

Interner Bericht

DLR-IB-EL-CB-2026-69

**Konzept und Entwurf einer
nachträglich montierbaren
Vorrichtung zur Anbringung
von Ausgleichsgewichten an
einem elektrisch angetriebenen
Propeller [Bachelorarbeit]**

Jonas Rabitz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Hochschule Merseburg (FH)
University of Applied Sciences



Schwerpunkt Allgemeiner Maschinenbau, Produktionstechnik

Bachelorarbeit

Konzept und Entwurf einer nachträglich montierbaren Vorrichtung zur Anbringung von Ausgleichsgewichten an einem elektrisch angetriebenen Propeller

Betrieb: DLR-Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe

Name: Jonas Rabitz

Matrikelnummer: 29641

Anschrift: Friedrich-Ebert Str. 26
03044 Cottbus

E-Mail-Adresse: jonas.rabitz@dlr.de

Abgabetermin: 02.04.2026

Erstbetreuer: Prof. Dr. Jonas Fischer

Zweitbetreuer: Dr.-Ing. Matthias Lang

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XVI
Formelverzeichnis	XVIII
Symbolverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Vorwort	1
1.2 Motivation	1
1.3 Vorschau	2
2 Aufgabenstellung	3
2.1 Inhalte und Konzeptwünsche vom Betreuer	3
2.2 Analysieren (Planen der Aufgabe)	3
2.2.1 Analysieren der Markt- Unternehmens-, und Umfeldsituation	3
2.2.2 Identifizierung und Analyse von Produktideen	3
2.2.3 Formulieren eines Produktvorschlages und Klären/ Präzisieren	4
2.2.4 Beschreibung des Ausgangszustands	4
2.2.5 Beschreibung des Auswuchtsystems	6
2.2.6 Anforderungsliste	7
3 Theoretische Grundlagen	8
3.1 Historische Entwicklung der Technik	9
3.2 Physikalische Grundlagen	10
3.3 Auswuchttechnische Begriffserklärungen	11
3.4 Einordnung in die Rotordynamik	14
3.5 Modalanalyse	15
3.6 Einordnung der Unwucht	17
3.7 Campbell-Diagramm	17
3.8 Finite-Elemente-Methode	18
3.9 Harmonische Analyse	18
4 Konzipieren	20
4.1 Erkennen der wesentlichen Probleme	20
4.2 Ermitteln der Funktionen	21
4.3 Suchen nach Wirkprinzipien	21
4.3.1 Einzelfunktion: Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System	21
4.3.2 Einzelfunktion: Gestaltung der Tragstruktureausrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten	25

4.3.3	Einzelfunktion: Materialwahl der Tragstruktur	27
4.3.4	Einzelfunktion: Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestalt der Ausgleichsgewichte	27
4.3.5	Einzelfunktion: Materialwahl der Ausgleichsgewichte	30
4.3.6	Einzelfunktion: Fertigungstechnologien und Tragstruktur	31
4.3.7	Einzelfunktion: Prüfmöglichkeiten	31
4.4	Erstellen eines morphologischen Kastens	31
4.5	Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten und Finden der Ideallösung	32
5	Entwerfen (Entwickeln u. Gestalten der Baustruktur)	35
5.1	Modalanalyse	35
5.1.1	Modalanalyse des ursprünglichen Systems	37
5.1.2	Modalanalyse des verschiedenen einzelnen Auswuchtsysteme	41
5.1.3	Modalanalyse der Kombinationen der Auswuchtsysteme mit dem ursprünglichen System	45
5.2	Betrachtung des einhegehenden Massenzuwachs	49
5.3	Harmonische Analyse	50
5.4	Umsetzung der Ausgleichgewichte	61
6	Ausarbeiten	64
7	Fazit	69
8	Danksagung	71
	Literatur	73
	Eidesstattliche Erklärung	75
A	Anhang	i
A.1	Ergänzungen zu Abschnitt 4	i
A.2	Ergänzungen zu Abschnitt 5.1	vii
A.3	Ergänzungen zu Abschnitt 5.3	xxxvii

Abbildungsverzeichnis

2.1	QSL-T/ QST-150-25/45 V2 Standard mit Schellen für Propellerblätter (Ansicht von Schräg- Vorne)	5
2.2	QSL-T/ QST-150-25/45 V2 Standard mit Schellen für Propellerblätter (Ansicht von Schräg- Hinten)	6
3.1	Drehung eines Hammerwerfers [24]	8
3.2	Beschreibung der Unwucht am scheibenförmigen Rotor [22]	12
3.3	Allgemeiner Rotor aufgeteilt in Scheibensegmenten und deren einzelne Unwuchtvektoren [22]	13
3.4	Prinzip-Darstellung für Berechnung der einzelnen Momentenunwucht [22]	14
3.5	Charakteristischer Verlauf der Übertragungsfunktion mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung [22]	17
3.6	Beispiel Frequenzgang aus harmonischer Analyse	19
4.1	Lösungsvariante 1a - Motorverbindungskonzept mithilfe von Klemmenlösung in Encoder- richtung	22
4.2	Lösungsvariante 1b - Motorverbindungskonzept mithilfe von Klemmenlösung in Propeller- richtung	23
4.3	Lösungsvariante 2 - Motorverbindungskonzept durch Verschmelzung Innenschelle mit Aus- wuchtring	24
4.4	Lösungsvariante 3 - Motorverbindungskonzept durch getrennte Innenschelle und Aus- wuchtring	25
4.5	bestehendes Motor-Propeller-System	26
4.6	Lösungsvarianten 1 bis 3 - Tragstrukтураusrichtung	26
4.7	Lösungsvariante 1 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	28
4.8	Lösungsvariante 2 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch Umlaufende T- Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	29
4.9	Lösungsvariante 3 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch Verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen	29
4.10	Lösungsvariante 3 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch Gewindeboh- rung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichgewichten (Kombination aus Va- riante 2 und 3)	30
5.1	ANSYS-Workbench-Struktur der Modalanalysen	36
5.2	Ausgangsmodell der Modalanalyse	37
5.3	Bezüge der MPC-Verbindungen für den Externen Punkt „Schwerpunkt beider Propellerblätter“	38
5.4	Flächen der Lager-Randbedingungen	39
5.5	Ausschnitt aus Vernetzung in der Modalanalyse	40
5.6	Campbell-Diagramm der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand	41

5.7	Randbedingungen des an die Antriebswelle angeschlossenen und in der Gesamtheit drehenden Zustandes des einzelnen Auswuchtsystems	42
5.8	Versionsübersicht der einzelnen Auswuchtsysteme	42
5.9	Kombinationsübersicht der drei angeschlossenen Auswuchtsysteme	45
5.10	Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 150 mm Auswuchtring, rotierender Zustand	48
5.11	Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 112 mm Auswuchtring, rotierender Zustand	48
5.12	Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 90 mm Auswuchtring, rotierender Zustand	49
5.13	ANSYS-Workbench-Struktur der Harmonische Analyse, nicht Ausgewuchteter Zustand . .	50
5.14	Übersicht des aktuell betrachteten Modells	51
5.15	uAsschnitt aus Vernetzung in Harmonischen Analyse	52
5.16	Übersicht der Anordnung der rotierenden Kraft als Unwucht	53
5.17	MPC-Verbindung im Auswuchtring für Ausgleichsunwucht	54
5.18	MPC-Verbindung leicht über Schwerpunkt der Propellerblätter für Ausgleichsunwucht . .	54
5.19	Übersicht des Auswuchtversuchs in Auswuchtring-Ebene	55
5.20	Übersicht des Auswuchtversuchs in Unwucht-Ebene	56
5.21	Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, nicht ausgewuchtet	57
5.22	Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Auswuchtringebene	58
5.23	Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, nicht ausgewuchtet	58
5.24	Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Auswuchtringebene	59
5.25	Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Unwuchtebene aus Kap. 5.3	60
5.26	Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Unwuchtebene aus Kap. 5.3	60
5.27	schematische Übersicht der Gewichtsaufteilung bei 14 Gewichten	62
5.28	schematische Übersicht der Gewichtsaufteilung bei 8 Gewichten	62
5.29	Gewindestift-Datentafel	63
6.1	Konstruktionszeichnung - Innenschelle (BS-007-082-06-01-02)	65
6.2	Konstruktionszeichnung - Antriebswelle (Q-150, Shaft, DLRmodA2)	66
6.3	Konstruktionszeichnung - Innenschelle (BS-007-082-06-01-02)-abgeändert	67
6.4	Konstruktionszeichnung - Auswuchtring, Außendurchmesser 90 mm	68
A.1	Lösungsvariante 3 - Tragstrukturausrichtung senkrecht zur Schaftachse, Verbindungsgeometrieänderungen aus Kap. 4.3.2	iii

A.2	verwendete Werteskalen [21] aus Kap. 4.5	v
A.3	in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften der Aluminiumlegierung aus Kap. 5.1	vii
A.4	in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von Baustahl aus Kap. 5.1	vii
A.5	in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von EN-AW-7022 aus Kap. 5.1	viii
A.6	in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von „robustes hart anodisiertes Aluminium“ aus Kap. 5.1	viii
A.7	Schwerpunkt-Einstellungen der Propellerblätter-Punktmasse aus Kap. 5.1.1	viii
A.8	Einstellungen des propellerseitigen Lagers aus Kap. 5.1.1	ix
A.9	Einstellungen des encoderseitigen Lagers aus Kap. 5.1.1	ix
A.10	Netzeinstellungen der Modalanalysen aus Kap. 5.1.1	x
A.11	Analyseereinstellungen des ursprünglichen Systems im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.1	xi
A.12	Analyseereinstellungen des ursprünglichen Systems im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.1 .	xi
A.13	betrachtete Frequenzbereich der Modalanalyse aus Kap. 5.1.1	xii
A.14	erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xii
A.15	zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xiii
A.16	dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xiii
A.17	vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xiv
A.18	fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xiv
A.19	sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1	xv
A.20	erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xv
A.21	zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xvi
A.22	dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xvi
A.23	vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xvii
A.24	fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xvii
A.25	sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xviii
A.26	erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.1	xviii

A.27 zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1	xix
A.28 dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1	xix
A.29 vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1	xx
A.30 fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1	xx
A.31 sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1	xxi
A.32 Kombinationsübersicht der einzelnen Auswuchtsysteme (Antriebswellenseitig) aus Kap. 5.1.2	xxi
A.33 Analyseeinstellungen des des einzelnen Auswuchtsystems am Beispiel der Variante mit 90 mm Außendurchmesser im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.2	xxii
A.34 Analyseeinstellungen des des einzelnen Auswuchtsystems am Beispiel der Variante mit 90 mm Außendurchmesser im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.2	xxii
A.35 erste Eigenfrequenz der ersten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2	xxiii
A.36 zweite Eigenfrequenz der zweiten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2	xxiii
A.37 dritte Eigenfrequenz der dritten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2	xxiii
A.38 Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtsysteme, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2	xxiv
A.39 Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtsysteme, im ganzen drehender Zustand $750 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.2	xxiv
A.40 Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtsysteme, im ganzen drehender Zustand $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.2	xxv
A.41 Campbell-Diagramm des Auswuchtsystem 1, 150 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2	xxv
A.42 Campbell-Diagramm des Auswuchtsystem 2, 112 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2	xxvi
A.43 Campbell-Diagramm des Auswuchtsystem 3, 90 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2	xxvi
A.44 Analyseeinstellungen der Kombinationen am Beispiel von Kombination 1 im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.3	xxvii
A.45 Analyseeinstellungen der Kombinationen am Beispiel von Kombination 1 im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.3	xxvii
A.46 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxviii

A.47 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, rotierender Zustand $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxix
A.48 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, rotierender Zustand $2500 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxix
A.49 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxx
A.50 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, rotierender Zustand $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxx
A.51 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, rotierender Zustand $2500 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.52 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.53 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, rotierender Zustand $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.54 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, rotierender Zustand $2500 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.55 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.56 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, rotierender Zustand $750 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.57 Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, rotierender Zustand $2500 \frac{U}{\min}$ aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.58 Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zum Ausgangszustand aaus Kap. 5.1.3	xxxix
A.59 Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 1 aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.60 Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 2 aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.61 Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 3 aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.62 Rotation-West bei 3. Eigenfrequenz der Kombination 1 aus Kap. 5.1.3	xxxix
A.63 Einstellungen des externen Punktes „Schwerpunkt der Propellerblätter“ aus Kap. 5.3	xxxix
A.64 Netzeinstellungen der Harmonsichen Analysen aus Kap. 5.3	xxxix
A.65 Einstellungen der mit der externen Punkt „Schwerpunkt der Propellerblätter“ verbundenen Komponente aus Kap. 5.3	xxxix
A.66 Einstellungen der rotierenden Kraft für die große Unwucht aus Kap. 5.3	xxxix
A.67 Einstellungen der rotierenden Kraft für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3	xxxix
A.68 Einstellungen des externen Punktes im Zentrum des Auswuchtringes aus Kap. 5.3	xxxix
A.69 Einstellungen der mit dem externen Punkt „Ebene Auswuchtring“ angebundene Komponente aus Kap. 5.3	xl
A.70 Einstellungen des externen Punktes leicht über dem Schwerpunkt der Propellerblätter aus Kap. 5.3	xl

A.71 Einstellungen der mit dem externen Punkt „Anbindung der Unwuchtmass“ angebundene Komponente aus Kap. 5.3	xli
A.72 Analyseeinstellungen der harmonischen Analyse aus Kap. 5.3	xlii
A.73 Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Auswuchtrings für die große Unwucht aus Kap. 5.3	xliii
A.74 Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Unwucht für die große Unwucht Kap. 5.3	xliv
A.75 Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Auswuchtrings für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3	xl v
A.76 Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Unwucht für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3	xlvi
A.77 Frequenzgangeinstellungen bzgl. des Schwerpunktes der Propellerblätter im lokalen Koordinatensystem im Zentrum der Schellen in y-Achse aus Kap. 5.3	xl vii
A.78 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3	xl vii
A.79 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3	xl viii
A.80 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3	xl viii
A.81 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3	xl viii
A.82 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3	xl ix
A.83 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3	xl ix
A.84 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3	1
A.85 Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3	1
A.86 Lagerstichprobendifferenz große Unwucht - Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3	li
A.87 Lagerstichprobendifferenz große Unwucht - Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Encoderrichtung aus Kap. 5.3	li
A.88 Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3	lii
A.89 Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Encoderrichtung aus Kap. 5.3	lii
A.90 Lagerstichprobendifferenz große Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene der Unwucht, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3	liii

A.91 Lagerstichprobendifferenz große Unwucht- Auswuchtversucht in Ebene der Unwucht, Lager in Enocderrichtung aus Kap. 5.3	liii
A.92 Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversucht in Ebene der Unwucht, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3	liv
A.93 Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversucht in Ebene der Unwucht, Lager in Encoderrichtung aus Kap. 5.3	liv

Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungsliste Auswuchtsystem [1]	7
4.1	Tabelle der Einzelfunktionen	21
4.2	Morphologischer Kasten	32
4.3	Übersicht Lösungsvarianten	33
4.4	Variantenvergleich basierend auf der Wertskala „Richtlinie VDI 2225“	34
4.5	Variantenvergleich basierend auf der Wertskala „Nutzwertanalyse“	34
4.6	ausgewähltes Lösungsprinzip/ -Variante	34
5.1	in ANSYS betrachtete Komponenten mit Anzahl und Material	35
5.2	Eigenfrequenztafel der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender und rotierender Zustand	40
5.3	Eigenfrequenztafel des ersten Auswuchtsystems, 150 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand	43
5.4	Eigenfrequenztafel des zweiten Auswuchtsystems, 112 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand	43
5.5	Eigenfrequenztafel des dritten Auswuchtsystems, 90 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand	44
5.6	Eigenfrequenz-Vergleichstafel der nicht rotierenden Zustände von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen	46
5.7	Eigenfrequenz-Vergleichstafel der rotierenden Zustände bei $750 \frac{U}{min}$ von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen	46
5.8	Eigenfrequenz-Vergleichstafel der rotierenden Zustände bei $750 \frac{U}{min}$ von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen	46
5.9	Tafel der Frequenzgang-Amplituden bzgl. Schwerpunkt beider Propellerblätter vor und nach der Auswuchtung in Auswuchtring- und Unwuchtebene	57
A.1	Tafel für Einzelfunktion Nr. 1 „Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System“ aus Kap. 4.3.1	i
A.2	Tafel für Einzelfunktion Nr. 2 „Gestaltung der Tragstruktureinrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten“ aus Kap. 4.3.2	ii
A.3	Tafel für Einzelfunktion „Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestaltung der Ausgleichsgewichte“ aus Kap. 4.3.3	iii
A.4	Tafel für Einzelfunktion Nr. 5 aus Ebac Konzipieren, „Materialwahl der Ausgleichsgewichte“ aus Kap. 4.3.5	iv
A.5	Tafel für Einzelfunktion Nr. 6 „Fertigungstechnologien der Tragstruktur“ aus Kap. 4.3.6	v
A.6	Lösungsvariantenbildung aus morphologischen Kästen aus Kap. 4.5	v
A.7	Variantenvergleich basierend auf der Wertskala "VDI 2225" bzgl. Kosten und Funktion aus Kap. 4.5	vi

A.8	Eigenfrequenztafel der Kombination 1, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxviii
A.9	Eigenfrequenztafel der Kombination 2, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxviii
A.10	Eigenfrequenztafel der Kombination 3, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3	xxviii
A.11	Berechnungstafel des erlaubten Massenzuwachs aus Kap. 5.1.3	xxxv
A.12	Berechnungstafel des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 1 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3	xxxv
A.13	Berechnungstafel des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 2 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3	xxxvi
A.14	Berechnungstafel des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 3 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3	xxxvi
A.15	Berechnungstafel des Massenzuwachs aller Varianten des Auswuchtsystems bzgl. Innenschelle aus Kap. 5.1.3	xxxvi

Formelverzeichnis

3.1	Geschwindigkeitsgleichung [22]	10
3.2	Beschleunigungsgleichung [22]	10
3.3	Dynamische Grundgleichung [22]	11
3.4	Gewichtskraftgleichung [22]	11
3.5	Fliehkraftgleichung des scheibenförmigen Rotors [22]	12
3.6	Unwuchtgleichung des scheibenförmigen Rotors [22]	12
3.7	Proportionalität zwischen Fliehkraft und Unwucht [22]	12
3.8	Resultierende Momentenunwuchtgleichung [22]	13
3.9	Eigenwertproblem der Modalanalyse [9]	15
3.10	Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Ein-Massen-Schwingers [15]	16
3.11	Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Mehr-Massen-Schwingers in Matrizenform [15]	16
3.12	Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Mehr-Massen-Schwingers in Matrizenform mit gyroskopischer Matrix [15]	16
3.13	Übertragungsfunktion der Modalanalyse [15]	16
3.14	Übertragungsfunktion der Modalanalyse mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung [15]	16
5.1	Berechnung der für die maximale Unwuchtmass benötigten Randbedingung[22]	52
5.2	Berechnung der für die minimale Unwuchtmass benötigten Randbedingung[22]	53
5.3	Berechnung der maximal einzustellenden Unwuchtmass [22]	55
5.4	Berechnung der minimal einzustellenden Unwuchtmass [22]	55

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\vec{z}_k$	Abstand gewählte Auswuchtebene R zum Ursprung	mm
$\vec{z}_R, \vec{z}_{\vec{U}_r}$	Abstand beliebige Unwucht $\vec{U}_k$ zum Ursprung	mm
Ω	Anregungsfrequenz	$\frac{1}{s}, \frac{rad}{s}$
$\vec{U}_{ne,r}$	äquivalente modale Unwucht	$g \cdot mm$
$x, \hat{X}$	Auslenkung(-sspitze)	mm
$\vec{U}_k$	beliebig gewählte Unwucht	$g \cdot mm$
$\vec{a}, \vec{g}$	(Erd-)Beschleunigung	m/s^2
$\underline{H}_{aF}$	Beweglichkeit	$\frac{m}{s \cdot N}$
c, C	Dämpfung, Dämpfungsmatrix	$\frac{N \cdot s}{m}$
n	Drehzahl	$\frac{1}{min}$
$\underline{H}_{vF}$	dynamische Nachgiebigkeit	$\frac{m}{N}$
ω	Eigenkreisfrequenz	$\frac{1}{s}, \frac{rad}{s}$
$\vec{v}$	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$\vec{G}$	Gewichtskraft	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$
G	gyroskopische Matrix	$\frac{N \cdot s}{m}$
$\vec{F}, \hat{F}$	Kraft(-spitze)	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$
m, u, M	Masse, Unwuchtmasse, Massenmatrix	kg
$\vec{P}_r$	Momentenunwucht	$g \cdot mm^2$
r	Radius	mm
$\vec{P}_k$	resultierende Momentenunwucht	$g \cdot mm^2$
$\vec{U}_r$	resultierende Unwucht	$g \cdot mm$
k, K	Steifigkeit, Steifigkeitsmatrix (rotatorisch)	$\frac{N \cdot m}{rad}$
k, K	Steifigkeit, Steifigkeitsmatrix (translatorisch)	$\frac{N}{m}$
$\vec{U}$	Unwucht	$g \cdot mm$
$\vec{s}$	Weg	m
t	Zeit	s

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Als Grundlage für die vorliegende Arbeit soll das im Rahmen des 7. Semesters absolvierte Praktikum dienen. Thema des Praktikums war die Arbeit am HAP-alpha-Projekt. Dabei handelt es sich um einen elektrisch angetriebenen Solarflieger, der in sehr großen Höhen operieren soll. Der Flieger wird durch je einen auf beiden Seiten angebrachten Zweiblatt-Propeller mit Elektromotoren des Typs „Hacker QSL-T/QST-150-25/45 V2“ angetrieben. Nach der Montage wurden Unwuchten gemessen, die es zu reduzieren galt. Zu Beginn des Praktikums bestand die Aufgabe darin, sich die notwendigen Fähigkeiten und Kenntnisse für die Arbeit mit Siemens NX und ANSYS anzueignen. Durch die digitale Abbildung verschiedener Bauteile und Baugruppen des Motors mittels CAD-Dateien und FEM-Simulationen sollten Materialreduktionen an Bestandteilen des Elektromotors vorgenommen werden. Ziel war es, die Veränderungen am Motor in ANSYS Mechanical hinsichtlich möglicher Einflüsse auf Verformungen und Spannungen zu untersuchen. Als Ergebnis entstand schließlich die Fragestellung nach einer besseren, zerstörungsfreien und zugleich konstruktiven Lösung.

1.2 Motivation

Die zugrunde liegenden Ergebnisse der Unwuchtmessung zeigten, dass der Unwuchtzustand signifikant vom Montagezustand des Motor-Propeller-Systems abhängt. Aus den voneinander abweichenden Unwuchtwerten nach mehrmaliger Demontage und Montage ergab sich zudem die Notwendigkeit einer mehrfach durchführbaren Auswuchtung. Dies war durch eine Bearbeitung der bestehenden Teile des Motor-Propeller-Systems nicht möglich, da es sich dabei um eine zerstörungsbehaftete Vorgehensweise handelte, deren Wiederholbarkeit entsprechend begrenzt war. Die aktuell verwendeten zerstörungsfreien Methoden des Auswuchtens umfassen Muttern, die an verlängerten Verbindungsschrauben der Schellen angebracht werden, sowie Klebestreifen, die an den Propellerblättern befestigt werden. Auch diese Vorgehensweise weist Nachteile auf. Dazu zählt insbesondere die notwendige Zerlegung der Ausgleichsgewichte in zwei Richtungen aufgrund der konstruktiv eingeschränkten Befestigungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein System konzipiert und entworfen, das die zerstörungsfreie Idee des Auswuchtens mit einer montagegerechten und bedienungsfreundlichen Lösung verbindet.

1.3 Vorschau

Zu Beginn der Arbeit wurde der Planungs- und Konstruktionsprozess durchgeführt. Dieser basierte größtenteils auf den im Modul „Konstruktionsmethodik und Produktentwicklung“ während der Vorlesung [21] behandelten Vorgehensweisen mit vier großen Hauptpunkten. Diese galt es zunächst schematisch abzuarbeiten. Dabei wurden die Hauptpunkte „Analysieren“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ zielgerichtet durchlaufen. Die „Analyse“ diente als übergeordneter Schritt für das Planen und Klären der Aufgabe. Dazu wurden unter anderem Mitbewerber im Markt auf das Vorhandensein ähnlicher Ideen untersucht sowie Produktideen und Produktvorschläge präzisiert. Als Ergebnis folgte die Erstellung einer Anforderungsliste auf Basis der Aufgabenstellung, welche im Punkt „Konzipieren“ genutzt wurde, um die prinzipielle Lösung zu entwickeln. Weiterführend wurden Funktionen zur Findung von Wirkprinzipien sowie zu lösende Probleme und deren Zusammenhänge abgeleitet. All dies mündete in der Erstellung eines morphologischen Kastens als Zusammenführung aller Lösungsvarianten, um diese anschließend einem Variantenvergleich zu unterziehen. Ergebnis war eine Lösungsvariante, die als Ausgangspunkt für weitere Betrachtungen diente. Hierfür bot es sich an, verschiedene Varianten mit Siemens NX zu erstellen. Im Punkt „Entwerfen“ als drittem Schritt auf dem Weg zu einem endgültigen Entwurf folgte das Entwickeln und Gestalten der Baustruktur. Zu Beginn erstellte Grobgestaltungen wurden durch gestaltungs- und materialtechnische Festlegungen der jeweiligen Lösungsvariante ergänzt. Diese Entscheidungen stützten sich auf parallele Berechnungen mithilfe der Software ANSYS. Da die Lösung der vorliegenden Problemstellung ein Auswuchtsystem war, wurden innerhalb dieser Software zunächst Modalanalysen zur Identifizierung und Bewertung vorhandener Eigenfrequenzen sowie zur Beurteilung des Einflusses der Anbringung des Auswuchtsystems durchgeführt. Anschließend diente die harmonische Analyse der digitalen Abbildung rotierender Kräfte, welche als Ersatz zukünftiger Ausgleichsgewichte fungierten. Ziel war es, den Einfluss der am Auswuchtsystem angebrachten Ausgleichsgewichte anhand reduzierter Schwingungsamplituden digital darzustellen. Zudem wurde der Einfluss der veränderten Rotationssituation auf die beiden Lager hinsichtlich interner Verlängerungen untersucht. Schließlich wurden Löcher, Schrauben und Sicherungsmittel so gewählt, dass zum einen die Funktionsfähigkeit des ursprünglichen Motor-Propeller-Systems nicht gefährdet und zum anderen die Sicherung der Ausgleichsgewichte gewährleistet werden konnte. Zusätzlich wurden bereits bestehende Lösungen übernommen, um die Variation gegenüber den ursprünglichen Bauteilen gering zu halten.

