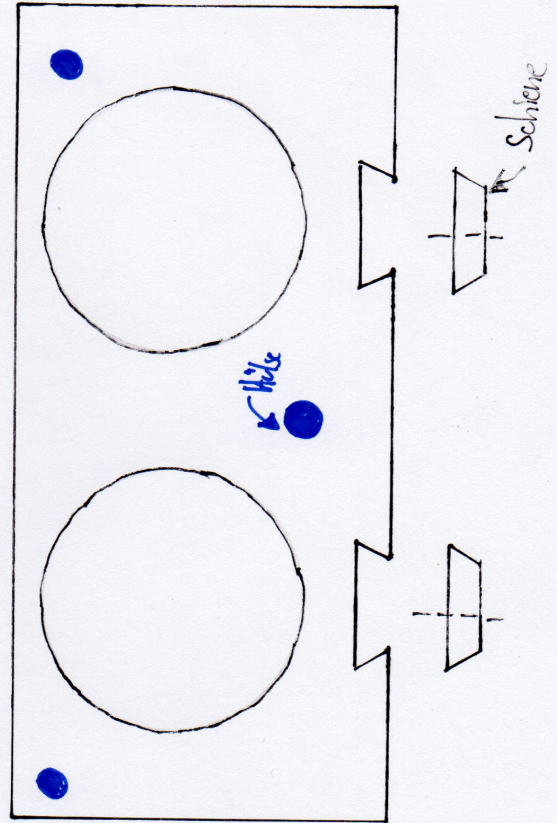
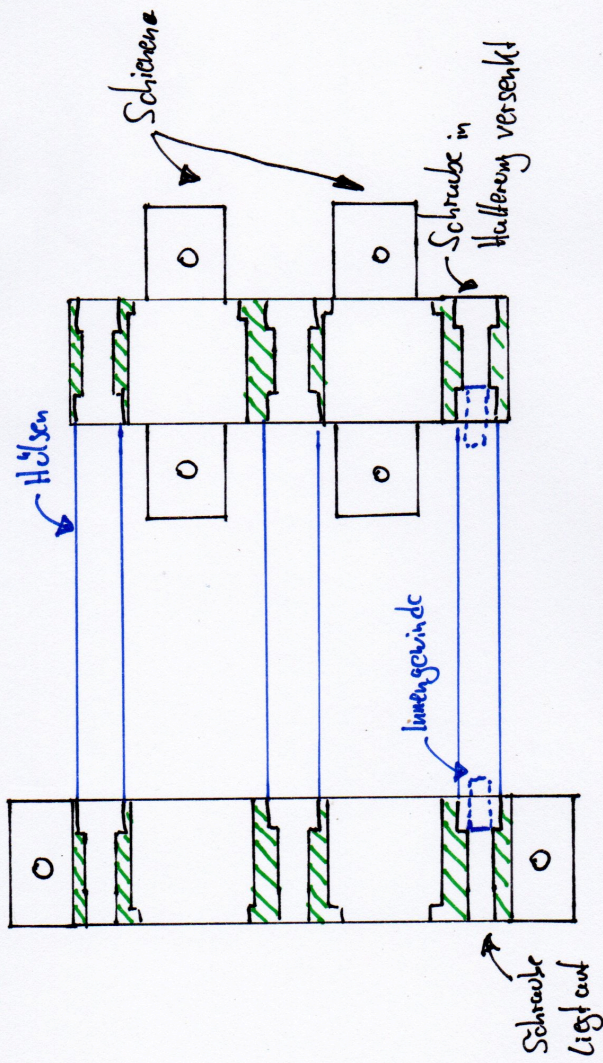
**Nachteile:**

- Generatorrand kann beschädigt werden
- viele Schrauben
- aufwändige Fertigung (Klemmen)
- Auflagefläche des Generatorrandes sehr klein



- Nachteile
- für jede Generatorlänge eigene Hülse
  - (5ff) zu breit
  - wenig Toleranz (Durchmesser Generator)

- Vorteile:
- + flexible Montage (Langlöcher)
  - + kompakt
  - + Generator kann nicht aus der Halterung
  - + Generatoranschlüsse gut zugänglich
  - + Toleranz ausgleich (Gummiringe)
  - + relativ leicht
  - + umspannen am Shaker geht schnell



- Vorteile:**
- + Kompakt
  - + flexible Montage (Schiene)
  - + Generator-Kamm nicht aus der Halterung
  - + tolerant aus Stahl (Grummiring)
- Nachteile:**
- Viele Schrauben
  - Fertigung der Schiene aufwendig
  - Halterung kann sich auf Schiene verketten
  - Toleranz von Schiene muss sehr gering sein  
↳ ggf. Schmirgel der Schiene