2 Aufgabenstellung

2.1 Inhalte und Konzeptwünsche vom Betreuer

Die Bachelorarbeit wurde am DLR-Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe in Cottbus absolviert. Die Ziele des Instituts bestehen in der Erforschung und Entwicklung effizienter und deutlich emissionsärmerer Luftfahrtantriebe [1]. Im Institut wird derzeit unter anderem am Projekt HAP-alpha gearbeitet. Dieses Projekt verfolgt das Ziel, einen elektrisch betriebenen Solarflieger zu entwickeln, der in sehr großen Höhen operieren und mehrere Tage in der Luft bleiben kann. Der Antrieb besteht aus zwei Propellern, die jeweils durch einen Elektromotor der Firma Hacker (QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard) angetrieben werden. Bei ersten Testläufen wurde festgestellt, dass ein Auswuchten notwendig ist. Da das Flugzeug für den Transport zum Einsatzort demontierbar sein soll, muss der Auswuchtzustand nach jeder Montage erneut überprüft werden. Das bestehende Motor-Propeller-System ist jedoch derzeit nicht darauf ausgelegt, sich ständig in Betrag und Winkel verändernde Ausgleichsgewichte aufzunehmen. Die Aufgabe besteht nun darin, eine Vorrichtung zu konstruieren, die zusätzlich am bereits montierten Elektromotor angebracht werden kann und als Aufnahme für Ausgleichsgewichte dient. Eine wichtige Anforderung aus dem Flugbetrieb ist dabei das möglichst geringe Gewicht der Vorrichtung. Die Ausgleichsgewichte müssen nicht nur in beliebigen Winkellagen positionierbar, sondern die Vorrichtung muss zudem nachträglich am Motor montierbar sein. Alle Komponenten sind so zu konzipieren, dass es im Dauerbetrieb nicht zu einem Selbstlösen der Vorrichtung kommt. Dies umfasst sowohl statische als auch dynamische Betrachtungen während des Betriebs. Schließlich sind Materialien und Dimensionen so zu wählen, dass keine Störung der elektrotechnischen Funktionalität entsteht.

2.2 Analysieren (Planen der Aufgabe)

2.2.1 Analysieren der Markt- Unternehmens-, und Umfeldsituation

Die Recherche nach bereits auf dem Markt verfügbaren Lösungen ergab, dass zwar Auswuchttechniken in verschiedensten Ausführungen existieren, diese jedoch nicht dem speziellen Anwendungsbereich der genannten Aufgabe entsprachen. Als Konsequenz ergab sich die Notwendigkeit einer Neukonstruktion für den in Kap. 2.1 beschriebenen Anwendungsfall.

2.2.2 Identifizierung und Analyse von Produktideen

Um die Aufgabenstellung zu erfüllen, mussten zunächst die wichtigsten Kriterien ermittelt werden, die für die konstruktive Auswuchtvorrichtung relevant sein würden. Da es sich um ein bereits montiertes und ausgewuchtetes Motor-Propeller-System handelte, stand die Forderung nach einer nachträglich montierbaren Auswuchtvorrichtung als zentrales Kriterium im Vordergrund. Daraus ergab sich die Notwendigkeit einer möglichst einfachen Anbringung, um den vorherigen Wuchtzustand nicht zu verschlechtern. Durch diese Anforderung und die Tatsache, dass an der Vorrichtung Ausgleichsgewichte angebracht werden müssen, galt es, die konkrete Umsetzung in mehr als einem Bauteil zu klären. Dies führte zur Wahl geeigneter

geometrischer Konstruktions- und Maschinenelemente. Zusätzlich waren die freie Positionierbarkeit der Ausgleichsgewichte über 360° sowie deren anpassbare Masse entscheidend. Weiterhin musste sich die Konstruktion durch eine hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Masse auszeichnen, was eine sorgfältige Materialauswahl erforderte. Da der Elektromotor nur über wenige Befestigungsmöglichkeiten verfügte, mussten Befestigungspunkte gewählt werden, die gut erreichbar waren und eine sichere Fixierung mittels geeigneter Maschinenelemente und geometrischer Gestaltungsweisen ermöglichten. Aus all diesen Kriterien ergaben sich folgende Fragestellungen:

1. Soll die Vorrichtung von der Propellerseite oder von der Encoderseite aus an den vorhandenen Befestigungspunkten am Magnetring angebracht werden?
2. Muss die Halterung für die Ausgleichsgewichte mit den Befestigungsgeometrien des Magnetrings verbunden oder teilbar sein, und ist die Halterung für die Ausgleichsgewichte in zwei oder mehreren Teilen um die Antriebswelle herum zu montieren?
3. Sind die Verbindungselemente eher kraft-, form- oder stoffschlüssig auszuführen?
4. Wie sind die Ausgleichsgewichte bei gleichzeitig individuell variierbarer Positionierbarkeit anzubringen?

Für erste Überlegungen kamen zudem leichtbautechnische Materialien wie glas- oder kohlefaserverstärkter Kunststoff in Betracht.

2.2.3 Formulieren eines Produktvorschlages und Klären/ Präzisieren

Die in Kap. 2.2.6 erstellte Anforderungsliste enthält die Forderungen, die sich aus Kap. 2.2.2 ergeben haben. Dabei wurde zwischen Fest- und Mindestforderungen unterschieden. Die Festforderungen leiteten sich aus der in Kap. 2.1 beschriebenen Aufgabenstellung ab. Festigkeit bzw. Steifigkeit bildeten die Grundlage für die Materialauswahl. Die Festforderungen grenzten maßgeblich die für die Gestaltung relevanten Randbedingungen ein, welche das spätere Konzept bestimmen würden. Die Festigkeit bzw. Steifigkeit ist unter den Mindestanforderungen aufgeführt, da diese so zu wählen waren, dass die Funktionsfähigkeit gewährleistet und damit die Aufgabenstellung erfüllt werden konnte. Zusammengefasst waren die wichtigsten Funktionen, dass die Vorrichtung den Belastungen standhält, nicht beschädigt wird und ein geringes Gewicht besitzt. Zuletzt enthält die Anforderungsliste auch Wünsche, die zur Erfüllung der Aufgabe förderlich hätten sein können. Dazu zählt beispielsweise die Optimierung der Gestalt hinsichtlich Strömung und Gewicht.

2.2.4 Beschreibung des Ausgangszustands

Um im weiteren Dokument die Beziehung zwischen Bezeichnungen und Bauteilen bzw. Bauteilgruppen des Motor-Propeller-Systems und des eigentlichen Auswuchtkonzeptes eindeutig zu halten, wird in diesem Unterpunkt mithilfe unterstützender Grafiken der Ausgangszustand des Elektromotors ohne die angestrebte Auswuchtvorrichtung beschrieben. Dieser umfasst das grundlegende Motor-Propeller-System. Der einzelne Motor ist in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 dargestellt. Die Schnittstelle zwischen Motor und Flugzeuggestell bildet

das Statorkreuz. Zusammen mit den Spulenwicklungen und der daran befestigten Encoder-Scheibe bildet es den feststehenden Teil des Elektromotors. Die Encoder-Scheibe ist zusätzlich mit speziellen Klemmsteinen fixiert, die über Zacken in passende Nuten der Scheibe eingreifen. In der zentralen, senkrecht durch das Statorkreuz verlaufenden Durchgangsbohrung befindet sich encoder- und propellerseitig jeweils ein Kugellager, wobei das propellerseitige Lager deutlich größer dimensioniert ist. Beide Lager dienen der Führung der darin rotierenden Antriebswelle. Die Stirnseite der Antriebswelle ist so gestaltet, dass sich am dünneren Ende das rotierende Gegenstück zur Encoder-Scheibe befindet. Auf der Propellerseite befinden sich die Bohrungen zur Befestigung des Elektromotor-Speichenrades mittels sechs Schrauben. Diese Schrauben werden encoderseitig eingesetzt, da die Antriebswelle bei der Montage von vorne durch das Speichenrad geschoben wird. Das Speichenrad ähnelt in seiner Form einer Felge und dient als Befestigung des Magnetrings, der entlang seiner Innenfläche 42 Magnete mit dazwischenliegenden Abstandshaltern trägt. Speichenrad und Magnetring sind mit sieben Schrauben entlang der Mantelfläche radial zur Rotationsachse verbunden, jeweils vor den Abstandshaltern zwischen den Magneten. Die Kombination aus Speichenrad und Magnetring wird folglich auch als Elektromotor-Rotor-Glocke bezeichnet. Die propellerseitig sichtbare Stirnfläche der Antriebswelle weist eine sternförmige Geometrie zur formschlüssigen Befestigung der Innenschelle des Propellers auf. Diese wird anschließend mittels spezieller Schraubensicherungsscheiben und dafür in beiden Geometrien eingelassener Durchgangsbohrungen befestigt. Darauf wird das passgenaue Gegenstück in Form der Außenschelle angebracht, bestehend aus vier Gewindeleisten, zwölf Schrauben sowie den entsprechenden Sicherungselementen.

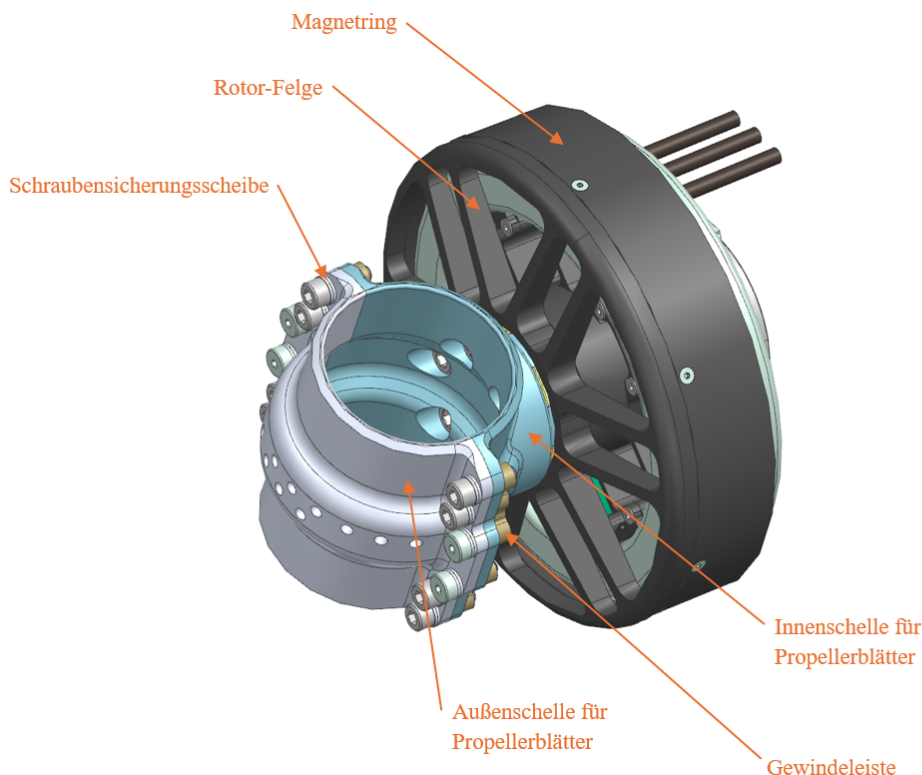


Abb. 2.1: QSL-T/ QST-150-25/45 V2 Standard mit Schellen für Propellerblätter (Ansicht von Schräg-Vorne)

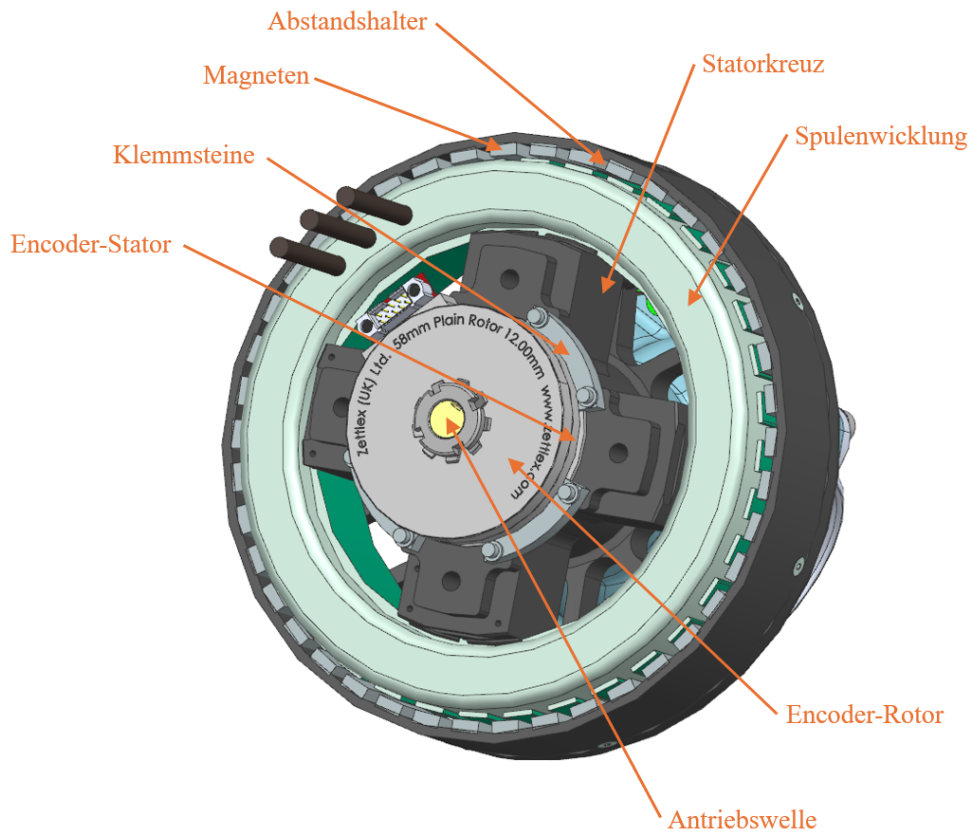


Abb. 2.2: QSL-T/ QST-150-25/45 V2 Standard mit Schellen für Propellerblätter (Ansicht von Schräg-Hinten)

2.2.5 Beschreibung des Auswuchtsystems

Der Teil, der das Auswuchten umfasst, wird im Folgenden in seiner Gesamtheit als Auswuchtsystem bezeichnet und besteht aus mindestens zwei Komponenten. Ein Bestandteil bildet die Schnittstelle zwischen den Ausgleichsgewichten und dem Motor-Propeller-System. Dieser wird fortan als Auswuchtring bezeichnet. Seine Aufgabe besteht darin, die anzubringenden Ausgleichsgewichte samt der zugehörigen Verbindungselemente aufzunehmen und zu tragen. Die in Kap. 4 vorgestellten Varianten des Auswuchtsystems führen zu mindestens einem weiteren Bauteil, das den Auswuchtring mit dem bestehenden System verbindet und zuverlässig sichert. Als Grundlage für die weiterführende Konzeption wurde die Anforderungsliste erstellt, die als Ergebnis der Besprechungsrunden mit dem Betreuer in Tab. 2.1 aufgeführt ist. Sie bildet fortan die strukturierte Zusammenstellung der verschiedenen klassifizierten Forderungen und dient als Basis für die folgenden Entwicklungsschritte.

2.2.6 Anforderungsliste

Tab. 2.1: Anforderungsliste Auswuchtsystem [1]

Bearbeiter: Jonas Rabitz		Auftraggeber: Dr.-Ing. Matthias Lang			
Lfd. Nr.	Zuordnung	Anforderung	Daten	Verantwortung	Änderungshinweis
Vom Auftraggeber					
1	F	nachträglich montierbare Vorrichtung	-	Jonas Rabitz	hinzugefügt am 08.12.2025
2	F	Vorrichtung zur nachträglichen Montage von Ausgleichsgewichten	-		hinzugefügt am 30.12.2025
3	F	sichere Anbringung der Vorrichtung am Hacker Motor-Propeller-System während höhenabhängigen Betriebsphasen	0 bis 20 km		hinzugefügt am 08.12.2025
4	F	Vorrichtungskonzept im Einklang mit elektrotechnischen Vorgängen bzgl. Materialien und Dimensionen	-		hinzugefügt am 08.12.2025
5	F	Fertigung aus EN AW-7022 (Cortal)	-		hinzugefügt am 08.12.2025
6	W	einfache Fertigung und Montage	-		hinzugefügt am 08.12.2025
7	W	max. Gewichts-Zunahme bzgl. des ursprünglichen Systems	5 %		hinzugefügt am 29.01.2026
8	F	max. axiale Verlängerung der Propeller-Position in Flugrichtung	5 mm		hinzugefügt am 29.01.2026
Motorspezifische Abmaße (wichtig zur Verbindung Auswuchtsystem und Motor-Propeller-System)					
9	F	Magnetring-Außendurchmesser	≈ 150,2 mm	Jonas Rabitz	hinzugefügt am 10.12.2025
10	F	Magnetring-Dicke	≈ 5.5 mm		hinzugefügt am 10.12.2025
11	F	Magnetring-Breite	≈ 27,0 mm		hinzugefügt am 10.12.2025
12	F	Winkel zwischen Bohrungen im Magnetring (potentielle Festpunkte)	≈ 51,4 mm		hinzugefügt am 08.12.2025, verworfen am 10.12.2025
13	F	größter Abstand von Bohrungssachse der möglichen Befestigungspunkte im Magnetring zur Stirnfläche	24 mm		hinzugefügt am 08.12.2025, verworfen am 10.12.2025
14	F	max. axialer Abstand zwischen Elektromotor-Rotor-Glocke und unterstem Punkt der Innenschellengeometrie für die Propellerblätter	≈ 8 mm		hinzugefügt am 29.01.2026
15	F	max. radialer Abstand zwischen Anschlussgeometrie der Innenschelle und Außenradius des Elektromotor-Rotors	≈ 48,1 mm		hinzugefügt am 29.01.2026
16	F	Fase der Elektromotor-Rotor-Glocke	8 °		hinzugefügt am 29.01.2026
Konzipiert					
17	M	hohe Steifigkeit	-	Jonas Rabitz	hinzugefügt am 08.12.2025
18	W	Umsetzung in mehr als einem Teil (System aus Halterung und Gewichten)	mind. 2		hinzugefügt am 08.12.2025
19	W	Positionierungsebene der Ausgleichsgewichte nahe der vorherigen Propellerebene	-		hinzugefügt am 08.12.2025
F=Festforderung, M=Mindestforderung, W=Wunsch					
Ausgabe: 1.4 Vom: 29.01.2026		Ersetzt Ausgabe: 1.3 Vom: 30.12.2025			

3 Theoretische Grundlagen

Zum besseren Verständnis von Unwuchten wurde zunächst eine Analogie zur Disziplin des Hammerwerfens nach [13] hergestellt. Dabei wird ein Gewicht, das meist an einem Stahlseil befestigt ist, von einem Athleten mit beiden Händen festgehalten und um den eigenen Körper geschleudert. Normalerweise würden die Kräfte so weit ansteigen, dass der Athlet aus dem Zentrum der Drehung herausgezogen würde. Um dies zu verhindern, verlagert der Athlet seinen Körperschwerpunkt vom Zentrum der Rotation weg. Die Füße bleiben dabei im Rotationszentrum. Auf diese Weise gleicht der Athlet die durch das Gewicht am Stahlseil erzeugte Unwucht während der Rotation aus, wie in Abb. 3.1 dargestellt.

Ein ähnliches Prinzip liegt der Unwucht des betrachteten Propellerblattpaares zugrunde, das auf einer Welle befestigt ist. Die Unwucht entsteht hier jedoch durch Montageabweichungen bzw. Verdrehungen der Blattwinkel zueinander. In der Analogie entspricht die Unwucht eines zweiblättrigen Motor-Propeller-Systems dem Gewicht am Stahlseil, während der Elektromotor-Rotor die Rolle des Athleten einnimmt. Wie beim Hammerwerfen zieht die Unwucht über den Rotor und dessen Speichen wie ein Gewicht an der Drehachse, in der sich die Antriebswelle befindet. Im Gegensatz zum Athleten kann sich der Schwerpunkt der rotierenden Kombination jedoch nicht aus dem Zentrum der Rotation herausbewegen, da die Antriebswelle über Kugellager fest geführt ist. Zudem ist die Antriebswelle weitgehend steif und nicht verformbar wie der menschliche Körper. Dadurch neigt sich der Bereich, an dem der Rotor auf der Antriebswelle sitzt, in Richtung der Unwucht. Das Ergebnis sind Schwingungen, die sich vom Elektromotor auf alle angeschlossenen Bauteile übertragen können. Hier setzt das Auswuchten an: Der Rotor wird durch Ausgleichsgewichte so beeinflusst, dass sein Schwerpunkt der Unwucht entgegenwirkt, bis die Schwingungsamplitude deutlich absinkt. Eine signifikante Reduzierung der Amplituden bedeutet, dass die Unwucht ausgeglichen ist. Für die Anbringung dieser Gewichte am bestehenden Motor-Propeller-System ist daher die Konstruktion eines geeigneten Auswuchtsystems erforderlich.



Abb. 3.1: Drehung eines Hammerwerfers [24]

Aus [25] geht hervor, dass infolge einer Unwucht, also einer nicht ideal um die Rotationsachse verteilten Masse, Schädigungen an der Maschine entstehen können. Diese äußern sich beispielsweise in einer erhöhten Beanspruchung der Lager, was zu einem schnelleren Verschleiß führen kann. Darüber hinaus können Schwingungen auftreten, die die Struktur so stark anregen, dass Risse an Verbindungsstellen, im Gehäuse oder an Verankerungen der Maschine entstehen. Schließlich ist auch der erhöhte Energieverbrauch zu nennen, der dadurch entsteht, dass die Maschine permanent gegen die Unwucht anarbeiten muss.

3.1 Historische Entwicklung der Technik

Um zunächst die zugrunde liegende Entstehungsgeschichte und die Theorie des Auswuchtens zu betrachten, basieren die folgenden Grundlagen bzgl. dieser Thematik hauptsächlich auf dem Buch „Auswuchttechnik“ [22]. Die Betrachtung der Geschichte des Auswuchtens ist gespickt mit zahlreichen Meilensteinen und Entwicklungen hin zu etlichen Lösungsstrategien für auftretende Probleme. Infolge entstanden aneinander anknüpfende Normen. Eine der ersten war die DIN ISO EN 9000. Die Norm umfasste jedoch lediglich Grundkenngrößen und -verfahren, welche sich auf „Try and Error“-Verfahren konzentrierten und erwähnten Werkstück- und Werkzeugkennzahlen. Den Mechanikern hinter dem eigentlichen Auswuchten wurde meist wenig Beachtung geschenkt. Wie bei den im Laufe der Zeit entdeckten Unwuchtarten kam es auch zur Entwicklung verschiedenster Auswuchtmaschinen, deren Umsetzung von den vorherrschenden technischen Möglichkeiten begrenzt war. Die Entwicklung begann mit der 1866 gebauten Dynamomaschine. Aufgrund der fehlenden Eignung für industrielle Anwendungen kam es 1907 zur Entwicklung einer in zwei Ebenen operierenden Auswuchtmaschine von F. Lawaczek, welche im Jahr 1912 in einer Weiterentwicklung ein Patent erhielt. Neben der Modifizierung durch H. Heymann stellte diese Ausführung den Ausgangspunkt für die industrielle Produktion dar. Aufgrund der im Vergleich zu heutigen Auswuchtmaschinen fehlenden bzw. noch nicht so ausgereiften Messmitteln musste die damit verbundene Erhöhung der Genauigkeit bei gleicher Wirtschaftlichkeit auf die in den 1930er-Jahren entwickelten Messwertwandler oder ähnliche Messtechnik warten. Ein weiteres Problem war die nicht messbare Winkellage und die Zuordnung zu angestrebten Ausgleichsebenen. Diese führten aufgrund der nun stärker ausgeprägten Messseite parallel zur Rückführung der Auswuchtmaschinen von komplizierten mechanischen Gestaltungsweisen hin zu einfacheren. Des Weiteren hatte man unter anderem auch mit verschiedensten, mit der Zeit entdeckten Unwuchtproblemen zu kämpfen. 1955 wurde die erste Fachgruppe „Schwingungstechnik“ des VDI gegründet, welche mit der Ausarbeitung erster Richtlinien begann. Dabei entstandene Normen umfassten die Beurteilung mechanischer Schwingungen von Maschinen in der VDI 2056 bis hin zur Zusammenfassung verschiedenster nachgiebiger Motoren und der Auswuchtverfahren in der ISO 11432. Zusätzlich wurden zwei Gremien, der Arbeitskreis (AK) 1 und AK 2, für die Weiterentwicklung der diesbezüglich gebrauchten Normen in Deutschland gebildet. Während sich der AK 1 mit statischen Verfahren in der Auswuchttechnik beschäftigt, behandelt das Gremium AK 2 das Auswuchten von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten. Damit die Normen einer Weiterentwicklung unterliegen, wurden in Deutschland Gremien gegründet, welche zum einen die statischen Verfahren der Auswuchttechnik im AK1, als auch das Auswuchten von Rotoren mit wechselstatischem Verhalten im AK2 betrachten. Zum einen entstand 1964 die VDI 2056, in welcher mechanische

Schwingungen von Maschinen beurteilt wurden. Weiterhin folgten notwendige Begriffserklärungen in der 1974 erschienenen ISO 1925 „Balancing Vocabulary“. Anschließend wurden die Typenbeschreibungen verschiedener nachgiebiger Motoren und deren Auswuchtverfahren in der ISO 11342 „Criteria for evaluating flexible rotor balance“ zusammengefasst. Schließlich verkörperte die 2007 erschienene ISO 19499 eine aktuelle Einführung in die Auswuchttechnik und einen Überblick über Auswuchtnormen. Die aktuell geltende Norm vereinte 2010 alle Normen unter einer systematischen Teilenummervergabe. Dabei wurde in „Einführung“, „Begriffserklärung“, „Auswuchtverfahren und Auswuchttoleranzen“ und „aktuelle Einführung in die Auswuchttechnik und Normausblick“ unterteilt. Die aktuell gültigen Normen wurden dann 2010 unter der Nummer 21940 zusammengefasst und die Vergabe der Teilenummern folgte fortan einem definierten Schema. Dieses fasste die Normen zu passenden Oberüberschriften zusammen. Somit wurden Normen in die Gruppe der „Einführung“ (z.B. DIN ISO 21940-1 „Auswuchttechnik“), „Begriffe“ (z.B. DIN ISO 21940-2 „Auswuchten“), „Auswuchtverfahren und Auswuchttoleranzen“ (z.B. DIN ISO 21940-11 „Verfahren und Toleranzen von Rotoren mit starrem Verhalten“), „Auswuchtmaschinen“ (z.B. DIN ISO 21940-21 „Beschreibung und Bewertung“) und „Maschinenauslegung für das Auswuchten“ (z.B. DIN ISO 21940-32 „Passfeder-Vereinbarung“) eingeordnet. Abgesehen von diesen 2010 getroffenen Regelungen existierte zeitgleich die ISO 2041, welche zudem allgemeine Informationen für den Bereich Schwingungen und Stöße bereitstellte.

3.2 Physikalische Grundlagen

Zur späteren quantitativen und qualitativen Begründung der Ergebnisse dient das folgende Kapitel zur Einführung der notwendigen physikalischen Größen und Gleichungen. Allgemein sind Kenntnisse über physikalische Größen mithilfe von Gleichungen miteinander zu verknüpfen und aus Grundgrößen, welche nicht mit vorher festgelegten Größen verknüpft sind, abgeleitete Größen zu bilden. Grundgrößen sind z.B. Weg s [m] und Zeit t [s], da diese nicht auf anderen Größen basieren. Anders ist es z.B. bei den Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung, welche in Gl. (3.1) und Gl. (3.2) abgebildet sind.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Gl. 3.1: Geschwindigkeitsgleichung [22]

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Gl. 3.2: Beschleunigungsgleichung [22]

Beide Größenarten sind dabei jeweils in Zahlenwert und Einheit unterteilt. Weiterhin ist in Skalare und Vektoren zu unterscheiden, was im Bezug auf die richtige Interpretation der Vorgänge und die damit verbundenen Rechenvorschriften wichtig sein wird. Skalare Größen besitzen lediglich Zahlenwerte und vektorielle Größen sind zusätzlich durch eine Richtung definiert. Da die physikalischen Grundgesetze in Form der dynamischen Grundgleichung und der Gewichtskraft auch hier als Basis der Berechnungen dienen, sind diese in Gl. 3.3 und Gl. 3.4 aufgeführt.

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad \left[\text{N} = \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Gl. 3.3: Dynamische Grundgleichung [22]

$$\vec{G} = m\vec{g} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Gl. 3.4: Gewichtskraftgleichung [22]

Des Weiteren kommt zu den bereits erwähnten Grundlagen die Massenanziehung $\vec{F} = a \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$ hinzu, welche als Spezialfall des Massenanziehungsgesetzes gilt und die nicht vorhandene Konstanz der Gewichtskraft beschreibt. Dabei verkörpert a die konstante Gravitationskonstante, welche im Fall der Erde $6,674 * 10^{-11} \frac{\text{N} * \text{m}^2}{\text{kg}^2}$ beträgt ($\vec{g}$). r hingegen beschreibt den Abstand zwischen den Massepunkten.

3.3 Auswuchttechnische Begriffserklärungen

Um sich über die eigentliche Thematik des Auswuchtens im Klaren zu sein, folgen erste Begriffe, auf welchen die weitere Arbeit aufbaut. Auswuchten betrachtet den Prozess der Kontrolle bzw. der Korrektur der Massenverteilung eines sich drehenden Bauteils, um vorher festgelegte Toleranzen einzuhalten. Diese sich drehenden Bauteile werden als „Rotoren“ bezeichnet. Dabei wird die eigentliche Aufgabe des Auswuchtens beeinflusst durch die Drehzahlabhängigkeit, ausgleichende/kontrollierende Unwuchtarten sowie eine Rotor-konzeption, welche sowohl die Befestigung ausgleichender Massen am Rotor als auch eine Varianz deren Lage und Geometrie zulässt. Unwuchten treten bei jedem rotierenden Bauteil in unterschiedlicher Art und Weise durch Unregelmäßigkeiten in Fertigung und Material auf. Schwingungen, welche durch die Unwucht erzeugt werden, können im schlimmsten Fall Beschädigungen und Abweichungen am rotierenden Bauteil und an angeschlossenen Bauteilen hervorrufen. Diese verschiedenen Rotoren haben die Gemeinsamkeit der Rotation um eine bestimmte Bezugsachse, die „Schaftachse“. Diese dient als Bezug für sämtliche Unwuchten entlang einer mit den Lagerzapfenmittelpunkten verbundenen Achse. Grundsätzlich kann eine Unwucht lediglich in Form ihrer Wirkung auf den Rotor beobachtet werden.

Ist die axiale Erstreckung des Rotors so gering, dass sie vernachlässigt werden kann, dann spricht man von einem scheibenförmigen Rotor. Dazu wird nur ein Unwuchtvektor in einer Ebene betrachtet. Das Prinzip des scheibenförmigen Rotors ist in Abb. 3.2 abgebildet.

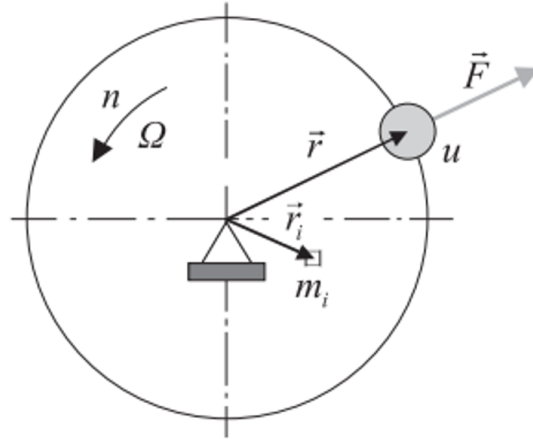


Abb. 3.2: Beschreibung der Unwucht am scheibenförmigen Rotor [22]

Bei $\vec{F} \neq 0$ liegt eine Unwucht vor. Die Ursache der Fliehkraft ist die Unwucht. Die Gleichung für die Fliehkraft ist in Gl. 3.5 und die für die Unwucht in Gl. 3.6 zu finden. Es herrscht ein proportionaler Zusammenhang zwischen Fliehkraft und Unwucht mit dem Faktor ω^2 , wie in Gl. 3.7.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \Omega^2 \quad [\text{N}]$$

Gl. 3.5: Fliehkraftgleichung des scheibenförmigen Rotors [22]

$$\vec{U} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i = u \vec{r} \quad [\text{g} \cdot \text{mm}]$$

Gl. 3.6: Unwuchtgleichung des scheibenförmigen Rotors [22]

$$\vec{F} = \vec{U} \cdot \omega^2$$

Gl. 3.7: Proportionalität zwischen Fliehkraft und Unwucht [22]

Wird ein Rotor betrachtet, dessen axiale Ausdehnung größer ist als jene in radialer Richtung, dann wird er ähnlich wie in Abb. 3.3 in viele Scheiben entlang der Schaftachse unterteilt. Einziger Unterschied ist die axiale Erstreckung des einzelnen scheibenförmigen Rotors senkrecht zur Schaftachse und somit die Anzahl der auszugleichenden Unwuchtvektoren.

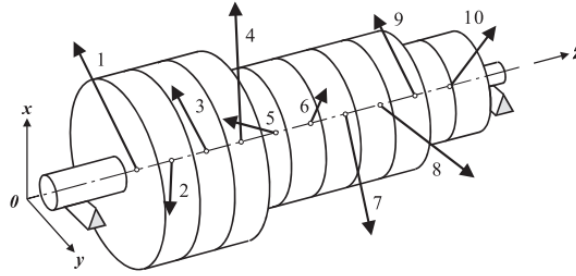


Abb. 3.3: Allgemeiner Rotor aufgeteilt in Scheibensegmenten und deren einzelne Unwuchtvektoren [22]

Da die geometrischen Bedingungen einen Ausgleich der Unwucht in der Rotorebene verhindern, müssen die Kenntnisse des scheibenförmigen Rotors auf die des allgemeinen Rotors übertragen werden. Bei diesem spielt die axiale Ausdehnung entlang der Schaftachse eine Rolle. Diese kann in unendlicher Zahl vertreten sein. Auf Grundlage des scheibenförmigen Rotors wird dieser allgemeine Rotor in gedankliche Scheiben unterteilt, welche einzeln in axialer Ausdehnung vernachlässigbar sind. Das richtige Auswuchten hängt anschließend von der Art der Unwuchten ab, und es werden zudem wie in Abb. 3.3 mehrere Unwuchtvektoren betrachtet.

Unterschieden wird bei Unwucht in resultierende Unwucht $\vec{U}_r$, Momentenunwucht $\vec{P}_r$ und äquivalente modale Unwucht $\vec{U}_{ne,r}$. Aufgrund des Abstandes der verschiedenen Unwuchtvektoren zu einem gemeinsamen Ursprung bildet sich die resultierende Unwucht $\vec{U}_r$. Die resultierende Unwucht berechnet sich also als Summe aus allen Einzelunwuchten. Diese bildet die Gesamtheit aller Unwuchtvektoren bei gedanklicher Blickrichtung entlang der Schaftachse und wird anschließend in einer festgelegten Ebene gebildet, deren Wahl lediglich einen Einfluss auf den Angriffswinkel der Momentenunwucht, nicht aber auf die Größe der resultierenden Unwucht hat.

Der Offset der verschiedenen Unwuchtvektoren zur Unwuchtebene, welcher bei nicht scheibenförmigen Rotoren zwangsmäßig vorliegt, sorgt für eine Momentenunwucht zusätzlich zur resultierenden Unwucht. Dabei wird wie in Abb. 3.4 ersichtlich in zwei Abstände unterschieden: einmal in jenen von der gewählten Ebene R zum Ursprung $\vec{z}_k$ und zum anderen in den vom Unwuchtvektor zum Ursprung $\vec{z}_R$ bzw. $\vec{z}_{U_r}$. Deren Differenz bildet den Abstand des Unwuchtvektors zur gewählten Ebene des $\vec{U}_r$. Ebenfalls in Abb. 3.4 dargestellt sind die einzelnen Unwuchtvektoren, welche jeweils durch einen Offset zur gewählten Ebene R eine Momentenunwucht haben. Die Gl. 3.8 stellt dabei die Aufsummierung der Momentenunwuchten dar.

$$\vec{P}_k = (\vec{z}_k - \vec{z}_{U_r}) \times \vec{U}_k \quad [\text{g} \cdot \text{mm}^2] \quad (3.1)$$

Gl. 3.8: Resultierende Momentenunwuchtgleichung [22]

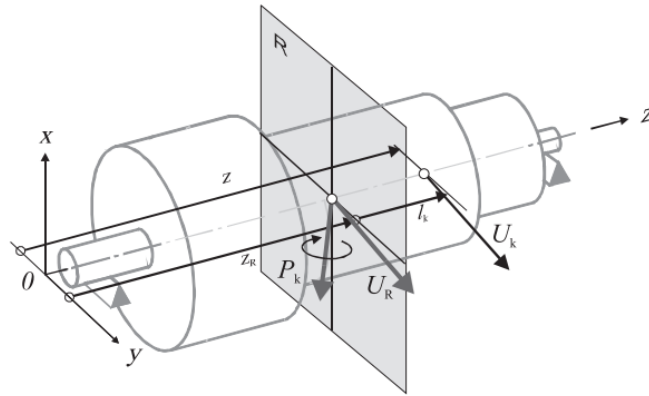


Abb. 3.4: Prinzip-Darstellung für Berechnung der einzelnen Momentenunwucht [22]

Als letzter Teil zur Beschreibung der Unwucht dient die äquivalente modale Unwucht. Diese basiert auf der Verteilung der einzelnen Unwuchten und der Durchbiegung. Wichtig sind für die modale Durchbiegung die Biegeeigenformen, mit welchen die Unwuchtvektoren multipliziert werden müssen.

Als Ausgleichstechniken stehen einmal der polare und als zweites der Festortausgleich zur Wahl. Während der polare Ausgleich die Ansetzung bzw. Wegnahme des Materials exakt entgegengesetzt zur Winkellage der Unwucht bei festem Radius oder fester Ausgleichsmasse meint, wird beim Festortausgleich die Auswuchtung durch die Unwuchtaufteilung in Komponenten durchgeführt. Bestes Beispiel dafür ist die aktuell am Motor-Propeller-System verwendete Ausgleichstechnik. Dabei werden die vorher ermittelten bestehenden Unwuchten in Komponenten unterteilt und mithilfe von längeren Verbindungsschrauben zwischen den Schellen der Propellerblätter und daran angebrachter zusätzlicher Muttern in Kombination mit Klebestreifen am Propellerblatt komponentenweise ausgeglichen. In beiden Verfahren wird eine spezielle Ausgleichsebene betrachtet. Abhängig ist die Wahl des Auswuchtverfahrens von der Art des Rotors. Für scheibenförmige Rotoren, deren axiale Ausdehnung im Verhältnis zum Durchmesser vernachlässigbar ist, kommt in der Regel das Ein-Ebenen-Auswuchten zum Einsatz. Dabei müssen Ausgleichsgewichte in der gleichen Ebene angebracht werden, in welcher der scheibenförmige Rotor liegt. Sollte kein scheibenförmiger Rotor vorhanden sein bzw. die Anbringung von Ausgleichsgewichten in der Ebene des Rotors nicht möglich sein, muss auf das Zwei-Ebenen-Auswuchten umgestiegen werden. Durch diesen Offset resultiert jedoch die Momentenunwucht. Neben einer für die resultierende Unwucht verantwortlichen Ausgleichsebene wird eine zusätzliche Ebene für den Ausgleich der Momentenunwucht benötigt. Das Mehr-Ebenen-Auswuchten ist eine Möglichkeit, um mithilfe von mindestens einer dritten Ebene darüber hinaus die modalen Unwuchten auszugleichen, welche infolge der Biegeeigenformen bei wellenelastischen Rotoren entstehen.

3.4 Einordnung in die Rotordynamik

Die Rotordynamik umfasst die durch die Rotation entstehenden und auf die rotierenden Bauteile einwirkenden Belastungen. Als Kerninhalte sind hierbei die auf das Schwingungsverhalten zurückzuführenden kritischen Drehzahlen zu identifizieren und daraus resultierende strukturelle Schwachstellen aufgrund von außen und innen auf das System einwirkender Kräfte. Die kritischen Drehzahlen sind jene

Drehgeschwindigkeiten, bei welchen Schwingungen das System so weit anregen können, dass es beschädigt wird. Bei diesen Drehzahlen schwingt das System exakt mit der Resonanzfrequenz, bei welcher eine Amplitudenerhöhung bis hin zur Zerstörung möglich ist. Die Modalanalyse dient der Bestimmung genau dieser Eigenfrequenzen und der Eigenformen des Systems. Die Eigenformen beschreiben dabei die relative Verformung des Systems, wenn dieses mit der entsprechenden Eigenfrequenz schwingt.

Sollte laut [9] eine dieser Eigenfrequenzen angeregt werden, kann schon eine geringe Krafteinwirkung bei geringer Dämpfung zu rapide ansteigenden Schwingungen führen. Dementsprechend sind auf Basis der Modalanalyse Anpassungen am Modell vorzunehmen [23]. Dabei muss die Anregung von der Zeit, aber nicht zwingend von der Last abhängig sein. Neben den Frequenzen resultieren als Ergebnis der Modalanalyse zudem die dazugehörigen Eigenformen als dynamische Signatur zur Identifizierung der Resonanzgefahr. Konstruktive Maßnahmen umfassen meist Material- oder Lageranpassungen zum Umgehen dieser Frequenzen. Schließlich stellt die Modalanalyse eine Risikoabschätzung für darauf aufbauende dynamische Analysen dar. Bei der Modalanalyse wird zunächst das Bauteil bezüglich Gestalt, Vernetzung, Materialzuweisung und Randbedingungen definiert. Anschließend erfolgt die Lösung des Eigenwertproblems auf Basis von Gl. 3.9, wobei die K Steifigkeitsmatrix und M die Massenmatrix verkörpern. Wichtig sind meist die ersten 6–20 Moden, wobei nur entscheidend ist, dass die Anregungen innerhalb des Frequenzspektrums der Moden vorhanden sind. Je weiter die Anregung von den untersten Eigenfrequenzen entfernt ist, desto geringer ist das Risiko. Aus diesen Ergebnissen lassen sich konstruktive Maßnahmen ableiten, welche auf Basis der Eigenfrequenzen mögliche Verschiebungen kompensieren sollen. Es ist vorteilhaft, dass Randbedingungen so weit wie möglich an der Realität liegen, sowie Verbindungen richtig definiert und alle Körper mit Masse innerhalb des Modells enthalten sind. Neben der Erhöhung der Lebensdauer von Systemen ergeben sich zudem Chancen der Geräuschminimierung und Kostensenkung.

$$(K - \lambda M) \varphi = 0$$

Gl. 3.9: Eigenwertproblem der Modalanalyse [9]

3.5 Modalanalyse

Ziel ist es laut [15], mithilfe der Modalanalyse dynamische Verhaltensweisen einer Struktur zu beschreiben, indem Eigenfrequenzen und Eigenformen, sowie die Dämpfung extrahiert werden. Diese Eigenformen werden als Moden bezeichnet. Grundlegende Ansätze sind zum einen die experimentelle Modalanalyse, als auch die Betriebsmodalanalyse. Bei der experimentellen Modalanalyse erfolgt die Messung von Schwingungen und Eigenfrequenzen gezielt durch eine externe Anregung. Dagegen nutzt die Betriebsmodalanalyse die vorhandenen Anregungen im System. Die Modalanalyse basiert wie in [15] erläutert auf einer Differentialgleichung 2. Ordnung (Gl. 3.10) der erzwungenen Schwingung eines Ein-Massen-Schwingers. Bei mehreren Massen wird diese in die Matrizenform in Gl. 3.11 überführt. Die gyroskopische Matrix in Gl. 3.12 berücksichtigt die Kreiselwirkung bei rotierenden Systemen. Folglich muss sie in der Rotordynamik berücksichtigt werden.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Gl. 3.10: Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Ein-Massen-Schwingers [15]

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t)$$

Gl. 3.11: Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Mehr-Massen-Schwingers in Matrizenform [15]

$$M\ddot{x} + (C + G)\dot{x} + Kx = F(t)$$

Gl. 3.12: Differentialgleichung 2. Ordnung der erzwungenen Schwingung eines Mehr-Massen-Schwingers in Matrizenform mit gyroskopischer Matrix [15]

Wird in Gl. 3.11 die Dämpfung vernachlässigt und eine harmonische Ansatzfunktion gewählt, führt dies zum Eigenwertproblem in Gl. 3.9 aus Kap. 3.4, sofern die Anregungskraft $F(t) = 0$ ist. Das Bindeglied der Modalanalyse ist die Übertragungsfunktion. Diese dient zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen der einwirkenden Kraft $F(t)$ und der Systemantwort. Diese Systemantwort kann eine Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung sein. In der Praxis wird diese entweder durch die Berechnung der Übertragungsfunktion und der darauf basierenden Bestimmung der unbekannten Eigenwerte und Systemparameter oder aus bekannten Parametern eines Computermodells zu einer Übertragungsfunktion überführt. Die Übertragungsfunktion basiert dabei auf der Gl. 3.13. Mit geschwindigkeitsabhängiger Dämpfung ergibt sich Gl. 3.14. In diesen und der vorherigen Gleichung sind die modale Masse m , modale Federkonstante k , die Eigenfrequenz ω , die Auslenkung $\hat{X}(\omega)$, die dynamische Nachgiebigkeit $\underline{H}_{vF}(\omega)$, die Beweglichkeit $\underline{H}_{aF}(\omega)$ und die Kraft $\hat{F}(\omega)$ enthalten.

$$\underline{H}_{vF}(\omega) = \frac{\hat{X}(\omega)}{\hat{F}(\omega)} = \frac{\underline{H}_{vF}(\omega)}{j\omega} = \frac{\underline{H}_{aF}(\omega)}{j\omega^2}$$

Gl. 3.13: Übertragungsfunktion der Modalanalyse [15]

$$\underline{H}_{vF}(\omega) = \frac{1}{k} + \frac{1}{j\omega^c} - \frac{1}{\omega^2 m}$$

Gl. 3.14: Übertragungsfunktion der Modalanalyse mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung [15]

Der charakteristische Verlauf dieser Übertragungsfunktion ist in Abb. 3.5 abgebildet, welche zunächst mit steigender Kreisfrequenz zu einem Maximum bei der Resonanz ansteigt und danach wieder absinkt. Die Höhe dieser Amplitude wird durch die Dämpfung begrenzt.

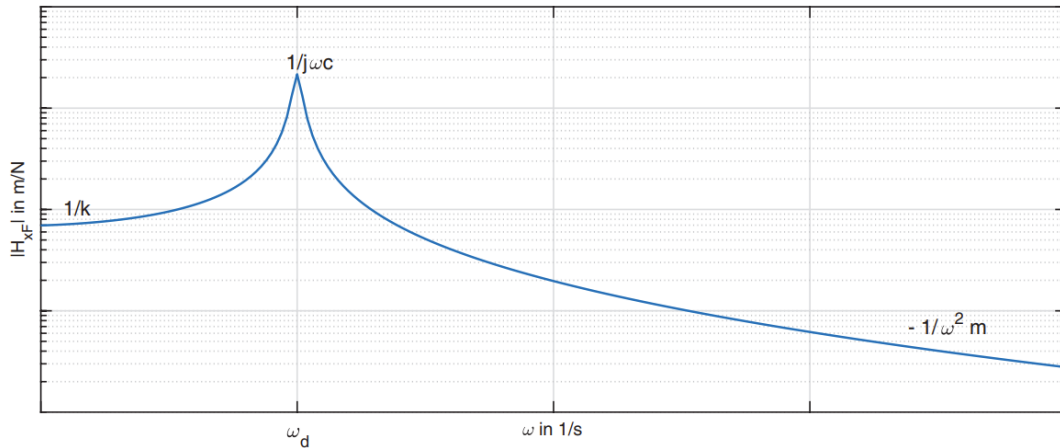


Abb. 3.5: Charakteristischer Verlauf der Übertragungsfunktion mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung [22]

3.6 Einordnung der Unwucht

Das Auswuchten spielt in der Rotordynamik eine Rolle, da die Anbringung von Ausgleichsgewichten zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens führen kann. Vorhandene Unwuchten entstehen durch einen nicht mit der Drehachse übereinstimmenden Massenschwerpunkt des rotierenden Bauteils. Die folgende Schwingungsanalyse basiert beispielsweise auf der schon angesprochenen Modal- und darüber hinaus auf der harmonischen Analyse, welche beide in dieser Arbeit Anwendung finden [17]. Die harmonische Analyse erfolgt zur Untersuchung des Rotationsverhaltens bei sinusförmiger Anregung. Die Ergebnisse der Modalanalyse dienen in der harmonischen Analyse, um das Rotationsverhalten zu untersuchen.

3.7 Campbell-Diagramm

Da durch die Kreiselwirkung die Eigenfrequenzen drehzahlabhängig sind und somit eine Betrachtung des Verlaufes über die Drehzahl als sinnvoll erscheint, erfolgt die Darstellung der Ergebnisse aus Kap. 3.5 innerhalb eines Campbell-Diagramms[16]. In dem Diagramm werden Frequenzen des Systems über dem Drehzahlbereich aufgetragen. Das Campbell-Diagramm besteht aus einer x-Achse zur Auftragung des Betriebsfensters durch die Drehzahl in $\frac{\text{Umdrehungen}}{\text{Minute}}$ und der y-Achse, welche die Frequenzen in Hz abbildet. Innerhalb dieses Diagrammes sind verschiedene Linien abgebildet, welche in zwei unterschiedliche Arten zu unterscheiden sind. Während eine Art von Linien die Eigenfrequenzen bzw. Moden darstellt, visualisiert die andere den Betriebsdrehzahlbereich. Als kritische Drehzahlen werden die Schnittpunkte dieser beiden Linienarten bezeichnet, in welchen Resonanzerscheinungen auftreten. Die Anregung, in diesem Fall eine Rotation, geht mit einer Anregungsfrequenz einher, welche nicht die Eigenfrequenzen eines Systems treffen soll. Resonanzen und die damit einhergehende, stetig zunehmende Schwingungsamplituden werden damit vermieden. Der Anstieg dieser Anregungsfrequenz ist direkt proportional zur Geschwindigkeit der Maschine, womit eine Beachtung der Abstände zu Eigenfrequenzen bzgl. des Betriebsbereiches notwendig

wird. Resultierende Phänomene für den Betrieb nahe oder bei einer solchen kritischen Drehzahl, also wo Eigenfrequenz und Anregungsfrequenz gleich sind, machen sich in Form von erhöhtem Verschleiß bis hin zu strukturellem Versagen bemerkbar. Das Campbell-Diagramm soll vor allem im Konstruktionsprozess als Vorhersagemöglichkeit dienen, um gezielt Eigenfrequenzen zu umgehen. Es verkörpert eine Verknüpfung von Wechselwirkungen verschiedener physikalischer Eigenschaften und der Betriebsdynamik.

3.8 Finite-Elemente-Methode

Als Grundlage für die Implementierung von modaler und harmonischer Analyse innerhalb ANSYS gilt die Finite-Elemente-Methode. Aus [18] geht hervor, dass die Motivation der Finite-Elemente-Methode die physikalische Beschreibung eines realen Systems umfasst. Dazu werden Randbedingungen richtig gesetzt und die Realität auf ein akzeptables Maß vereinfacht. Diese Randbedingungen sind nötig, um nach Ort und Zeit abgeleitete Differential- und Integralgleichungen zu lösen. Laut [7] wird die betrachtete Geometrie in zahlreiche kleine Teile, den „Elementen“, unterteilt. Zu verknüpfen sind diese Elemente anschließend durch „Knoten“, welche die Kontinuitäts- und Gleichgewichtsbedingungen berücksichtigen und deren Lösung in Summe zur Gesamtlösung führt. Ergebnis ist ein umfangreiches Gleichungssystem, das ab 1943 durch Richard Courant erstmals erdacht wurde. Erste Anwendungen sind im Flugzeugbau ab 1950 bekannt. Der mathematische Nachweis folgte jedoch erst um 1960. Durch die großen Rechensysteme der 70er wurden die großen Gleichungen berechenbar. Neben „Finite-Differenzen-“ und „Randelemente-“ ist die „Finite-Elemente-Methode“ eine Methode, welche durch die Aufteilung des Bauteils in mehrere Bereiche geprägt ist. Diese bilden jeweils die physikalischen Gegebenheiten des Systems ab. Einsatzgebiete umfassen z.B. die Statik, lineare und nichtlineare Dynamik, Umformsimulationen und vieles mehr. Verfahren wie nach Ritz betrachten dabei die gesamte Geometrie. Dagegen basiert die FEM auf Ansatzfunktionen. Zusammengefasst wird zunächst eine Lastsituation, z.B. ein einseitig eingespannter Träger mit Last beaufschlagt und dieser anschließend mithilfe von finiten Elementen vernetzt. Diese Elementtypen können sowohl Tetraeder, Quader als auch Balken- und Schalenelemente sein, um nur ein paar zu nennen. Die verschiedenen Matrizen überlagern sich anschließend auf Basis der Knotenzuordnung. Um anschließend das entstandene Gleichungssystem lösen zu können, werden geometrische Randbedingungen und Lasten am System definiert. Mit diesen werden dann Verformungen und Spannungen berechnet. Die vier großen Hauptsätze, welche die FEM befolgt, sind zum einen, dass die Spannungswerte in den Elementmittelpunkten besser mit den wirklichen Spannungen übereinstimmen als an den Knoten. Des Weiteren werden Verschiebungen besser wiedergegeben als Spannungen, und an den Elementgrenzen sind die Verschiebungen stetig, während Spannungen dort Sprünge aufweisen.

3.9 Harmonische Analyse

Die „Harmonische Analyse“ basiert auf Bewegungsgleichungen, und dabei wird, wie in [3], die stationäre Reaktion des Systems auf lineare, mit der Zeit sinusförmig harmonisch veränderliche Anregungen analysiert. Dies ist wichtig, um mögliche und durch äußere Anregung erzwungene Schwingungen bezüglich Resonanz-

überhöhungen aufgrund getroffener Eigenfrequenzen zu untersuchen. Die Reaktion der Struktur auf die Anregungen erfolgt genau wie diese sinusförmig bei gleicher Frequenz. Zu Beginn der „Harmonischen Analyse“ wird dazu ein Frequenzbereich so gewählt, dass er den Anregungsfrequenzen, z.B. Drehfrequenzen bei Unwuchtanregung, entspricht. Das resultierende Diagramm beinhaltet dann die Eigenfrequenzen, deren Amplituden mit dem gedachten Auswuchtsystem zu senken sind. Ein Beispiel für einen solchen Frequenzgang ist in Abb. 3.6 dargestellt.

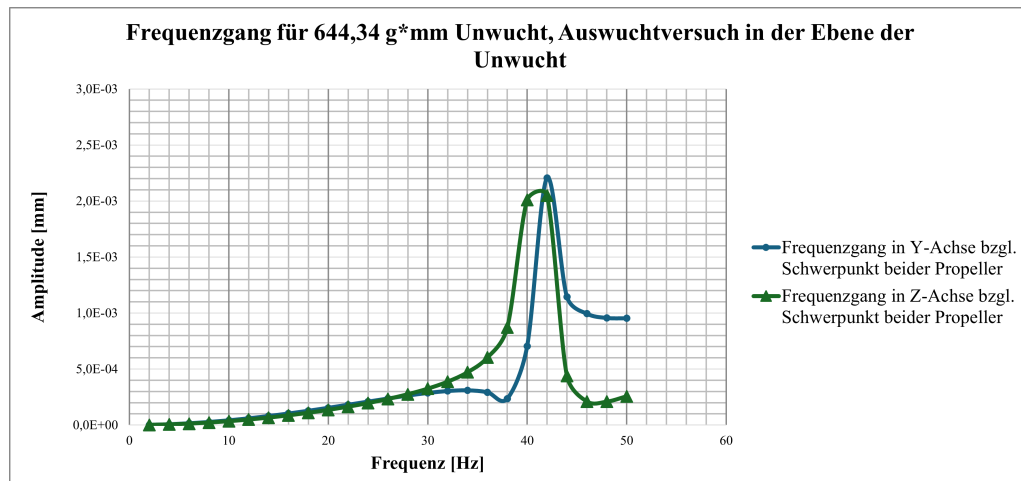


Abb. 3.6: Beispiel Frequenzgang aus harmonischer Analyse

Die harmonische Analyse ist nur bei linearen Systemen möglich. Nichtlinearitäten (z.B. infolge der Plastizität oder großer Verformungen etc.) werden nicht einbezogen. Mögliche Methoden in ANSYS sind dabei die „Modusüberlagerung (Standard)“ und „Full (im Programm: Harmonisch mit vollen Matrizen)“. Die „Modusüberlagerung (Standard)“ basiert auf der Untersuchung der harmonischen Antwort durch notwendige lineare Kombinationsmöglichkeiten der in der Modalanalyse ermittelten Eigenformen. Vorteil ist die Nutzung einer vorangegangenen Modalanalyse und der darin berechneten Eigenvektoren, indem die Eigenformen für unterschiedliche Belastungsfälle genutzt werden, um Zeit einzusparen. Dies konnte in ANSYS nicht wie ursprünglich vorgesehen vollständig implementiert werden. Dementsprechend wurde in ANSYS die Methode „Full (im Programm: Harmonisch mit vollen Matrizen)“ eingestellt. Hierbei wird die harmonische Antwort aus der simultanen Antwort extrahiert. Ein weiterer Vorteil ist die mögliche Verknüpfung mit einer vorher durchgeführten statisch-strukturellen Analyse. Diese kann ebenfalls für die „Harmonische Analyse“ genutzt werden.

4 Konzipieren

4.1 Erkennen der wesentlichen Probleme

Als Grundlage für die Problembetrachtung der Aufgabe diene zunächst die Black-Box-Darstellung. Im Hinblick auf die von außen auf das System einwirkenden Faktoren waren die stofflichen, energetischen oder informativen Inhalte der Anforderungsliste in Tab. 2.1 aus Kap. 2.2.6 ausschlaggebend für die weitere Vorgehensweise. Da das Auswuchtsystem durch die Anbringung am Motor-Propeller-System den identischen Einsatzort wie der eigentliche Solarflieger erreichen wird, werden auch die Umwelteinflüsse nahezu gleich sein. Die Vorrichtung soll darüber hinaus als Ergänzung für das bestehende System dienen. Die Betrachtung der Immissionen, also der besagten Umwelteinflüsse, musste hierbei in zwei Phasen unterschieden werden: einmal in die Startphase am Boden, in welcher stark wechselnde Wettereinflüsse eine Rolle spielen werden, und einmal in die Phase in 20 km Höhe (Einsatzhöhe) [1], in welcher sich die Varianz des Wetters eher beruhigt, jedoch Temperaturen und Strahlungen stärker ins Gewicht fallen könnten. Die Emissionen gestalteten sich wiederum anders. Die Einflüsse, welche der Solarflieger auf seine Umwelt haben wird, werden die gleichen sein, welche auch das an ihm anzubringende Auswuchtsystem aufweisen wird. Die Emissionen des Auswuchtsystems werden zusätzlich auf die Beeinflussung des Motor-Propeller-Systems abzielen. Die durch das Auswuchtsystem montierbaren Ausgleichsgewichte dienen dem Ausgleich der in Kap. 3.3 eingeführten und vorherrschenden Unwuchten. Als Emission konnte hierbei die Schwingung des Propellers bzw. der rotierenden Bauteilgruppe des Motor-Propeller-Systems betrachtet werden. Allerdings müssen diese Schwingungen so weit im Rahmen bleiben, dass weder Beschädigungen am Auswuchtsystem noch am Solarflieger selbst entstehen. Eine Gewichtszunahme wird nicht ausgeschlossen, wobei diese in Grenzen liegen muss, da die Motoren im Vergleich zum Gesamtfieger ein geringes Gewicht aufweisen. Auch Spannungen innerhalb bzw. zwischen dem ursprünglichen Motor-Propeller-System und dem Auswuchtsystem könnten sich negativ auf die Kombination nach der Montage auswirken. Diese zulässigen Bereiche galt es herauszufinden und im Hinblick auf die Auswuchtaufgabe maximal zu nutzen. Ansonsten stand fest, dass sich das Auswuchtsystem nicht stärker auf die Umwelt auswirken sollte, als es der Solarflieger ohnehin tut. Grundsätzlich handelt es sich um einen Solarflieger, der im Betrieb keine direkten negativen Einflüsse auf die Umwelt aufweist. Hinzu kommen die akustischen Einflüsse beim Start, wie etwa das Anlaufen der Motoren und damit auch die Geräusche der Rotorblätter. Dies wirkt sich selbstverständlich nur für Menschen und Umwelt in unmittelbarer Umgebung störend aus. In der zweiten Phase wären diese akustischen Störungen eher nebensächlich. Natürlich hängt dies vom exakten Design ab. Im Hinblick auf montage Technische Prozesse bestehen je nach verwendetem System unterschiedlich hohe Verletzungsgefahren. Anzahl und Art der Montageschritte spielen dabei eine entscheidende Rolle. Schließlich ist vorgesehen, dass sich das Auswuchtsystem nicht stärker auf die Umwelt auswirkt als der eigentliche Solarflieger. Letztendlich mündeten all diese Überlegungen in einer durch das Auswuchtsystem hervorgerufenen Ausgleichsunwucht, welche die bestehenden Unwuchten des Systems korrigieren soll.

4.2 Ermitteln der Funktionen

Die in Kap. 2.2.6 aufgeführte Tab. 2.1 wurde als Grundlage zur Festlegung der Funktionen verwendet, welche die Auswuchtvorrichtung erfüllen muss, um im weiteren Schritt auf geeignete Wirkprinzipien schließen zu können. Die grundlegenden Einzelfunktionen umfassen das Verbindungskonzept mit dem Propeller-Motor-System, die Gestaltung der Tragstrukturausrichtung für die individuelle Anbringung von Ausgleichsgewichten sowie das Material der Tragstruktur. Weiterhin wurden Gestaltungsmöglichkeiten für die Anbringung der Ausgleichsgewichte an der Tragstruktur sowie deren Form und Material aufgelistet. Schließlich folgte die Auflistung von Fertigungstechnologien für die Tragstruktur sowie der möglichen Prüfmöglichkeiten.

Tab. 4.1: Tabelle der Einzelfunktionen

Nr.	Einzelfunktion
1	Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System
2	Gestaltung der Tragstrukturausrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten
3	Materialwahl der Tragstruktur
4	Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestalt der Ausgleichsgewichte
5	Materialwahl der Ausgleichsgewichte
6	Fertigungstechnologien für die Tragstruktur
7	Prüfmöglichkeiten

4.3 Suchen nach Wirkprinzipien

Die in Kap. 4.2 aufgeführten Punkte der Tab. 4.1 bildeten den Ausgangspunkt für die Erstellung von Lösungsvarianten, welche jeweils eine Einzelfunktion dieser Tabelle erfüllen und somit im Hinblick auf die Gesamtaufgabe ein Spektrum an auswählbaren Lösungskonzepten darstellen. Dafür wurden für jede einzelne Lösungsvariante Vor- und Nachteile in Kap. 4.3 zusammengetragen, auf deren Basis zunächst ein morphologischer Kasten erstellt werden konnte. Dieser diente als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Lösungsvarianten und schließlich für den Variantenvergleich zur Auswahl der finalen Lösungsvariante.

4.3.1 Einzelfunktion: Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System

Zunächst stellte sich die Frage, welches Konzept bei der Verbindung des Auswuchtsystems mit dem bestehenden Motor-Propeller-System verfolgt werden sollte. Ein wesentlicher Punkt war, dass der Elektromotor mit der Bezeichnung QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard nur wenige Verbindungsmöglichkeiten zuließ, da er als fertige, zu kaufende Maschine vorlag und lediglich begrenzte Freiräume innerhalb der gegebenen Geometrien bot. Die Aufstellung von Lösungsvarianten musste daher vor allem mit den vom Auftraggeber in Kap. 2.2.6 aufgeführten Festforderungen der Tab. 2.1 im Einklang stehen. Als besonders relevant für die Lösungsvarianten der Verbindungsmöglichkeiten erwiesen sich die Festforderungen zur nachträglich montierbaren Vorrichtung sowie zur nachträglichen Montage von Ausgleichsgewichten am geplanten Auswuchtsystem. Festforderung Nr.9 beinhaltete den Außendurchmesser des Elektromotors von 150,2 mm, welcher nach Möglichkeit nicht überschritten werden durfte. Daraus ergaben sich drei wesentliche Konzepte. Ein Konzept war die Umsetzung mittels Klemmen, welche durch verlängerte Verbindungsschrauben des

Magnetrings mit der Rotor-Disk fixiert und zusätzlich durch eine in die Lücke zwischen den Magneten im Inneren des Magnetrings greifende Klaue gesichert würden. Der anschließend folgende Ring für die Ausgleichsgewichte hätte axial an diese Klemmen angeschraubt werden müssen, wofür entsprechende Gewindebohrungen erforderlich gewesen wären. Diese Lösungsvariante ließ sich sowohl in Richtung des Encoders (Abb. 4.1) als auch in Richtung des Propellers (Abb. 4.2) umsetzen. Dies setzte jedoch voraus, dass zwischen Magnetringaußendurchmesser und Propellergeometrie ausreichend Abstand vorhanden war. Der daran zu befestigende Ring für die Ausgleichsgewichte müsste allerdings über dieses Maß hinausragen und zusätzlich die Dimensionen des Propellers berücksichtigen.

Damit war zwar die Festforderung der nachträglichen Montierbarkeit des Auswuchtsystems erfüllt, jedoch erhöhte sich die Anzahl der zu montierenden Teile zusammen mit den notwendigen Schrauben und Verbindungsklemmen deutlich. Darüber hinaus beinhaltete diese Lösungsvariante, unabhängig von der Orientierung, noch nicht die Ausgleichsgewichte, welche zusätzlich als Einzelteile angebracht werden müssten. Sowohl das Gewicht als auch die Anzahl der Bauteile würden somit weiter ansteigen. Ein weiterer Nachteil war, dass diese Lösungsvariante die Festforderung des maximalen Außendurchmessers von 150,2 mm nicht erfüllen konnte, da die Klemmen in beiden Orientierungen über den Durchmesser des Elektromotors hinausragten und somit auch der Auswuchtring nicht kleiner als 150,2 mm hätte ausfallen können.

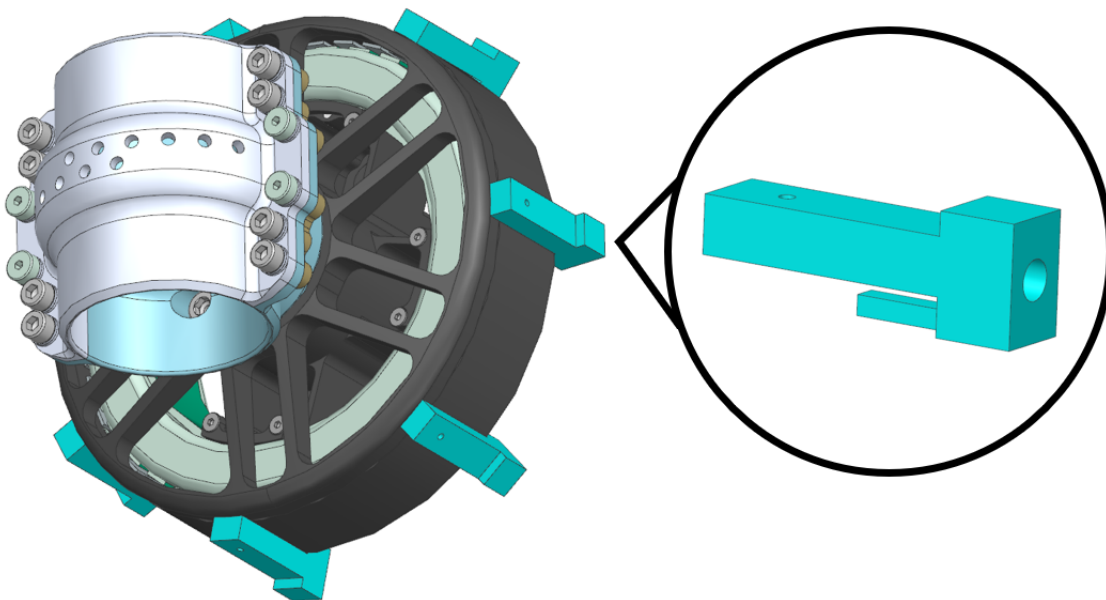


Abb. 4.1: Lösungsvariante 1a - Motorverbindungskonzept mithilfe von Klemmenlösung in Encoderrichtung

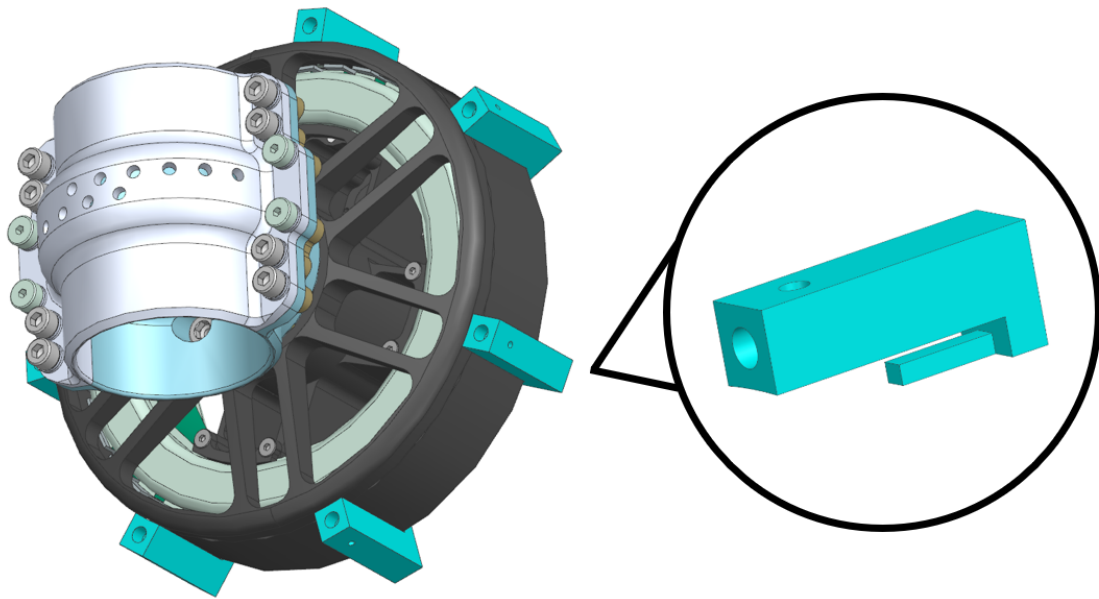


Abb. 4.2: Lösungsvariante 1b - Motorverbindungskonzept mithilfe von Klemmenlösung in Propellerrichtung

Zur Minimierung der zu verbindenden Teile im Hinblick auf die Auswuchtvorrichtung wurde eine weitere, im Rahmen der Möglichkeiten umsetzbare Lösungsvariante entwickelt. Dabei handelte es sich um eine Verschmelzung der Innenschelle des Propellers mit dem geplanten Auswuchtsystem, indem auf die Klemmen aus Lösungsvariante 1 verzichtet wurde. Das Auswuchtsystem entstand somit als ein einziges Bauteil, an welches anschließend, auf Basis einer vorangestellten Auswuchtung, die Ausgleichsgewichte am Motor-Propeller-System befestigt würden. Ein Unterschied zwischen beiden Systemen lag lediglich in der daraus resultierenden Vorgehensweise des Auswuchtens und der Montagefolge. Da die erste Lösungsvariante die Festforderungen 1 und 2 bereits erfüllte, wäre es bei Lösungsvariante 1 möglich gewesen, diese nach einer vorangestellten Auswuchtung einfach zu montieren und anschließend gezielt Gewichte anzubringen. Dies hätte jedoch eine Zweiteilung des vorgesehenen Rings für die Ausgleichsgewichte vorausgesetzt, was in der Variantenfindung für die Einzelfunktion Nr. 2 noch eine Rolle spielen würde. Auch dies hätte die Anzahl der zu verbindenden Teile und damit potenzieller Schwachstellen erhöht.

Die Ausgleichsgewichte stellten auch in dieser Lösungsvariante die noch mit dem Auswuchtsystem zu verbindenden Einzelteile dar, welche zu diesem Zeitpunkt noch fehlten. Damit würde die zweite Festforderung weiterhin eingehalten werden. Ein weiterer Vorteil waren die möglichen Dimensionierungsfreiheiten des Auswuchtrings. Da nun von der Antriebswelle aus konstruiert wurde, konnte auch die Einhaltung der Festforderung 9 gewährleistet werden. Diese Lösungsvariante ist in Abb. 4.3 dargestellt.

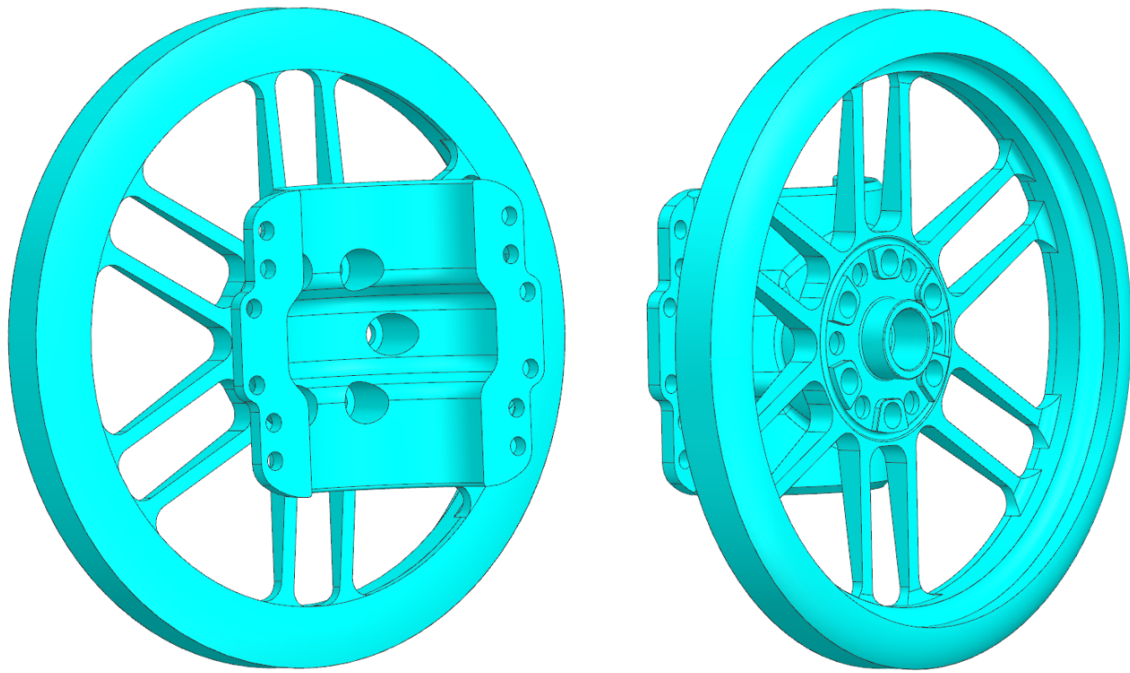


Abb. 4.3: Lösungsvariante 2 - Motorverbindungskonzept durch Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtring

Ein Nachteil dieser Lösungsvariante waren fertigungstechnische Probleme. Nach einem Gespräch mit einem potenziellen Fertigungstechniker wurde festgestellt, dass die Fertigung als kombiniertes Teil technisch nicht möglich wäre. Hauptgrund dafür waren unvermeidbare Hinterschneidungen, also Geometrien, die hintereinander liegen, sich jedoch in ihrer Form stark unterscheiden und sich dadurch gegenseitig den Bearbeitungszugang versperren. Aus diesem Grund wurde Lösungsvariante 3 entwickelt, welche die bestehenden Geometrien und Freiräume nutzte, ohne deutlich mehr Material zu benötigen, und gleichzeitig den Abstand zwischen Propeller und Schnittstelle zwischen Motor und Flugzeug nicht unnötig vergrößerte. Bei dieser Lösungsvariante könnten zunächst die zylindrischen Geometrien beider Teile mit notwendiger Kreisinterpolation auf einer Drehmaschine gefertigt werden. Anschließend würden die prismatischen Geometrieanteile auf einer Fräsmaschine hergestellt. Alternativ wären auch kombinierte Dreh-Fräsmaschinen einsetzbar. Der wesentliche Unterschied zu Lösungsvariante 2 war somit die Teilung von Auswuchtring und Innenschelle. Vor allem aus Kostensicht würde eine Zweiteilung deutliche Einsparungen ermöglichen, insbesondere durch den Wegfall spezieller Werkzeuge. Abb. 4.4 zeigt diese Lösungsvariante. Notwendig wären hierfür jedoch verlängerte Versionen der Zylinderschrauben DIN 6912 M6×12 aus 10.9-Stahl, da mit diesen Schrauben ein zusätzliches Bauteil gehalten werden müsste. Einziger Nachteil und zugleich Verschlechterung gegenüber Lösungsvariante 2 war die Schaffung einer zusätzlichen Verbindungsstelle und damit einer potenziellen Schwachstelle zwischen Auswuchtring und Innenschelle. Wichtig ist außerdem, dass in Abb. 4.4 die radialen Abmessungen und die Gestaltung des Rings noch nicht an die 150,2 mm des Elektromotor-Rotors angepasst wurden. Innerhalb dieser Darstellung wurden lediglich die Verbindungsmöglichkeiten gezeigt; die Anpassung erfolgte anschließend. Eine Zusammenfassung aller genannten Punkte findet sich im Anhang in Tab. A.1.

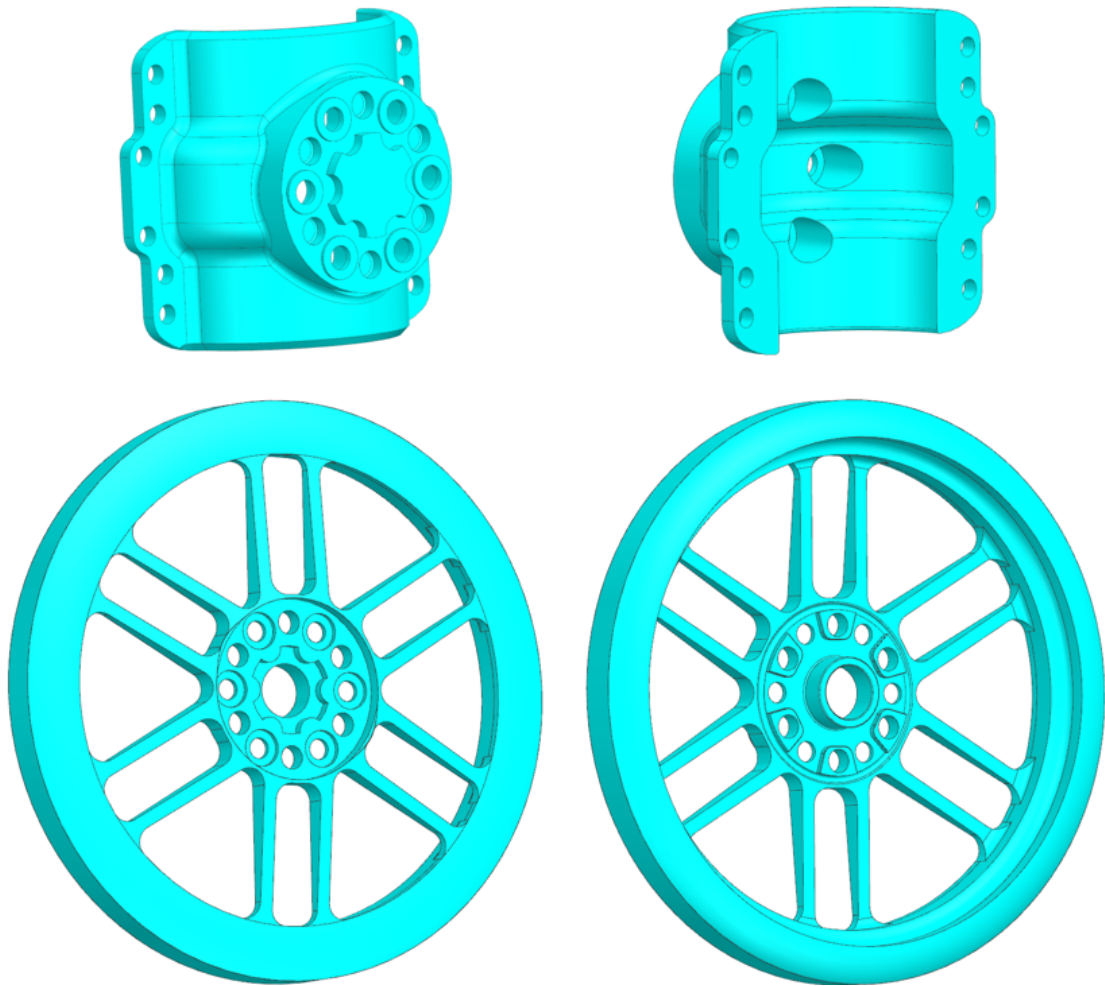


Abb. 4.4: Lösungsvariante 3 - Motorverbindungskonzept durch getrennte Innenschelle und Auswuchtring

4.3.2 Einzelfunktion: Gestaltung der Tragstruktureausrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten

Als Zweites musste die Gestaltung der Tragstruktur für die individuelle Anbringung von Ausgleichsgewichten entwickelt werden. Im Speziellen wurde dabei die Anbringungsseite für die Ausgleichsgewichte betrachtet. In Kombination mit Abb. 4.5 wurden die durch den Elektromotor entstehenden magnetischen Einschränkungen bei den verschiedenen Lösungsvarianten berücksichtigt. Die Formgebung der Propellerblätter begrenzte den maximal zulässigen Außendurchmesser des Auswuchtrings. Zudem musste ausreichend Platz für die spätere Montage der Ausgleichsgewichte vorhanden sein. Die daraus entstandenen Lösungsvarianten sind in Abb. 4.6 zusammengefasst.

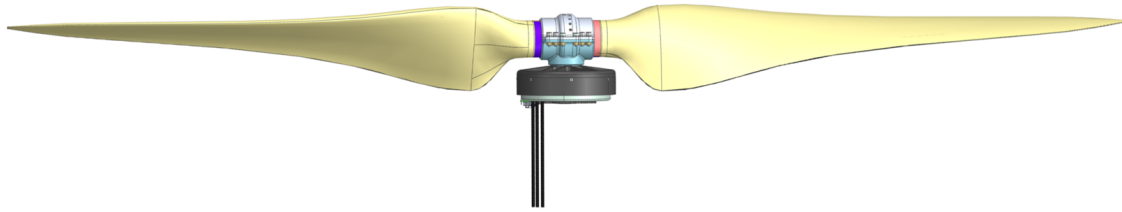


Abb. 4.5: bestehendes Motor-Propeller-System

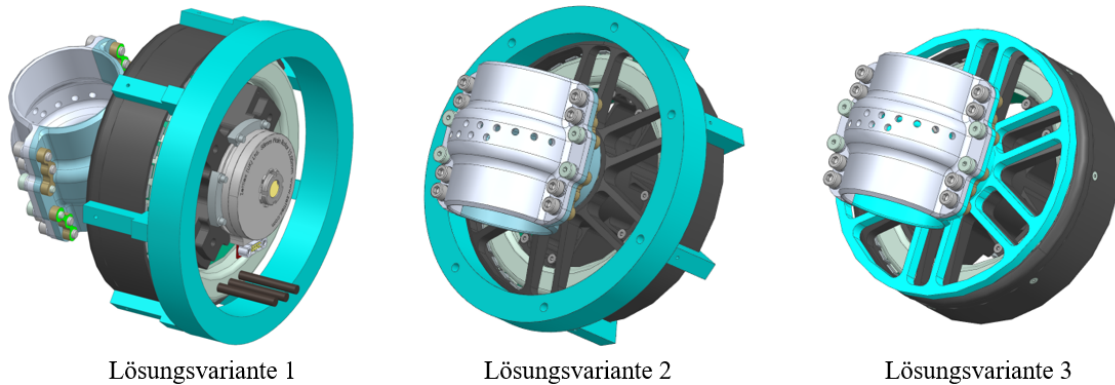


Abb. 4.6: Lösungsvarianten 1 bis 3 - Tragstruktureusrichtung

Zunächst stand Lösungsvariante 1 im Raum, bei welcher die Ausgleichsgewichte aus Richtung des Encoders angebracht werden. Nachteilig war hierbei, dass die Verwendung dieser Lösungsvariante die Klemmen aus Abb. 4.1 vorausgesetzt hätte, da sonst keine Anbringungsmöglichkeit am bestehenden Motor-Propeller-System vorhanden gewesen wäre. Daraus folgte, dass der Durchmesser des Auswuchtrings für diese Lösungsvariante größer sein musste als der des Elektromotor-Rotors, was sich aus gewichtstechnischen Gründen als problematisch erwies. Einziger Vorteil wäre eine geometrisch radiale Sicherung der Ausgleichsgewichte gewesen. Die Anbringung wäre zwar einfacher, jedoch nicht mit unbegrenztem Freiraum verbunden, da zwischen Motor und Flugzeugtragflügel lediglich etwa 20 cm Platz zur Verfügung stehen. Lösungsvariante 1 der Tragstrukturgestaltung ist in Abb. 4.6 dargestellt.

Ähnlich dazu war Lösungsvariante 2 der Tragstrukturgestaltung. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die Anbringung der Ausgleichsgewichte aus Richtung des Propellers erfolgen sollte. Zusätzlich ergab sich der Nachteil, dass die Propellerblätter nicht nur die axiale Ausdehnung des Auswuchtrings, sondern auch die der Ausgleichsgewichte begrenzt hätten. Weiterhin waren die Montagemöglichkeiten innerhalb dieser Lösungsvariante ebenfalls eingeschränkt, da spätestens bei axialer Betrachtung des Rotors an den Stellen der beiden Propellerblätter ein Platzmangel entstanden wäre. Der Vorteil entsprach dem der ersten Lösungsvariante, mit dem Unterschied, dass die Auswuchtebene näher an der ursprünglichen Unwuchtebene gelegen hätte. Beide Lösungsvarianten, sowohl 1 als auch 2, ermöglichten eine Gewichts Anpassung. Die Darstellung von Lösungsvariante 2 findet sich ebenfalls in Abb. 4.6.

Schließlich mündeten die Überlegungen zur Tragstrukturgestaltung in einer senkrecht zur Schaftachse ausgerichteten Anbringung der Ausgleichsgewichte. Montagetechnisch bot diese Lösungsvariante größere Freiheiten hinsichtlich der Sicherung der Ausgleichsgewichte, und die Dimensionen des Auswuchtrings konnten auf die des Motors begrenzt werden. Aufgrund des in Abb. 4.5 erkennbaren geringen Abstands zwischen

Motor und Propeller bot diese Lösungsvariante deutliche Vorteile bei der Anbringung der Ausgleichsgewichte. Trotz der zwei durch die Propellerblätter schwer erreichbaren Stellen, die auch bei Lösungsvariante 2 problematisch waren, ermöglichte diese Ausrichtung eine deutliche Vereinfachung der Montage. Zudem lagen die Ausgleichsgewichte senkrecht zur Schaftachse, was im Hinblick auf die Steifigkeitsberechnung klare Kraftpfade und eindeutige mechanische Zusammenhänge ermöglichte. Darüber hinaus konnten die Ausgleichsgewichte je nach Gestaltung der Anbringungsmöglichkeit in der Tragstruktur neben der Gewichtsvarianz auch hinsichtlich ihres Radius zur Schaftachse, wenn auch nur geringfügig, verändert werden. Dies unterschied Lösungsvariante 3 von den Anpassungsmöglichkeiten der ersten beiden Lösungsvarianten. Weiterhin bot auch diese Lösungsvariante Vorteile hinsichtlich einer einfacheren und kostengünstigeren Fertigung. Da im Vergleich zur in Kap. 4.3.1 beschriebenen Zweiteilung (Abb. 4.4) Anpassungen an der Verbindungsgeometrie des geteilten Auswuchtsystems vorgenommen wurden, ist diese in Abb. A.1 im Anhang mit Vorder- und Rückseite dargestellt. Die Veränderungen resultierten aus der zum Propeller hin ausgerichteten neuen Auswuchtringgeometrie. Eine nachteilige Gemeinsamkeit aller drei Lösungsvarianten bestand in der notwendigen ausreichenden Dimensionierung der axialen und radialen Abmessungen an den Stellen, an denen sich die Schnittstellen für die Anbringung der Ausgleichsgewichte befinden würden. Insgesamt ergaben sich somit drei Lösungsvarianten, die im Anhang in Tab. A.2 zusammengefasst sind.

4.3.3 Einzelfunktion: Materialwahl der Tragstruktur

Als Material der Tragstruktur wurde aus Tab. 2.1 in Kap. 2.2.6 die Festforderung 5 zur Nutzung von EN AW-7022 (Cortal) übernommen. Damit waren für das Material der Tragstruktur keine weiteren Lösungsvarianten auszuwählen.

4.3.4 Einzelfunktion: Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestalt der Ausgleichsgewichte

Die nächste Variantenbildung betraf die Frage, wie die Gestaltung der Anbringung der Ausgleichsgewichte an der Tragstruktur umgesetzt werden sollte. Diese Lösungsvarianten umfassten nicht nur die Festlegung der Geometrien der Gewichte selbst, sondern auch die Gestaltung des erforderlichen Gegenstücks im Auswuchtring. Daraus entstanden vier Möglichkeiten. Lösungsvariante 1 sah vor, die örtliche Gewichtszunahme auf dem Auswuchtring bzw. der Tragstruktur durch eine umlaufende Rechtecknut, wie in Abb. 4.7 dargestellt, zu realisieren. In diese Nut wäre an den benötigten Stellen Kleber aufgetragen worden, der das Ausgleichsgewicht verkörpert hätte. Dabei sollte der gleiche Kleber verwendet werden, der bereits für verschiedene Bauteile des Motors eingesetzt wurde. Die Rechtecknut stellte eine kostengünstige Lösung dar, da kein Spezialwerkzeug erforderlich gewesen wäre. Die Positionen der Klebestellen hätten sich aus vorherigen Auswuchtvorgängen hinsichtlich Masse und Winkellage ergeben. Darin lag jedoch ein wesentlicher Nachteil: Durch die umlaufende Nut wären Radiusanpassungen nicht mehr möglich gewesen. Zudem hätte der Kleber nicht exakt definiert an einer Stelle aufgetragen werden können. Zwar bot diese Lösungsvariante eine frei wählbare Winkellage über 360° , jedoch wäre die Entfernung des Klebers bei mehrfachen Gewichtsanpassungen unpraktisch gewesen. Hinzu kommt, dass Kleber eine gewisse Aushärtezeit besitzt. Ein Vorteil dieser Lösungsvariante lag im Verzicht auf zusätzliche Sicherungselemente, da der Kleber ohne

Fremdeinwirkung eine feste Verbindung mit der Oberfläche eingehen kann. Gleichzeitig ergab sich daraus jedoch der Nachteil, dass die Klebeverbindung Witterungseinflüssen ausgesetzt gewesen wäre, was zu einem möglichen Lösen hätte führen können.

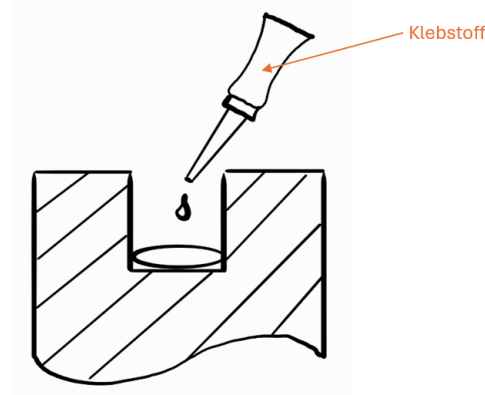


Abb. 4.7: Lösungsvariante 1 - Tragstruktur- und Ausgleichgewichtsgestaltung durch umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung

Eine weitere Möglichkeit, mit der eine Auswuchtung hätte durchgeführt werden können, basierte auf einer ähnlichen Nut wie in Lösungsvariante 1. Der Unterschied lag in der Gestaltung des Querschnitts als T-Nut, wobei der schmale Bereich nach außen gerichtet und der breite Bereich in das Material eingearbeitet worden wäre. Die Ausgleichsmassen wären in diesem Fall als Metallstücke gefertigt worden. Als vorteilhaft hätte sich die formschlüssige Sicherung der Ausgleichsgewichte mittels eines an ein rechteckiges Metallstück angeschweißten Gewindestiftes erwiesen. Dieses rechteckige Metallstück wäre zunächst mit der schmalen Seite in die T-Nut eingeführt und beim Erreichen der breiteren Stelle so gedreht worden, dass es nicht mehr durch den schmalen Eingang hätte herausgleiten können. Außerhalb der Nut wäre die Gewichts Anpassung durch zusätzliche Gewichte erfolgt, durch welche der Gewindestift hätte geführt werden müssen. Die Fixierung wäre anschließend mittels Mutter und Unterlegscheibe erfolgt. Durch das Festziehen der Mutter hätte sich das untere rechteckige Metallstück gegen die beiden unteren Absätze der T-Nut gepresst. Die frei wählbare 360°-Anordnung um die Schaftachse wäre damit gewährleistet gewesen. Nachteilig war jedoch die steigende Bauteilanzahl sowie die fehlende Möglichkeit einer Radiusanpassung an der gewünschten Stelle. Zudem stellte sich die Idee nach Rücksprache mit dem Fertigungstechniker als nicht kostengünstig heraus, insbesondere aufgrund der für die Herstellung der T-Nut erforderlichen Spezialwerkzeuge. Diese Lösungsvariante ist in Abb. 4.8 dargestellt.

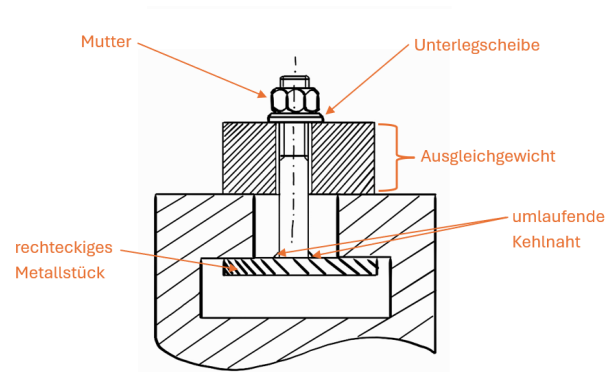


Abb. 4.8: Lösungsvariante 2 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch Umlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichgewichten in Kombination mit Schraubverbindung

Lösungsvariante 3, dargestellt in Abb. 4.9, ergab sich aus dem Fokus auf eine kostengünstige Umsetzung. Dabei wurde vollständig auf die Fertigung einer umlaufenden Nut verzichtet. Die Anbringung der Gewichte erfolgte, abhängig von den Dimensionen des Auswuchtrings, über entlang der radial zur Schaftachse angeordneten Gewindebohrungen sowie Gewindestifte mit Innensechskant und Kegelstumpf. Eine Sicherungsmöglichkeit hätte durch das Einbringen von Schraubensicherung in die Gewindegänge bestanden. Vorteile dieser Lösungsvariante lagen sowohl in der kostengünstigen Fertigung der Gewindebohrungen als auch in den preiswerten Ausgleichsgewichten. Grund dafür ist die große Varianz an Gewindestiftformen und -materialien, sodass für unterschiedliche Massen passende Gewindestifte aus Katalogen ausgewählt werden können. Zudem ermöglicht die Variation der Einschraubtiefe eine Anpassung des Radius, wenn auch nur in begrenztem Umfang. Ein Nachteil dieser Lösungsvariante besteht in der begrenzten Anzahl radial verteilter Bohrungen senkrecht zur Schaftachse.

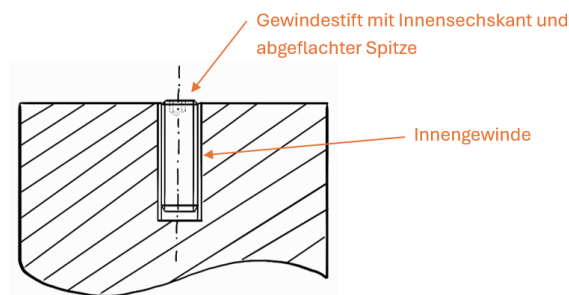


Abb. 4.9: Lösungsvariante 3 - Tragstruktur- und Ausgleichsgewichtsgestaltung durch Verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen

Schließlich konnte die dritte Lösungsvariante zu einer vierten erweitert werden, bei der die Gewichts-anpassung nicht durch unterschiedliche Materialien der Gewindestifte, sondern durch den Einsatz verschiedener Schrauben erfolgen würde. Diese Schrauben würden, ähnlich wie in Lösungsvariante 2, durch ein anpassbares Gewicht in die Gewindebohrung eingeschraubt und anschließend mittels Mutter und Unterlegscheiben gesichert werden. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die Schraube in diesem Fall zwingend der zuvor genannte Gewindestift sein musste, da das zur Schaftachse gerichtete Ende nach der Montage nicht mehr erreichbar wäre. Darüber hinaus würde innerhalb der Ausgleichsgewichte lediglich eine Durchgangsbohrung

eingearbeitet werden, da das Gewinde im Auswuchtring sowie die Mutter am Ende des Gewindestiftes die Sicherung übernehmen würden. Dadurch wäre eine feinere Gewichts Anpassung möglich gewesen. Ein weiterer Nachteil, der mit dieser Anpassungsmöglichkeit einherging, war die erhöhte Bauteilanzahl. Die übrigen Vor- und Nachteile entsprachen weitgehend denen von Lösungsvariante 3. Zur besseren Veranschaulichung ist diese in Abb. 4.10 dargestellt. Sämtliche Schraubverbindungen sind mit Schraubensicherung zu versehen. Alle Vor- und Nachteile wurden im Anhang in Tab. A.3 zusammengefasst.

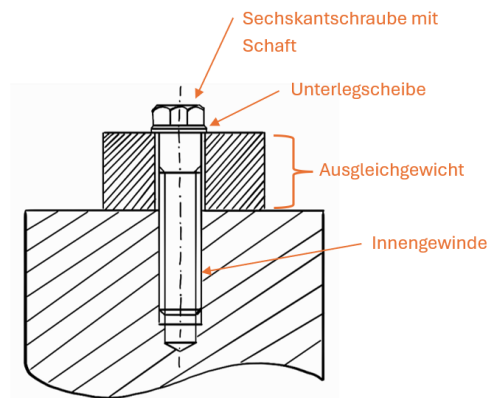


Abb. 4.10: Lösungsvariante 3 - Tragstruktur- und Ausgleichgewichtsgestaltung durch Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)

4.3.5 Einzelfunktion: Materialwahl der Ausgleichsgewichte

Als Materialien für die Ausgleichsgewichte wurden verschiedene Lösungsvarianten ausgewählt. Zum einen konnten die Gewichte, abhängig von der zuvor gewählten Lösungsvariante, aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Dies betraf insbesondere Lösungsvariante 1 aus Kap. 4.3.4, da bei dieser Variante der Klebstoff als Material vorgegeben war. Gleiches galt für Lösungsvarianten, bei denen das eigentliche Gewicht durch eine Schraube verkörpert wurde. Die folgenden Wirkprinzipien waren hingegen als Lösungsvarianten gedacht, die separate Ausgleichsgeometrien aufweisen konnten, also Lösungsvariante 2 und 4 aus Kap. 4.3.4. Grundsätzlich können Ausgleichsgewichte aus Zink, Stahl, Blei, Wolfram, Zinn, Messing oder Klebstoff bestehen. Grundlage hierfür waren unter anderem die Informationen aus [8]. Lösungsvariante 1 beschrieb Ausgleichsgewichte aus Zink, welche als sehr umweltfreundlich gelten. Zusammen mit Ausgleichsgewichten aus Stahl, die zudem eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweisen, hätten beide Materialien jedoch bei gleicher Vergleichsmasse größere Abmessungen benötigt, da ihre Dichte im Vergleich zu Lösungsvariante 3 geringer ist. Als Nachteil von Stahl wurde in [8] die geringe Elastizität genannt. Als Referenz für die vorherigen wie auch die letzten beiden Lösungsvarianten diente die Ausführung der Ausgleichsgewichte aus Blei. Aufgrund seiner hohen Dichte hätten die Gewichte deutlich kleiner dimensioniert werden können. Einziger Nachteil ist die Umweltschädlichkeit, da durch Rotationsbewegungen Späne abfallen und somit Tier- und Pflanzenwelt geschädigt werden könnten. Als alternative Materialien wurden Wolfram und Zinn betrachtet, die ebenfalls eine hohe Dichte besitzen. Nachteilig sind jedoch die kostenintensive Gewinnung und Fertigung zu Ausgleichsgewichten [8]. Weiterhin wurde Messing als mögliches Material gewählt, da es im

Vergleich zu Stahl eine höhere Dichte besitzt und zudem preisgünstig ist. Als nachteilig könnte die geringere Elastizität genannt werden, was bei Spannungen problematisch sein kann [14]. Als letztes mögliches Material wurde der bereits im Motor verwendete Klebstoff berücksichtigt. Vorteilhaft ist die einfache Auftragung auf den Auswuchtring sowie die bereits erprobte Eignung des Klebstoffs für die Anwendung. Nachteilig sind jedoch die schlechte Vorhersagbarkeit des Witterungseinflusses und die ungenaue Positionierbarkeit auf der Geometrie. Alle Materialien wurden schließlich mit den genannten Vor- und Nachteilen in Tab. A.4 im Anhang aufgeführt.

4.3.6 Einzelfunktion: Fertigungstechnologien und Tragstruktur

Als Nächstes wurden die verschiedenen Technologien diskutiert, die für die Fertigung des Auswuchtrings in Frage kommen würden. Die folgenden Fertigungsmöglichkeiten ergaben sich aus dem Gespräch mit einem Fertigungstechniker. Je nachdem, welche Lösungsvariante der Tragstruktur verwendet wird, ergeben sich unterschiedliche Vor- und Nachteile, die in Tab. A.5 im Anhang aufgeführt sind. Lösungsvariante 1 umfasst eine Kombination aus Drehen und Fräsen. Da es sich bei der Tragvorrichtung weitgehend um eine rotationssymmetrische Geometrie handelt, müsste diese zunächst auf einer Drehmaschine in ihre Grundform gebracht werden. Die Fertigung der Konturen würde anschließend durch eine Fräsmaschine erfolgen. Je nach gewählter Tragstrukturvariante könnte sich diese Fertigungsmethode als günstig oder kostenintensiv erweisen. Fest steht jedoch, dass die Materialausnutzung innerhalb dieser Lösungsvarianten die schlechteste wäre. Als zweite Lösungsvariante wurde der 3D-Druck betrachtet. Aufgrund der nahezu unbegrenzten geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten könnten komplexe Formen problemlos realisiert werden. Nachteilig ist jedoch, dass EN AW-7022 als Fertigungswerkstoff vorgeschrieben ist, welcher sich nicht für den 3D-Druck eignet. Damit erwies sich diese Lösungsvariante als nicht vorteilhaft. Schließlich blieb als dritte Variante die Fertigung mittels Gießen. Im Vergleich zu den anderen Lösungsvarianten bietet diese Methode die beste Werkstoffausnutzung. Ähnlich wie beim 3D-Druck wären zahlreiche Formgebungen möglich. Allerdings müssten die erforderlichen Gussformen zunächst hergestellt werden, was die Herstellungskosten deutlich erhöht. Zudem würden auf das Auswuchtsystem verschiedene Kräfte einwirken, darunter auch Zugkräfte, bei denen Gussstücke erfahrungsgemäß weniger vorteilhaft sind.

4.3.7 Einzelfunktion: Prüfmöglichkeiten

Bei der Prüfung sind die vorhandenen Gegebenheiten im Institut zu nutzen. Daher muss die Lösungsvariante, die in Kap. 4.5 als geeignet hervorgeht, einem Belastungstest am Prüfstand sowie einem Test mit dem vorhandenen Auswuchtmessgerät unterzogen werden.

4.4 Erstellen eines morphologischen Kastens

Auf Basis der in Kap. 4.3 aufgeführten Lösungsvarianten wurde der morphologische Kasten in Tab. 4.2 erstellt. Dazu wurden die Einzelfunktionen in einer Spalte aufgelistet und rechts davon die jeweiligen Lösungsvarianten zeilenweise eingetragen.

Tab. 4.2: Morphologischer Kasten

Teilfunktionen	Lösungsprinzipien/ Lösungsideen						
Verbindungskonzept	Klemmenlösung	Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtring	getrennte Innenschelle und Auswuchtring				
Tragstrukturausrichtung	encoderseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	propellerseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse				
Materialwahl Tragstruktur	EN AW-7022						
Tragstruktur- und Ausgleichgewichtsgestaltung	umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	umlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen	Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)			
Materialwahl Ausgleichgewichte	Zink	Stahl	Blei	Wolfram	Zinn	Messing	schon im Motor verwendeter Klebstoff
Fertigungstechnologien Tragstruktur	Drehen und Fräsen		3D-Druck	Gießen			
Prüfmöglichkeiten	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät						

4.5 Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten und Finden der Ideallösung

Mithilfe des morphologischen Kastens in Tab. 4.2 wurden die vier in Tab. 4.3 dargestellten Varianten gebildet. Diese stellen die für die Anwendung sinnvollsten Umsetzungsmöglichkeiten dar. Die genauen Pfade, welche die Entstehung der Varianten auf Basis des morphologischen Kastens zeigen, sind im Anhang in Tab. A.6 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass nicht jede Lösungsvariante einer Zeile jede Auswahlmöglichkeit in der folgenden Zeile zulässt. Dies trifft insbesondere auf die Kombination der Rechtecknut aus Wirkprinzip Nr. 4 und der damit verbundenen Lösungsvariante 1 des Wirkprinzips Nr. 5 zu, welche die Klebstoff-Variante darstellt. In Tab. A.6 ist diese als „Variante 1“ gekennzeichnet. Anschließend wurden die ermittelten Varianten einem Variantenvergleich unterzogen, der sich der in Abb. A.2 im Anhang dargestellten Bewertungsskalen bediente. Dort sind sowohl die Werteskala nach der Richtlinie VDI 2225 als auch die der Nutzwertanalyse aufgeführt.

Tab. 4.3: Übersicht Lösungsvarianten

Varianten Teilfunktionen	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Verbindungskonzept	Klemmenlösung	Klemmenlösung	Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtring	getrennte Innenschelle und Auswuchtring
Tragstrukturausrichtung	encoderseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	propellerseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse
Materialwahl Tragstruktur	EN AW-7022	EN AW-7022	EN AW-7022	EN AW-7022
Tragstruktur- und Ausgleichgewichtsgestaltung	umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	umlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen
Materialwahl Ausgleichgewichte	schon im Motor verwendeter Klebstoff	Zink	Stahl	Stahl
Fertigungstechnologien Tragstruktur	Drehen und Fräsen	Drehen und Fräsen	3D-Druck	Drehen und Fräsen
Prüfmöglichkeiten	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät

Die gefundenen Varianten wurden zunächst mithilfe der Werteskala nach der Richtlinie VDI 2225 bewertet. Die hierfür angewendeten Kriterien umfassten das Gewicht, den Raumbedarf in Bezug auf die Originalabmessungen der Rotorglocke, die Einfachheit von Herstellung, Montage, Handhabung und Wartung sowie die Prüfmöglichkeiten. Entsprechend Abb. A.2 wurden diese Kriterien mit Punktzahlen von 0 bis 4 bewertet, wobei 4 einer sehr guten und 0 einer unbefriedigenden Lösung entsprach. Bei Betrachtung von Tab. 4.4 zeigte sich, dass Variante 4 mit einem Wert von 0,75 am nächsten an die Ideallösung mit der maximalen Punktzahl von 1 herankam. Der Abstand zur nächstfolgenden Variante betrug 0,07. Eine ähnliche Rangfolge ergab sich auch aus Tab. 4.5. Hier lag Variante 4 mit 0,71 vor Lösungsvariante 3, mit einer Differenz von 0,02. Einziger Unterschied war die Skala: Beim Variantenvergleich nach Nutzwertanalyse entsprach die Bewertung sehr gut dem Maximalwert von 10. Abschließend wurden die Einzelfunktionen aus Tab. 4.1 als Bewertungskriterien herangezogen. Hier erfolgte die Punktevergabe erneut von 0 bis 4, jedoch bezogen auf Kosten (F) und Funktion (F) der jeweiligen Lösungsvariante. Die Ergebnisse der im Anhang aufgeführten Tab. A.7 bestätigten ebenfalls die Auswahl von Variante 4. Mit einer Punktzahl von 45 und einem Abstand von 2 Punkten zur nachfolgenden Variante 3 konnte Lösungsvariante 4 in allen Vergleichen überzeugen. Die ausgewählte Lösungsvariante ist in Tab. 4.6 nochmals aufgeführt.

Tab. 4.4: Variantenvergleich basierend auf der Wertskala „Richtlinie VDI 2225“

Lfd. Nr.	Technische Eigenschaft \ Lösungsprinzip	LP1	LP2	LP3	LP4	Ideallösung
1	Gewicht	1	1	2	3	4
2	Raumbedarf bzgl. Originalabmessungen der Rotorglocke	1	1	2	3	4
3	einfache Herstellung	2	3	2	3	4
4	einfache Montage	1	1	3	2	4
5	Einfache Handhabung	1	1	3	3	4
6	Prüfmöglichkeiten	4	4	4	4	4
7	einfache Wartung	1	1	3	3	4
Punkte		11	12	19	21	28
Technische Wertigkeit		0,39	0,43	0,68	0,75	1,00

Tab. 4.5: Variantenvergleich basierend auf der Wertskala „Nutzwertanalyse“

Lfd. Nr.	Technische Eigenschaft \ Lösungsprinzip	LP1	LP2	LP3	LP4	Ideallösung
1	Gewicht	2	2	5	7	10
2	Raumbedarf bzgl. Originalabmessungen der Rotorglocke	2	2	7	7	10
3	einfache Herstellung	4	4	5	7	10
4	einfache Montage	2	2	7	5	10
5	Einfache Handhabung	2	2	7	7	10
5	Prüfmöglichkeiten	10	10	10	10	10
6	einfache Wartung	2	2	7	7	10
Punkte		24	24	48	50	70
Technische Wertigkeit		0,34	0,34	0,69	0,71	1,00

Tab. 4.6: ausgewähltes Lösungsprinzip/ -Variante

Einzelfunktion	Variante 4
Verbindungskonzept	getrennte Innenschelle und Auswuchtring
Tragstruktureausrichtung	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse
Materialauswahl Tragstruktur	EN AW-7022
Tragstrukturanbringung- und Ausgleichgewichtsgestaltung	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen
Materialwahl Ausgleichgewichte	Stahl
Fertigungstechnologiene Tragstruktur	Drehen und Fräsen
Prüfmöglichkeiten	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät

5 Entwerfen (Entwickeln u. Gestalten der Baustruktur)

5.1 Modalanalyse

Auf Grundlage der in Kap. 3.5 eingeführten Modalanalyse wurden zunächst die Simulationen hinsichtlich der Findung von Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen bzw. der „Moden“ durchgeführt. Dazu folgte zunächst die Identifizierung der im Motor-Propeller-System in Rotation befindlichen Bestandteile, welche auf Eigenfrequenzen untersucht werden mussten. Zunächst wurden die Bauteile herausgeschrieben, welche über die Kugellager an der Antriebswelle befestigt im Stator frei drehbar waren. Diese wurden in der anschließenden Tab. 5.1 mit der Anzahl und dem in ANSYS dafür verwendeten Material genau aufgelistet.

Tab. 5.1: in ANSYS betrachtete Komponenten mit Anzahl und Material

Komponentenname	Anzahl	Material
BS-007-082-06-06-01-06 Gewindeleiste	4	Baustahl
NL5-Nord-Lock	12	Baustahl
Ganter Passschraube ISO 7379-5-M4-8	4	Baustahl
Zylinderschraube ISO 4762 M5x16 10.9	8	Baustahl
NL6-Nord-Lock	6	Baustahl
Zylinderschraube DIN 6912 M6x12 10.9	6	Baustahl
BS-007-082-06-01-03 Nabe V11 Aussenschelle	1	EN AW-7022
BS-007-082-06-01-03 Nabe V11 Innenschelle	1	EN AW-7022
Propellerblätter	2	
Elektromotor-Rotor-Glocke	1	Aluminiumlegierung
Magnetring	1	Baustahl
Magnetring-Schrauben	7	Baustahl
SOCKET COUNTERSUNK HEAD SCREW ISO ISO 10642 - M4 X 10 - 10N223087	6	Baustahl
WUERTH 035999900 groove nut DIN 981 Km 0 11H BLK223104	1	Baustahl
WUERTH 0385999800 SAFETY PLATE DIN 5406 MB 0 VORDEF BLK223103	1	Baustahl
Rotor1615-402 Rev1-0 Rotor Plain 1200223101 (Encoder)	1	robustes hart anodisiertes Aluminium

Die in Tab. 5.1 befindlichen Punkte von „Elektromotor-Rotor-Glocke“ bis einschließlich dem „Rotor 1615-402 Rev1-0 Rotor Plain 1200223101 (Encoder)“ wurden später im Hinblick auf die Berechnung der Massenzunahme nur noch als „Hacker QLS-T/QST-150-25/45 V2 Standard“ zusammengefasst genannt. Damit die verschiedenen Geometrien in ANSYS-Workbench analysiert werden konnten, mussten diese erst in Siemens NX modelliert und entsprechend der jeweiligen Konfiguration in stp-Dateien umgewandelt werden. Grundsätzlich wurde die Simulation in ANSYS-Workbench organisiert. Diese Workbench ist beispielsweise in Abb. 5.1 für den Ausgangszustand dargestellt. Zu Beginn der Arbeit mit ANSYS wurden die in Tab. 5.1 erwähnten Materialien mit ihren Eigenschaften im „Technische Daten“-Block definiert. Die Zuordnung zu den jeweiligen Bauteilen fand im „Modalanalyse“-Block statt. Das Laden der je nach Konfiguration betrachteten unterschiedlichen stp-Dateien wurde innerhalb des „Geometrie“-Blocks durchgeführt, in welchem die aus Siemens NX importierten stp-Dateien mithilfe der „Design Modeler“-Umgebung zunächst erstellt bzw. eingelesen werden mussten. Anschließend wurden die zwei für die Modalanalyse betrachteten Zustände jeweils mit der dafür vorgesehenen Zeile ähnlich wie in Abb. 5.1 mit den davor definierten Blöcken verbunden. Die dabei speziell betrachteten Zustände umfassten den nicht rotierenden Zustand sowie die Rotation bei $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ und $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$. Diese Zustände wurden ausgewählt, da $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ als Anfahrtdrehzahl und $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ als Maximaldrehzahl festgelegt sind. Die genauen Materialeigenschaften und deren Einstellungen in ANSYS wurden im Anhang in den Abb. A.3 bis Abb. A.6 aufgeführt. Diese umfassten normalen Baustahl, EN AW-7022, eine Aluminiumlegierung und ein robustes hart-anodisiertes Aluminium.

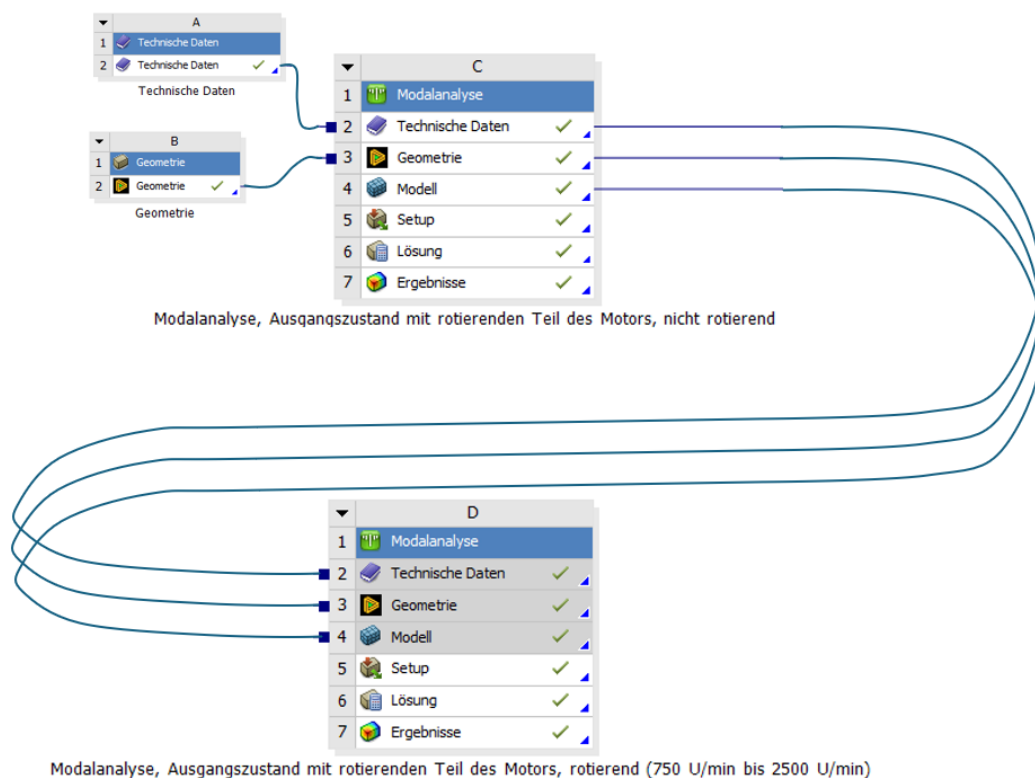


Abb. 5.1: ANSYS-Workbench-Struktur der Modalanalysen

5.1.1 Modalanalyse des ursprünglichen Systems

Der Ausgangspunkt für die weitere Modalanalyse war das in Abb. 5.2 dargestellte Modell. Zunächst waren die Propellerblätter als „externe Punkte“ im Zentrum der Innen- und Außenschelle, wie in Abb. 5.3 dargestellt, als gemeinsame Punktmasse zu definieren. Eigentlich sollte die Punktmasse über die dort zu sehenden MPC-Verbindungen mit der ganzen Innenfläche der Schellen verbunden sein, mit welchen auch die Propellerblätter später in Kontakt stehen würden. Aufgrund der daraus resultierenden sehr langen Rechenzeit wurde entschieden, nur die letzten Kanten vor dem Verlassen der Schellengeometrie und jene, welche vor den Bohrungen zur Einstellung der Blattneigung liegen, als Referenz für die MPC-Verbindungen zu verwenden. Laut [2] sind MPC-Verbindungen (= Multi-Point Constraints) Kontaktverbindungen zwischen berührenden Flächen zweier Körper. In diesem Fall zwischen dem externen Punkt und vier Kanten. Dabei werden je nach Einstellung die Objekte starr oder verformbar durch intern gebildete algebraische Gleichungen angebunden. In diesem Fall wurden sie als starr definiert.

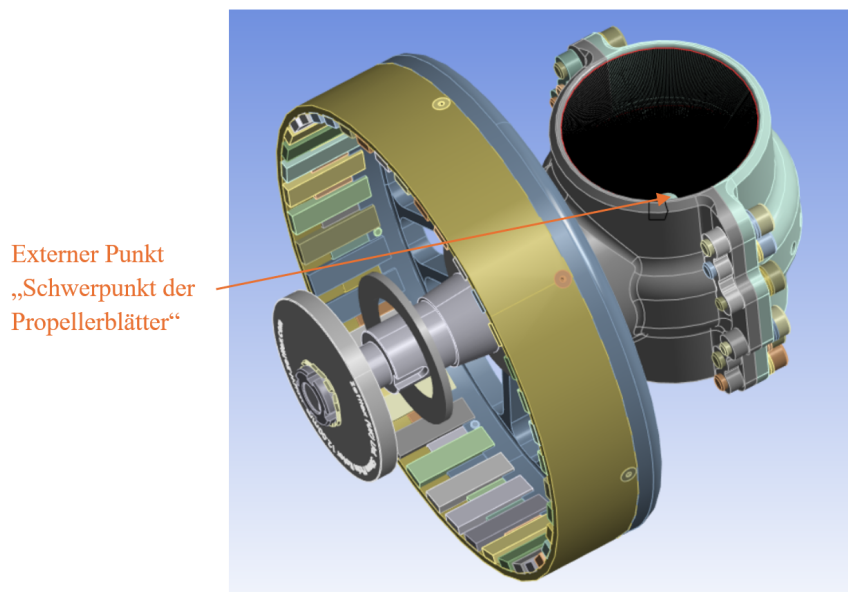


Abb. 5.2: Ausgangsmodell der Modalanalyse

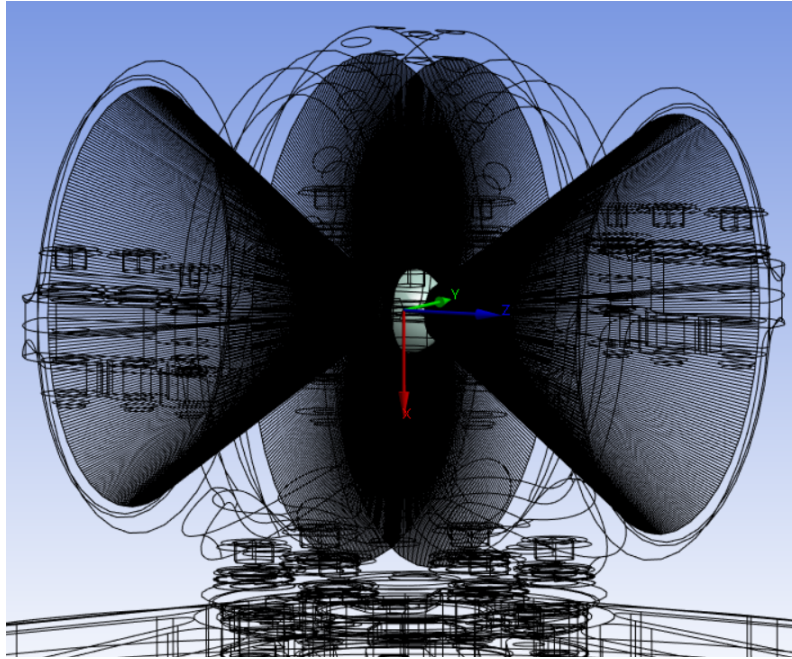


Abb. 5.3: Bezüge der MPC-Verbindungen für den Externen Punkt „Schwerpunkt beider Propellerblätter“

Aus dem Datenblatt [19] gingen die für die Einstellungen der Punktmasse nötigen Zahlenwerte hervor, wie z.B. 1,531kg, welches die Gesamtmasse beider Propellerblätter quantifizierte. Anschließend wurden die Massenträgheitsmomente entsprechend des Datenblattes für die jeweilige Achse festgelegt. Um die x-Achse, welche hierbei die Rotationsachse ist und durch welche auch die Symmetrieachse der Antriebswelle ging, weist das Propellerblattpaar ein Massenträgheitsmoment von $1,5 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ auf. Das gleiche Massenträgheitsmoment bestand auch um die y-Achse. Diese war senkrecht zur Rotationsachse der Baugruppe und der Pitch-Achse angeordnet. Die „Pitch“-Achse ist generell jene Achse, in welcher der Blattverdrehwinkel eingestellt wird und somit deren Längsachse justiert werden kann. Um diese Achse wurde ein Massenträgheitsmoment von $3000 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ dem Datenblatt [19] entnommen und in ANSYS definiert. Die genauen Einstellungen der Punktmasse „Externer Punkt“ sind im Anhang in Abb. A.7 ersichtlich. Gründe für den Verzicht des Einfügens der gesamten Propellergeometrie waren zum einen das alleinige Vorhandensein des Propellerblatts als Schalenkörper innerhalb verfügbarer stl-Dateien und die dafür zu umfangreiche Berechnungszeit, welche innerhalb ANSYS mit exakten Blattgeometrien einhergegangen wäre.

Die beiden Wälzlager, in denen die Antriebswelle gelagert ist, wurden mit ANSYS-Bearing-Elementen mithilfe einer Steifigkeitsmatrix modelliert. Es wurden dabei nur die Steifigkeiten in Translationsrichtung quer zur Welle (K11 und K22) berücksichtigt. K11 und K22 sind dabei Einträge einer intern in ANSYS verwendeten Steifigkeitsmatrix. Diese Randbedingungen samt Einstellungen wurden im Anhang in Abb. A.8 und Abb. A.9 aufgeführt. Die Bezugsflächen dieser Randbedingung sind wiederum in Abb. 5.4 ersichtlich. Diese umfassten jeweils die zylindrischen Flächen auf der Propeller- bzw. Encoderseite.

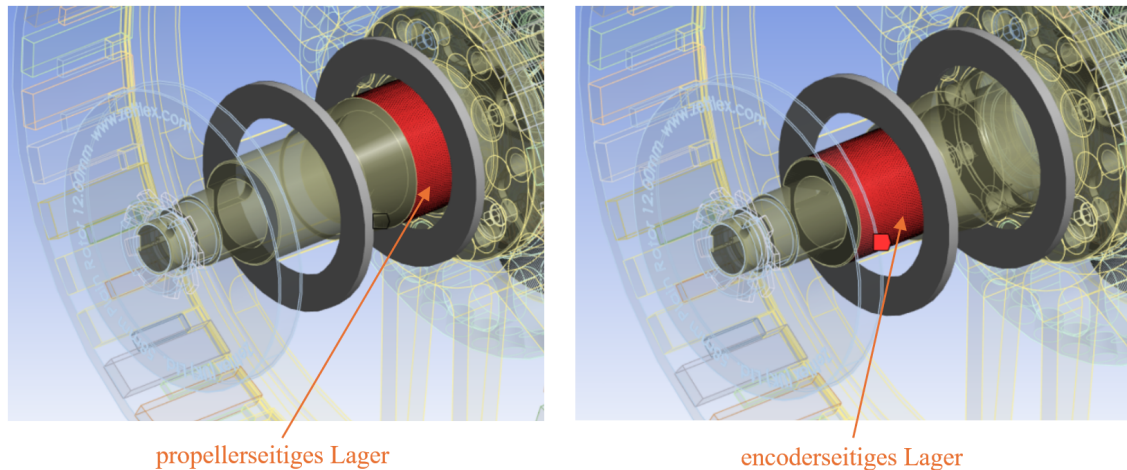


Abb. 5.4: Flächen der Lager-Randbedingungen

Als Nächstes musste das Netz definiert werden. Abb. 5.5 zeigt das Netz in einem Ausschnitt. Dabei wurde die Standardvernetzung mit Tetraedern und Hexaedern verwendet, wobei Hexaeder eher bei prismatischen und Tetraeder bei zylindrischen Geometriebereichen verwendet wurden. Die Elementgröße lag bei der Modalanalyse wiederum bei 1 mm und zerteilte das Modell in insgesamt 2.159.894 Elemente und 1.227.541 Knoten. Damit wurde eine Netzqualität erzeugt, welche die Eigenschwingformen in einer Qualität darstellte, die saubere und kantenlose Übergänge der Elemente und Verformungen ermöglichte. Genauere Angaben wurden in Tab. A.10 im Anhang aufgeführt, in welcher auch die restliche standardmäßige Netzeinstellung aufgeführt ist. Es folgten die zwei in der Modalanalyse zu betrachtenden Zustände.

Sowohl für die Eigenfrequenzberechnung im Stillstand als auch für die Berechnung der Eigenfrequenzen im Drehzahlbereich von 750 bis 2500 $\frac{U}{min}$ wurden identische Randbedingungen verwendet. Auf eine Fixierung des Systems in axialer Richtung und Rotationsrichtung wurde verzichtet. Der eigentliche Betriebsdrehzahlbereich begann aber erst ab 750 $\frac{U}{min}$. Der Anfang bei 0 war wichtig, um den kompletten Verlauf der Eigenfrequenzen bzw. Eigenfrequenzkurven im Campbell-Diagramm vom Beginn der Rotation abzubilden und auch schon frühere Schnittpunkte der Anregungsfrequenz mit diesen zu identifizieren. Die Stützpunkte der Analyse wurden im Anhang in Tab. A.13 hinterlegt und resultierten aus der Tatsache, dass die Punkte nur intuitiv von der Software verbunden werden. Schließlich sollten Fehler in der Interpretation des weiteren Verlaufes zwischen Punkten verhindert werden und mögliche Schnittpunkte zweier Eigenfrequenzen ersichtlich sein. Die eingestellten Analyseinstellungen für den rotierenden und nicht rotierenden Zustand wurden in Abb. A.11 und Abb. A.12 im Anhang dargestellt.

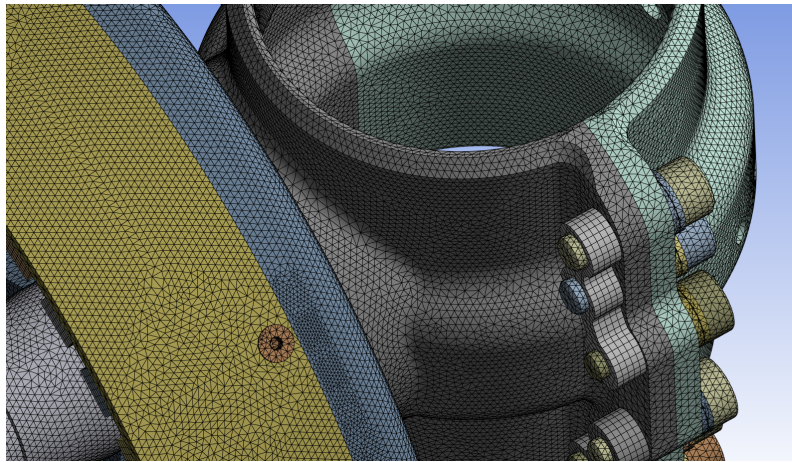


Abb. 5.5: Ausschnitt aus Vernetzung in der Modalanalyse

Um einen Ausgangszustand der Eigenfrequenzen ohne das später angeschlossene Auswuchtsystem als Referenz nutzen zu können, sind im Anhang von Abb. A.14 bis Abb. A.19 die Eigenfrequenzen der Originalbaugruppe im nicht rotierenden Zustand zu finden. Zusätzlich wurden dort auch in den Abb. A.20 bis Abb. A.31 für den rotierenden Zustand einmal die Eigenfrequenzen für $750 \frac{U}{min}$ und einmal für $2500 \frac{U}{min}$ dargestellt. Da es sich bei diesen Bildern um Standbilder handelt, wurden im nicht rotierenden Zustand die Bewegungsarten visualisiert. Diese Bewegungen der Eigenschwingformen tauchen in den rotierenden Zuständen der Originalbaugruppe als auch in den späteren Kombinationen mit dem Auswuchtsystem wieder auf. Dabei variieren lediglich die Eigenschwingformen der ersten beiden Starrkörpereigenfrequenzen (ersten beiden Moden) in der Reihenfolge der Schwingungsbilder. Dies geschieht sowohl im nicht rotierenden als auch im rotierenden Zustand in beiden Drehzahlen vom Ausgangszustand bis einschließlich der Kombinationen. Der Rest folgt der gleichen Reihenfolge. Wenn auch die Schwingformen in der Intensität mit steigender Drehzahl ansteigen. Die Zahlenwerte der Eigenfrequenzen des nicht rotierenden als auch des rotierenden Zustandes wurden folglich in Tab. 5.2 zahlenmäßig zusammengefasst, damit später ein Vergleich mit der Kombination aus Originalbaugruppe und Auswuchtsystem möglich war. Damit die Abstände zwischen Anregungsfrequenz und den verschiedenen Eigenfrequenzen im Ausgangszustand analysiert werden konnten, ist in Abb. 5.6 das Campbell-Diagramm dargestellt. Frequenz 1 und 2 waren dabei Starrkörpereigenfrequenzen, da die Rotation und die Axialbewegung nicht gefesselt waren. Typisches Verhalten der Eigenfrequenzkurven sind Gleich- und Gegenlauf. Als kritisch würde sich eventuell der Schnittpunkt der Anregungsdrehzahl mit dem Gegenlauf (3 RW) erweisen.

Tab. 5.2: Eigenfrequenztabelle der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender und rotierender Zustand

nicht rotierend		rotierend, n=750 [1/min]		rotierend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
1	0,0	1	0,0	1	0,0
2	0,0	2	0,0	2	0,0
3	51,1	3	49,7	3	40,3
4	199,8	4	205,3	4	252,5
5	520,1	5	519,0	5	510,1
6	585,5	6	586,8	6	598,1

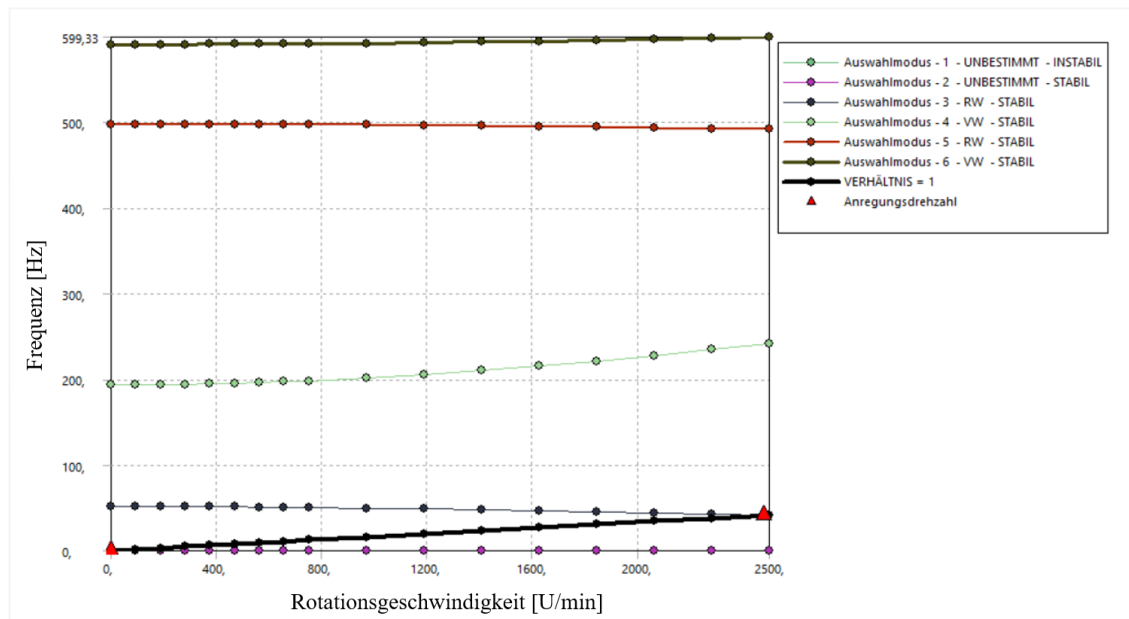


Abb. 5.6: Campbell-Diagramm der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand

5.1.2 Modalanalyse des verschiedenen einzelnen Auswuchtsysteme

Im nächsten Schritt wurde die in Kap. 4 erhaltene Version des Auswuchtsystems in drei unterschiedlichen Größen mit den für die Sicherung der zwei Bestandteile notwendigen Sicherungselementen einer Modalanalyse unterzogen. Die Sicherungselemente umfassten hier die NL6-Nord-Lock und die Zylinderschraube DIN 6912 M6×12 10.9. Dafür wurden nahezu die gleichen Randbedingungen verwendet wie auch schon bei der rotierenden Originalbaugruppe. Einziger Unterschied waren die teilweise anders definierten Flächen. Außerdem mussten die Zustände minimal umbenannt werden, da es sich nicht um exakt die gleichen Randbedingungen handelte, auf welchen die Modalanalyse in dieser Betrachtung basiert. Der bei der Originalbaugruppe und später bei der Kombination dieser mit dem Auswuchtsystem definierte „nicht rotierende“ Zustand wird einmalig als „an die Antriebswelle angeschlossener“ Zustand bezeichnet. Der rotierende Zustand bekam wiederum innerhalb dieser Einzelbetrachtung der Auswuchtsysteme die Bezeichnung „im Ganzen drehend“. Die Randbedingungen sind in Abb. 5.7 zusammengefasst dargestellt und definieren den an der Antriebswelle angeschlossenen Zustand mit der fixierten Lagerung an der Stelle, welche die Antriebswelle berührt. Ebenfalls ersichtlich ist die zylindrische Lagerung, welche den im Ganzen drehenden Zustand definiert und sich auf die Fläche bezieht, welche als axiale Positionierung in der Antriebswelle dient und die Innenfläche der Antriebswelle berühren würde.

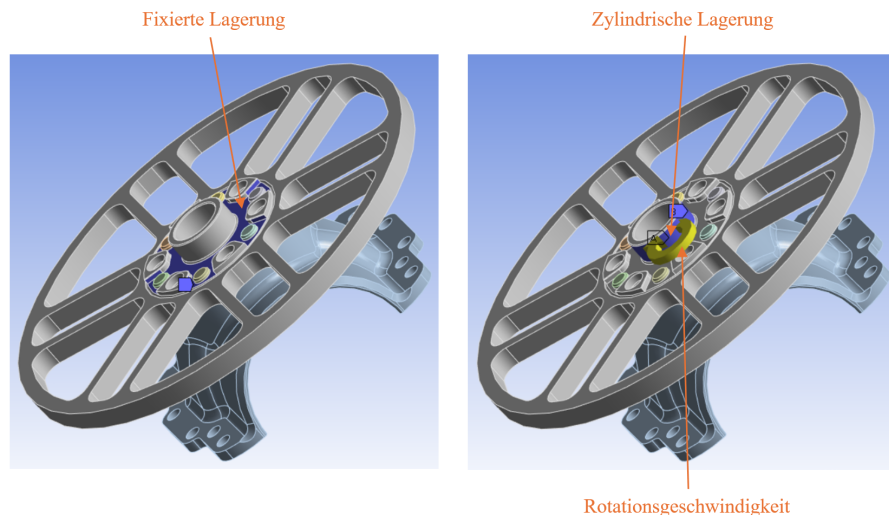


Abb. 5.7: Randbedingungen des an die Antriebswelle angeschlossenen und in der Gesamtheit drehenden Zustandes des einzelnen Auswuchtsystems

Die Kugellagerdefinitionen, welche in der Modalanalyse zur rotierenden Originalbaugruppe Anwendung gefunden hatten, konnten bei der Einzelbetrachtung des Auswuchtsystems nicht verwendet werden, da diese innerhalb der Simulation gar nicht am Auswuchtsystem angebracht waren und die Auswuchtsysteme lediglich untereinander verglichen werden sollten. Um weiter Material einzusparen und die Speichen aufgrund der zunächst filigranen Gestalt von Version 1 zu einer stabileren zu überführen, wurden noch zwei weitere Grobentwürfe erstellt. Als Erstes erfolgte eine Durchmesserreduktion von ursprünglich 150 mm auf 112 mm und anschließend auf 90 mm, wobei in die dritte Anpassung noch zusätzlich Bohrungen eingelassen wurden. Diese sollten als Platzhalter für die in Zukunft an der Stelle eingelassenen Gewindebohrungen dienen. Als Ausgleichsgewichte würden dann, wie zum Ende in Kap. 4 festgelegt, Gewindestifte verwendet werden. Die drei Versionen wurden in Abb. 5.8 in der Ansicht aus Richtung des später angebrachten Propellers nebeneinandergestellt. Da die Seite, welche mit der Antriebswelle angeschlossen werden muss, immer gleich bleibt, sind diese Ansichten im Anhang in Abb. A.32 aufgeführt.

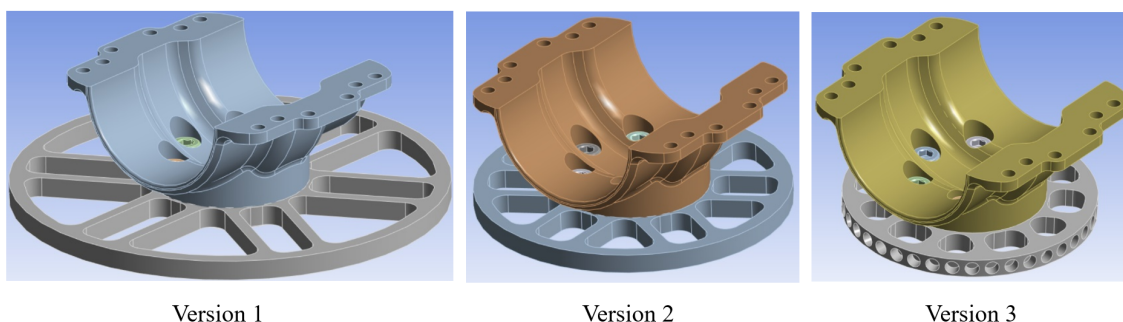


Abb. 5.8: Versionsübersicht der einzelnen Auswuchtsysteme

Die verwendeten Analyseereinstellungen sind ebenfalls im Anhang in Abb. A.33 und Abb. A.34 beispielsweise für den Auswuchtring mit 90 mm Außendurchmesser aufgeführt. Bei den anderen Versionen variierten lediglich die Höchstanzahl der zu suchenden Moden. Um vergleichbare Eigenschwingformen zu erhalten, wurden bei der dritten Version in den Analyseereinstellungen im nicht rotierenden Zustand 19 und im rotierenden 22 als Zahl für die Höchstanzahl zu suchender Moden eingestellt. Bei der ersten Version, bei welcher der Auswuchtring noch einen Durchmesser von 150 mm hatte, lag die Einstellung im nicht rotierenden Zustand bei 6 und im rotierenden bei 20 Moden. Die zweite Version wurde im nicht rotierenden Zustand auf 15 und im rotierenden auf 20 Moden untersucht. Auch hier wurden die Eigenfrequenzen für alle Zustände in Tabellen zusammengefasst. Um die Eigenfrequenzen überhaupt vergleichen zu können, wurden zunächst die Eigenschwingformen untersucht. Mit der Orientierung am ersten Auswuchtsystem und der dortigen Reihenfolge der Eigenschwingformen wurden die jeweiligen ähnlichen Formen der beiden folgenden Auswuchtsysteme passend zu diesen gesucht. Da die Auswuchtsysteme in ihrer Gestalt stark abweichen, funktionierte dies an manchen Stellen nur bedingt, da nicht alle Eigenschwingformen erkennbar waren. Folglich wurden die Tabellen des zweiten und dritten Auswuchtsystems in den Moden und dazugehörigen Frequenzen soweit angepasst, dass sie der Schwingformen-Reihenfolge des ersten Auswuchtsystems entsprachen.

Tab. 5.3: Eigenfrequenztafel des ersten Auswuchtsystems, 150 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand

an Antriebswelle angeschlossen		in Gesamtheit drehend, n=750 [1/min]		in Gesamtheit drehend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
1	1209,2	1	978,8	1	952,3
2	1209,2	2	1003,1	2	1031,0
3	1262,4	3	1235,0	3	1234,9
4	1413,3	4	1331,8	4	1300,5
5	1413,4	5	1356,3	5	1331,8
6	1566,1	6	1406,0	6	1466,200

Tab. 5.4: Eigenfrequenztafel des zweiten Auswuchtsystems, 112 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand

an Antriebswelle angeschlossen		in Gesamtheit drehend, n=750 [1/min]		in Gesamtheit drehend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
6	3191,0	1	1486,3	1	1479,5
5	3141,7	2	1569,0	2	1575,9
7	3237,0	7	3028,6	7	3028,2
8	3453,8	14	5438,0	10	3451,0
9	3464,5	12	4965,7	14	5438,1
10	4290,6	13	5039,3	9	3262,4

Tab. 5.5: Eigenfrequenztafel des dritten Auswuchtsystems, 90 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, an Antriebswelle angeschlossener und im ganzen drehender Zustand

an Antriebswelle angeschlossen		in Gesamtheit drehend, n=750 [1/min]		in Gesamtheit drehend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
9	9107,6	1	1665,0	1	1662,4
10	9325,8	2	1800,6	2	1803,3
11	9387,9	8	6252,3	8	6252,3
13	9547,8	6	3218,2	16	10402,0
12	9508,3	11	7149,6	6	3218,3
16	12179,0	18	10600,0	18	10653,0

Der Vergleich der Tab. 5.3, Tab. 5.4 und Tab. 5.5 zeigte deutliche Unterschiede hinsichtlich der Reihenfolge der verschiedenen Eigenschwingformen. Die erste Variation der Modenreihenfolge kam daher, dass zunächst das Auswuchtsystem 2 mit Auswuchtsystem 1 verglichen wurde. Die Betrachtung der Spalte des an die Antriebswelle angeschlossenen Zustandes ergab dabei, dass nicht nur die Moden in einer abweichenden Reihenfolge aufgetreten sind, sondern auch der Frequenzbereich, in welchem sich diese befinden, deutlich angestiegen ist. So lag die erste Eigenfrequenz des ersten Ausgangssystems im nicht rotierenden Zustand bei 1209,2 Hz und beim zweiten Auswuchtsystem 1981,8 Hz darüber. Dies entspricht dem sechsten Mode des zweiten Systems. Im Zustand, in welchem sich das Auswuchtsystem jeweils als Gesamtheit dreht, zeichnete sich in Bezug auf die Lage der Eigenfrequenzen ein ähnliches Verhalten ab. Die dort vorliegende erste Eigenfrequenz des rotierenden Zustandes bei $750 \frac{U}{min}$ stieg zwar vom 978,8 Hz auf 1486,3 Hz an, war jedoch ebenfalls als erste Eigenfrequenz zu finden. Diese Übereinstimmung der Reihenfolge lag noch bei der zweiten Eigenfrequenz vor. Die Frequenzen des zweiten Auswuchtsystems lagen in jedem Fall über denen des ersten Auswuchtsystems. Die Übereinstimmung endete ab der dritten Eigenfrequenz. Dieses Verhalten begründete sich daraus, dass der Auswuchtring vom ersten zum zweiten Auswuchtsystem deutlich geschrumpft ist, genauer gesagt um einen Radius von 19 mm. Dadurch wurde der Auswuchtring nicht als erstes angeregt, sondern eher die Innenschelle. Der Vergleich von Auswuchtsystem 2 und 3 zeigte ein ähnliches Verhalten. Auch hier befanden sich die Eigenfrequenzen als Folge der Radiusverkleinerung in deutlich höheren Bereichen. So lag die Eigenfrequenz im an die Antriebswelle angeschlossenen Zustand des dritten Auswuchtsystems, welche beim ersten Auswuchtsystem die sechste war, mit 9107,6 Hz an neunter Stelle der Modereihenfolge. Wiederum zeigte sich beim Vergleich des drehenden Zustandes, dass die ersten beiden Eigenfrequenzen die gleiche Reihenfolge hatten. Jedoch lagen auch hier die Eigenfrequenzen des dritten Auswuchtsystems über denen des zweiten Auswuchtsystems, wenn auch der Anstieg im in der Gesamtheit drehenden Zustand wieder etwas geringer war als im angeschlossenen Zustand. Spätestens ab der dritten Eigenfrequenz war in der Reihenfolge der Eigenfrequenzen des dritten Auswuchtsystems eine Abweichung zu erkennen. Das Verhalten zeigt sich am besten in den Abbildungen Abb. A.35 bis Abb. A.37 im Anhang, in welchen gezielt die ersten Eigenfrequenzen der jeweiligen Version des Auswuchtsystems im angeschlossenen Zustand gezeigt wurden. Dabei fiel das eben beschriebene Verhalten bezüglich der als erstes schwingenden Bauteile deutlich auf. Bekräftigt wird dies durch die Vergleichsdiagramme in Abb. A.38 bis Abb. A.40 des Anhangs. Durch die Betrachtung der Punkte der Eigenfrequenzen der einzelnen Auswuchtsysteme wird die nicht mehrmals erwähnte Ungleichheit der Systeme sichtbar. Letztendlich wurde der Vergleich der Aus-

wuchtsysteme auf Basis der Eigenschwingformen untereinander fallen gelassen. Die Betrachtung der im Anhang zu findenden Campbell-Diagramme zeigt, dass selbst wenn die Eigenschwingformen unterschiedliche Anfangsschwingformen haben und die Reihenfolge abweicht, diese trotzdem meist über den eigentlichen Anregungsfrequenzen liegen. Die Campbell-Diagramme sind in Abb. A.41 bis Abb. A.43 des Anhangs zu finden.

5.1.3 Modalanalyse der Kombinationen der Auswuchtsysteme mit dem ursprünglichen System

Viel ausschlaggebender war der Vergleich der Eigenfrequenzen zwischen den verschiedenen Kombinationen der angeschlossenen Zustände des Auswuchtsystems mit der rotierenden Originalbaugruppe. Natürlich durfte nicht vernachlässigt werden, dass die Innenschelle nun Teil des jeweiligen Auswuchtsystems war und somit durch eine neue Version ersetzt wurde. Sämtliche Randbedingungen aus dem Ausgangszustand wurden dafür übernommen. Die Analyseeinstellungen sind im Anhang in Abb. A.44 und Abb. A.45 beispielsweise für die erste Kombination ersichtlich. Die Kombinationen sind in Abb. 5.9 dargestellt.

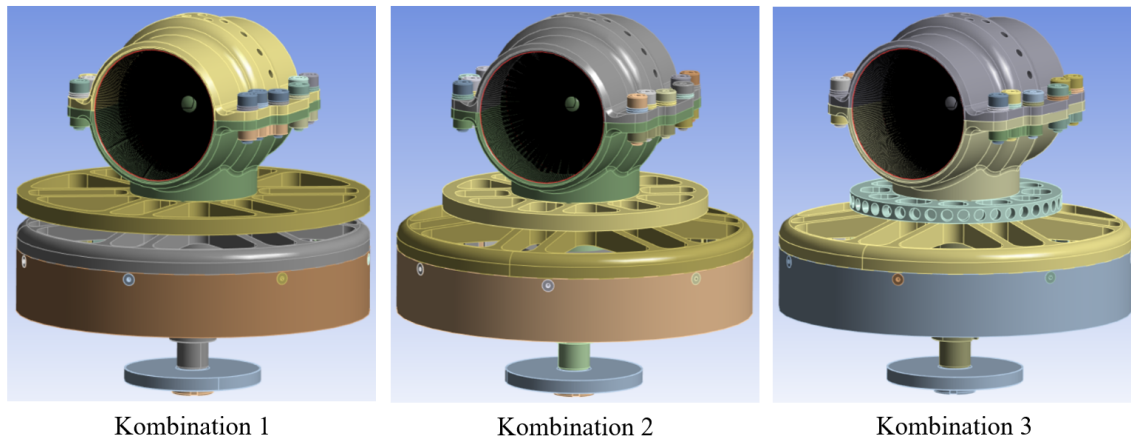


Abb. 5.9: Kombinationsübersicht der drei angeschlossenen Auswuchtsysteme

Die Eigenfrequenztabellen, welche im Stil denen in Kap. 5.1.1 und Kap. 5.1.2 entsprachen, wurden im Anhang von Tab. A.8 bis Tab. A.10 aufgeführt. Zum besseren Vergleich wurden diese umstrukturiert. Folglich wurden, wie schon bei den einzelnen Auswuchtsystemen, zunächst die Eigenfrequenztabellen verglichen. Dabei wurde aus Tab. 5.6 bis Tab. 5.8 entnommen, dass die Eigenfrequenzen aller drei Kombinationen untereinander, sowohl nicht rotierend als auch rotierend ($750 \frac{U}{\min}$ und $2500 \frac{U}{\min}$), neben der Übereinstimmung der Eigenschwingform-Reihenfolge bis einschließlich der dritten Eigenfrequenz nahezu die gleichen Zahlenwerte aufweisen. Erst ab der vierten Eigenfrequenz fand eine Variation der Zahlen vor dem Komma zwischen diesen Frequenzen statt. Zum Beispiel bei Betrachtung der vierten Eigenfrequenzen der ersten und zweiten Kombination im rotierenden Zustand mit $750 \frac{U}{\min}$. Während sich in diesem Zustand der Wert der ersten Kombination mit $750 \frac{U}{\min}$ mit einer Differenz von 10,6 Hz unter dem der zweiten Kombination befand, lag diese beim Vergleich der nächsthöheren Eigenfrequenz zwischen Kombination 1 und 2 schon bei 21,6 Hz. Beim Vergleich identischer Punkte bei Kombination 2 und 3 lagen die vierten Eigenfrequenzen des rotierenden Zustandes mit $750 \frac{U}{\min}$ 10 Hz auseinander. Beim Vergleich der nächsthöheren Eigenfre-

quenzen beider Kombinationen im gleichen Zustand ergab sich eine Differenz von 16,7 Hz. Dabei war jeweils ein kleiner Abfall der Frequenz zur dritten Kombination hin sichtbar, welcher bei Kombination 1 zu 2 noch anstieg. Die Frequenzbereiche der Eigenschwingformen blieben jedoch größtenteils in gleichen Größenordnungen von Kombination zu Kombination, wenn die Eigenfrequenzen zustandsweise verglichen wurden.

Tab. 5.6: Eigenfrequenz-Vergleichstabelle der nicht rotierenden Zustände von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen

Mode	nicht rotierend			
	rotierende Originalbaugruppe	Kombination 1	Kombination 2	Kombination 3
	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	51,1	51,7	51,7	51,6
4	199,8	193,2	203,5	193,7
5	520,1	497,8	519,8	502,8
6	585,5	590,8	593,3	590,8

Tab. 5.7: Eigenfrequenz-Vergleichstabelle der rotierenden Zustände bei $750 \frac{U}{min}$ von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen

Mode	rotierend, n=750 [1/min]			
	rotierende Originalbaugruppe	Kombination 1	Kombination 2	Kombination 3
	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	49,7	50,4	50,4	50,3
4	205,3	198,2	208,8	198,8
5	519,0	497,2	518,8	502,1
6	586,8	591,6	594,4	591,6

Tab. 5.8: Eigenfrequenz-Vergleichstabelle der rotierenden Zustände bei $750 \frac{U}{min}$ von rotierender Originalbaugruppe und den Kombinationen

Mode	rotierend, n=2500 [1/min]			
	rotierende Originalbaugruppe	Kombination 1	Kombination 2	Kombination 3
	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]	Frequenz [Hz]
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	40,3	41,2	41,2	41,1
4	252,5	242,0	255,1	242,9
5		491,6	510,7	496,1
6	598,1	599,3	605,1	599,8

Bei Betrachtung der Vergleichskurven in Abb. A.46 bis Abb. A.48 im Anhang, welche die Zustände der drei verschiedenen Kombinationen unter sich verglichen haben, fiel mit bloßem Auge kein wirklicher Unterschied auf. Auch im Anhang zu finden sind die Abb. A.49 bis Abb. A.57. Diese zeigen wiederum den Vergleich der Zustände zwischen der Originalbaugruppe, dem jeweiligen einzelnen Auswuchtsystem und deren Kombinationen mit der Originalbaugruppe, wobei der einzige Unterschied darin besteht, dass der Abstand der Eigenfrequenzen des einzelnen Auswuchtsystems im Vergleich zum ursprünglichen und montierten Zustand und der Kombination mit diesem desto mehr anstieg, je weiter der Radius verkleinert wurde. Dieses Ergebnis konnte als plausibel angesehen werden, da sich die Masse des Systems durch Anbringen des Auswuchtrings nur um rund 2 % ändert und die gesamten Trägheitsmomente sich ebenfalls nur geringfügig ändern durften.

Das Thema Massenzunahme wird am Ende dieses Kapitels nochmals genauer beleuchtet. Verglichen werden dafür die jeweils kleinsten Werte für die Eigenfrequenzen im nicht rotierenden Zustand der einzelnen Auswuchtsystemvarianten. Damit muss hier kurz nochmal auf die Tab. 5.3, Tab. 5.4 und Tab. 5.5 verwiesen werden. Diese stiegen von anfänglichen Frequenzbereichen um 1209,2 Hz bis 1566,1 Hz auf 9107,6 Hz bis 12179,0 Hz an. Die Eigenfrequenzen im rotierenden Zustand liegen eher darunter. Schließlich war der Einfluss der verschiedenen Auswuchtsysteme auf die rotierende Originalbaugruppe im Vergleich der Campbell-Diagramme zu bewerten. Dafür wurden die Abb. 5.10, Abb. 5.11 und Abb. 5.12 genauer analysiert. In Abb. 5.10 konnte je ein Schnittpunkt der Anregungsfrequenz, welche aus der Betriebsdrehzahl hervorgeht, und der zweiten bzw. dritten Eigenfrequenz ermittelt werden. Die ersten beiden Eigenfrequenzen lagen so nah an der Abszisse, dass es sich bei diesen nur um die Starrkörper-Eigenfrequenzen handeln musste. Diese gingen lediglich aus der Definition der Lager hervor, als Beschreibung einer möglichen axial schwingenden Eigenfrequenz. Die Lager wurden, wie in den im Anhang befindlichen Lagereinstellungen in Abb. A.8 und Abb. A.9 ersichtlich, nicht in axialer Richtung gesperret. Es wurde für diese keine Steifigkeit definiert. Sonst würden diese Starrkörpereigenfrequenzen nicht auftauchen. Des Weiteren wurde keine Dämpfung definiert und hatte somit den Wert 0. Um die Schnittpunkte mit der dritten Eigenfrequenz der ersten Kombination bewerten zu können, musste der Kurvenverlauf der dritten Eigenfrequenz genauer betrachtet werden. Diese Schnittpunktabelle ist in Tab. A.59 des Anhangs zu finden. Aus dieser ging hervor, dass es sich bei der dritten Eigenfrequenz um einen sog. „Rotation West“-Punkt handelt, also an dieser Stelle die dritte Eigenfrequenz eine Torsionsmode vollführt. Da es sich um einen anisotropen Rotor handelt, welcher eben nicht nur eine Scheibe ist, wird trotz der Gegenläufigkeit der geschnittenen Mode diese bei der Schnittpunkt-Drehzahl von $2479 \frac{U}{\min}$ im Fall der ersten Kombination angeregt. In Flugrichtung blickend würde der Rotor rechtsläufig rotieren. Die Eigenschwingform, welche hier geschnitten wurde, ist in Abb. A.62 im Anhang dargestellt und taumelt mit den Schellen linksläufig um die Rotationsachse. „VW“ würde für eine translatorische Biegung in Richtung einer Achse stehen. Damit stellte die Anbringung des ersten Auswuchtsystems an die rotierende Originalbaugruppe ein Problem dar, da durch die entgegengesetzten Richtungen von Eigenschwingform und Anregungsschwingform eine Erhöhung der Auslenkungsamplitude wahrscheinlich war. Deswegen wurde anschließend der Durchmesser aufgrund schon genannter Gründe zunächst auf 112 mm reduziert. Das in Abb. 5.11 abgebildete Campbell-Diagramm und die Schnittpunktabelle in Abb. A.60 visualisieren ein mit der Durchmesserreduktion verbundenes Verschwinden des ersten Schnittpunktes der Anregungsfrequenz mit der zweiten Starrkörper-Eigenfrequenz. Lediglich der Schnittpunkt mit der dritten Eigenfrequenz verblieb. Dieser Wert hat sich wiederum um $0,6 \frac{U}{\min}$ gesenkt. Spätestens nach der Analyse des Campbell-Diagramms in Abb. 5.12 für die Kombination mit Auswuchtsystem 3 und dem erneut gesunkenen Abszissenwert des Schnittpunktes mit der Eigenfrequenz 3 aus Tab. A.61 bestätigte sich die mögliche Gefährdung, welche aber schon vor dem Anbringen des Auswuchtsystems am Ausgangszustand vorlag. Ersichtlich ist dies durch Abb. A.58, wobei hier der erste Schnittpunkt mit der ersten Starrkörper-Eigenfrequenz vorlag und die dritte Eigenfrequenz bei $2441 \frac{U}{\min}$ geschnitten wurde. Somit muss diese Stelle in Zukunft genauer betrachtet werden. Dazu kommt, dass der eigentliche Betrieb aktuell nur bis $750 \frac{U}{\min}$ durchgeführt wird. Somit wird dieser Fall beim Testen höherer Drehzahlen im Hinblick auf das Auswuchtsystem betrachtet werden. Diese sollten dann in der Nähe der Maximaldrehzahl liegen, um das Verhalten beim Durchlaufen dieses Punktes

zu sehen. Beim Vergleich zwischen dem System ohne bzw. mit Auswuchtsystem 3 wurde jedoch innerhalb der Campbell-Diagramme ein Anstieg des Schnittpunktes mit der dritten Eigenfrequenz festgestellt (vgl. Abb. 5.6 und Abb. 5.12, sowie Tab. A.58 und Tab. A.61). Dieser ist insgesamt von $2241,1 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ auf $2473,6 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ angestiegen. Durch die sinkende Tendenz dieses Schnittpunktes innerhalb der Betrachtungen der Kombinationen 1 bis 3 wird dieser wahrscheinlich im Drehzahlbereich bleiben und bedarf genauerer Untersuchungen beim Betrieb im höheren Drehzahlbereich.

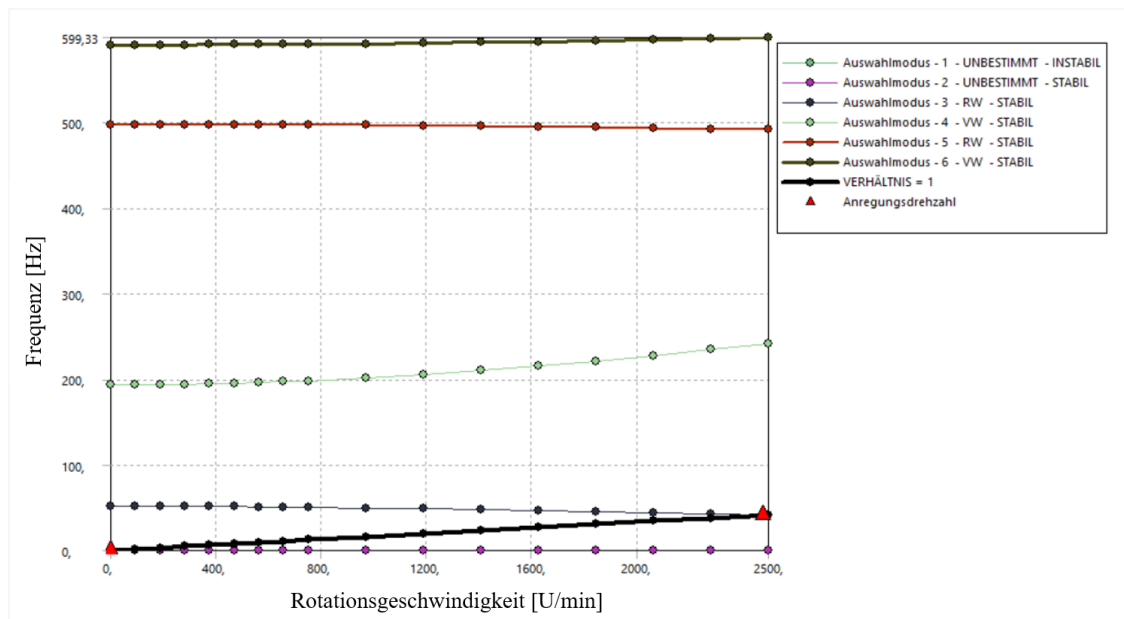


Abb. 5.10: Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 150 mm Auswuchtring, rotierender Zustand

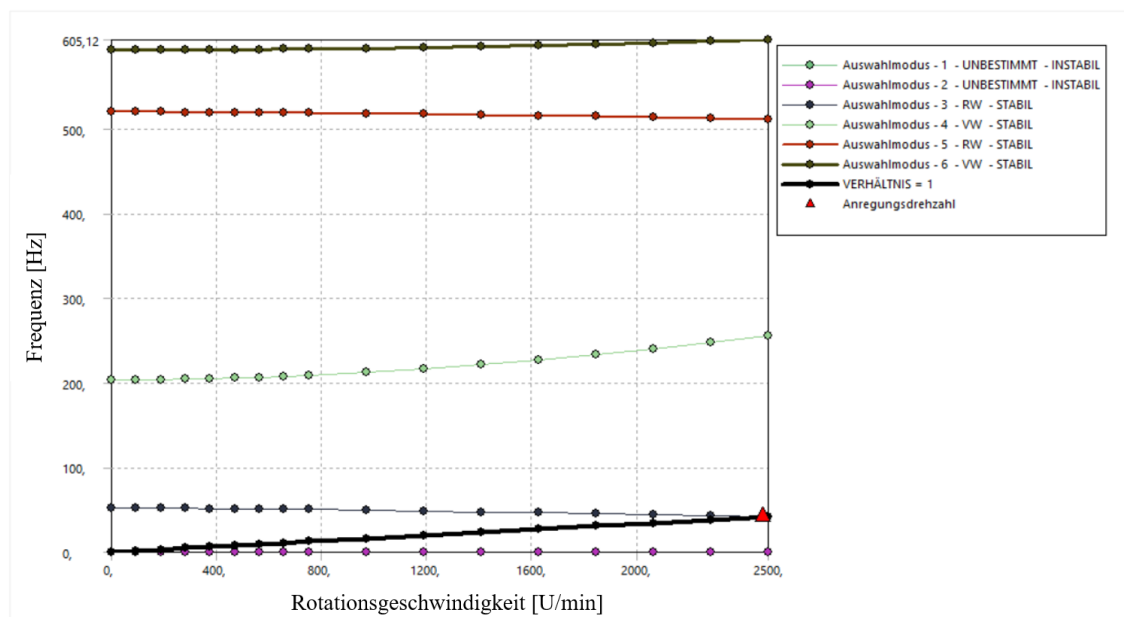


Abb. 5.11: Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 112 mm Auswuchtring, rotierender Zustand

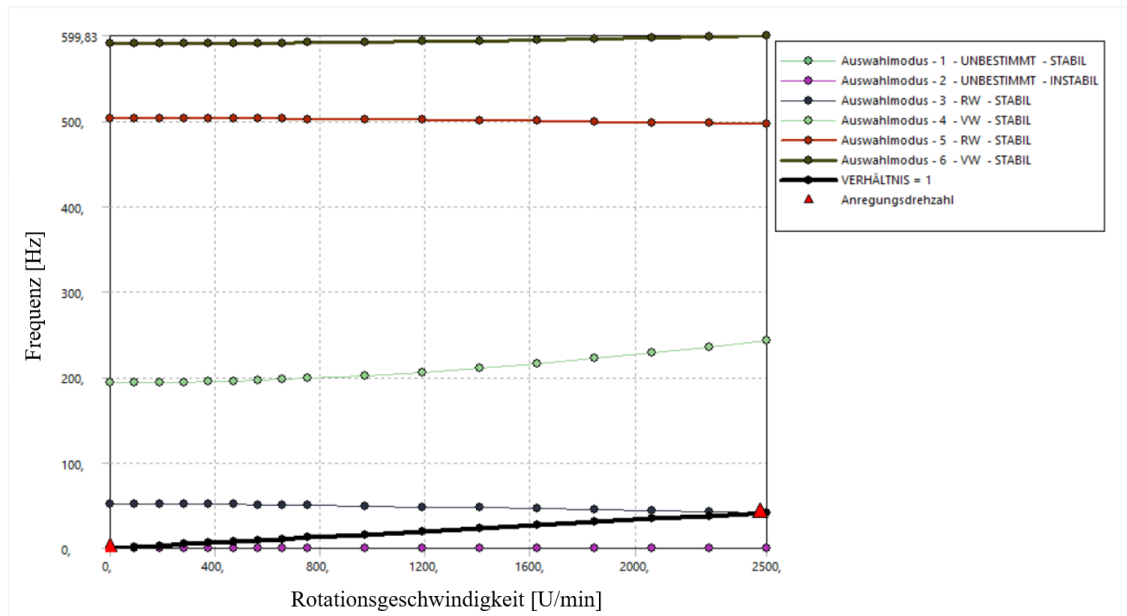


Abb. 5.12: Campbell-Diagramm der Kombination mit Auswuchtsystem 1, 90 mm Auswuchtring, rotierender Zustand

5.2 Betrachtung des einhegehenden Massenzuwachs

Für die weitere Abschätzung einer möglichen Verwendung musste nun die prozentuale Massenzunahme der drei Auswuchtsysteme bezüglich des Motor-Propeller-Systems und der eigentlichen originalen BS-007-082-06-01-06-Nabe V11 Innenschelle berechnet werden. Dabei war es wichtig, ob eines der drei Auswuchtsysteme bereits die Wunschforderung aus Tab. 2.1 des Kap. 2.2.6 der maximal 5 % mehr Gewichtszunahme bezüglich des Motor-Propeller-Systems erfüllt. Notwendig für die Berechnung ist die korrekte Gesamtmasse. Diese ist im Anhang in Tab. A.11 basierend auf der Anzahl der Bauteile als Grundlage für den prozentualen Massenzuwachs berechnet worden. Die Ausgangsmasse lag bei rund 4242,3 g.

Das ursprüngliche System bestand aus dem Motor und den zwei angebrachten Propellerblättern. Deswegen waren auch die Anschlusselemente des Propellers an den Motor Teil der Massenzuwachs-Betrachtung. Die Berechnung der exakten, mit der Wunschforderung im Einklang befindlichen prozentualen Gewichtszunahme wurde ebenfalls in Tab. A.11 aufgeschlüsselt.

Da die Festforderung bei maximal 5 % Gewichtszunahme lag und die durch die dritte Version berechnete Massenzunahme bei 1,646 % beträgt, wurde diese Festforderung ebenfalls erfüllt. Im Anhang sind zudem die Massenzunahmen durch die anderen zwei Auswuchtsysteme in Tab. A.12 und Tab. A.13 aufgeführt. Dabei wurde ersichtlich, dass zwar alle Auswuchtsysteme die Festforderung erfüllen. Im Hinblick auf mögliche Spannungen in den Streben des Auswuchtrings, welche in dieser Arbeit nicht betrachtet wurden, bot es sich aber an, filigrane Bestandteile zu reduzieren. Deswegen wurde der Durchmesser kontinuierlich verkleinert, um die Streben des Auswuchtringes nicht zu schmal werden zu lassen. Der Vollständigkeit halber wurde die prozentuale Massenzunahme im Vergleich von neuer Schelle mit Schrauben und Auswuchtring im Vergleich mit der Ausgangs-Innenschelle in Tab. A.15 im Anhang aufgeführt. Logischerweise ist der Anteil der Massenzunahme bei geringerer Bezugsmasse kleiner. In dieser Betrachtung würde die Verwendung von

Version 3 die Festforderung nicht erfüllen. Da aber in Tab. 2.2.6 über eine Gewichtszunahme bezüglich des ursprünglichen Systems gesprochen wird, konnte gesagt werden, dass die Wunschforderung 7 damit erfüllt wurde.

5.3 Harmonische Analyse

Anschließend zu den in Kap. 5.1 durchgeführten Modalanalysen werden in diesem Kapitel die Vorgehensweisen und Ergebnisse der harmonischen Analyse vorgestellt. Betrachtet wurde hierbei lediglich die dritte Variante des Auswuchtsystems mit dem Auswuchtring von 90 mm Durchmesser. Ziel war es zu prüfen, ob mit dem Anbringen von Ausgleichsgewichten an dem neu entworfenen Auswuchtsystem, im Speziellen am Auswuchtring, das Auswuchten möglich ist oder noch etwaige Anpassungen notwendig sind. Die dafür einheitliche Workbench ist beispielsweise für den nicht ausgewuchteten Zustand der großen und der kleinen Unwucht zusammen in Abb. 5.13 dargestellt.

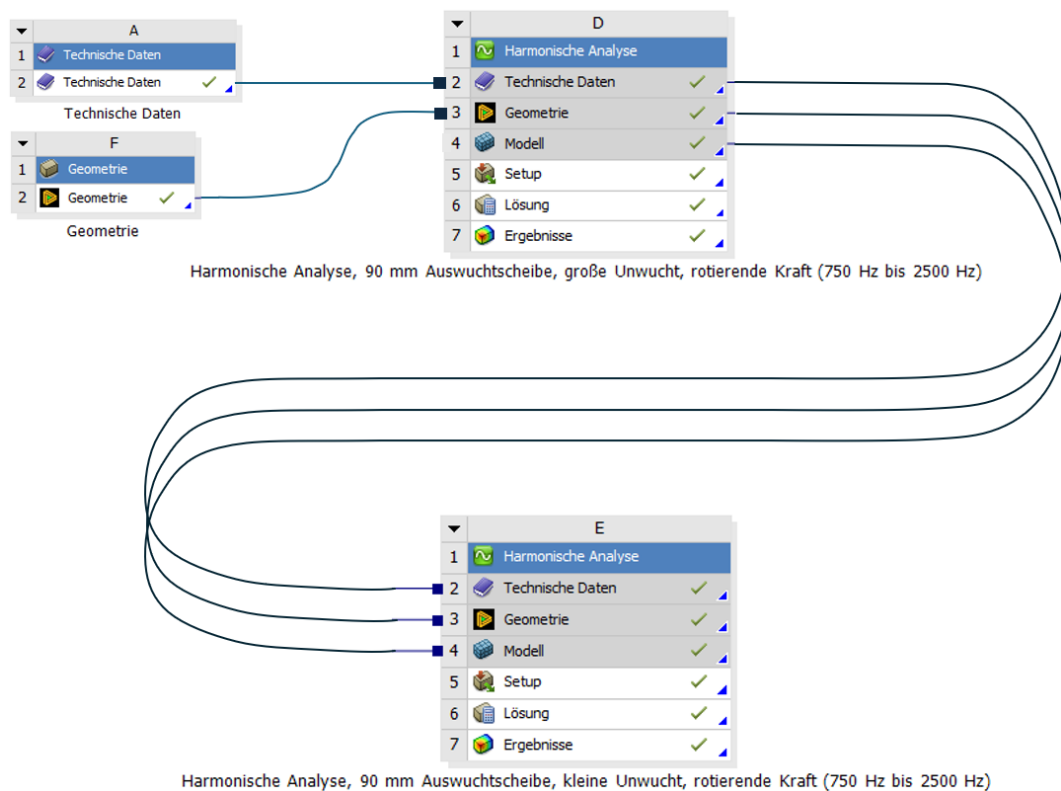


Abb. 5.13: ANSYS-Workbench-Struktur der Harmonische Analyse, nicht Ausgewuchteter Zustand

Innerhalb des „Harmonische Analyse“-Tools waren dafür erneut bestimmte Randbedingungen zu setzen. Die globalen Randbedingungen wurden nur soweit verändert, dass der externe Punkt „Schwerpunkt der Propellerblätter“ zwar weiterhin mit den gleichen Kanten wie in der Modalanalyse verbunden war, aber nun mit globalen Koordinaten beaufschlagt wurde. Ebenfalls gleich blieben die Massenträgheit im dafür definierten Koordinatensystem entsprechend der Werte in [19]. Die globalen Koordinaten galt es entsprechend der im Anhang befindlichen Abb. A.63 einzustellen. Der zu diesem Zeitpunkt betrachtete Zustand ist in Abb. 5.14

ersichtlich Außerdem wurde — wie schon bei der Modalanalyse — ohne Dämpfung gerechnet, da sich diese nur in der Resonanz ausgewirkt hätte. Alle anderen Amplitudenwerte in ausreichender Entfernung zur Resonanz waren dementsprechend aussagekräftig.

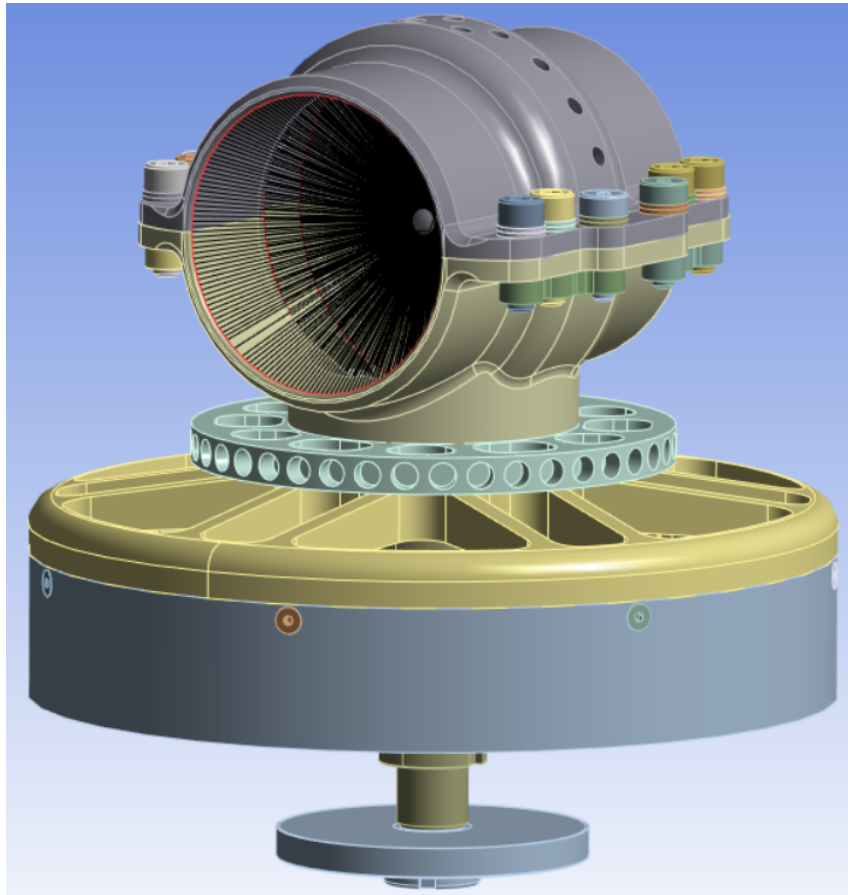


Abb. 5.14: Übersicht des aktuell betrachteten Models

Die Randbedingungen, welche zudem noch verändert wurden, waren das Netz, externe Punkte für die Anbindung von Komponenten, welche als zentrale Anbindung der rotierenden Kraft dienen sollten, und die für die harmonische Analyse spezifischen Randbedingungen. Die Materialzuweisungen, Koordinatensysteme sowie Kontakte und Lager wurden aus der Modalanalyse übernommen. Damit die Berechnungen nicht allzu lange dauerten, wurde die Geometrie anstatt mit 1 mm-Elementen wie in der Modalanalyse mit 2 mm-Elementen vernetzt. Schließlich mussten zwischen den Ergebnissen auch noch Anpassungen durchgeführt werden. Ein Beispielausschnitt des Netzes ist in Abb. 5.15 dargestellt, und die genauen Netzeinstellungen befinden sich im Anhang in Abb. A.64. Die Vernetzungsgeometrien sind dabei gleich zu denen in der modalen Analyse gewesen.

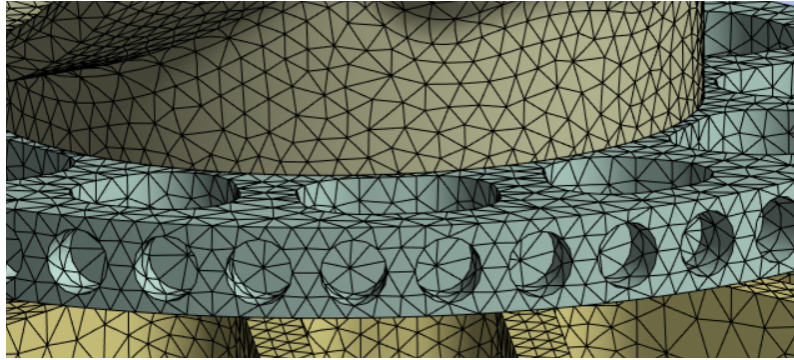


Abb. 5.15: uAsschnitt aus Vernetzung in Harmonischen Analyse

Zu Beginn der harmonischen Analyse wurde zunächst der unausgewuchtete Zustand für die aus den Datenblättern [4], [5] und [6] zu entnehmende größte und kleinste Unwucht erstellt, um die beiden aktuellen Extremfälle zu untersuchen. Dafür musste der erstellte externe Punkt „Schwerpunkt der Propellerblätter“ an eine Komponente angebunden werden. Deren genaue Einstellungen sind im Anhang in Abb. A.65 zu finden. Anschließend erfolgte die Definition der „Rotierenden Kraft“ innerhalb des Strukturbaums im „Harmonischen Analyse“-Teil. Mithilfe der vorher erstellten Randbedingungen wurde die „Rotierende Kraft“ wie in Abb. 5.16 im Überblick basierend auf der in Gl. 5.1 und Gl. 5.2 berechneten großen und kleinen Masse für einen umlaufenden Radius der Unwucht von 254 mm eingestellt. Dieser Radius entspricht dem Längsabstand des Schwerpunktes eines Propellerblattes zum Schwerpunkt der Propellerblätter im Zentrum der Schellen laut dem Datenblatt [20]. Anzumerken ist die leichte visuelle Phasenverschiebung dieses Punktes zur Längsachse der Propellerblätter, welche sich in ANSYS nicht verhindern lässt. Wichtig war es, innerhalb der Einstellung der rotierenden Kraft an die mit dem externen Punkt „Schwerpunkt der Propellerblätter“ angebundene Komponente als Position der rotierenden Kraft zu definieren. Zusätzlich diente der externe Punkt dieser Komponente selbst zur Definition der „Klick-Punkt“-Einstellung. Dabei war auch hier, wie bei der „Rotationsgeschwindigkeit“-Randbedingung in der Modalanalyse, eine Fläche so auszuwählen, dass die Rotationsrichtung der realen Drehrichtung entspricht, also in Propellerrichtung rechtsläufig. Ein Überblick dieser Randbedingungen am Modell ist in Abb. 5.16 dargestellt. Die genauen Einstellungen hinsichtlich der rotierenden Kräfte wurden im Anhang in den Abb. A.66 und Abb. A.67 für die aus den Datenblättern [4] bis [6] hervorgehende größte und kleinste Unwucht aufgeführt.

$$\begin{aligned}\vec{U} + u_a \vec{r}_a &= 0 \\ 644,39 \text{ g} \cdot \text{mm} + u_{Rand,max} \cdot 254 \text{ mm} &= 0 \\ u_{Rand,max} &= \frac{644,39 \text{ g} \cdot \text{mm}}{254 \text{ mm}} \\ u_{Rand,max} &\approx 2,537 \text{ g}\end{aligned}$$

Gl. 5.1: Berechnung der für die maximale Unwuchtmasse notwendigen Randbedingung[22]

$$\begin{aligned}\vec{U} + u_a \vec{r}_a &= 0 \\ 0,039 \text{ g} \cdot \text{mm} + u_{Rand,min} \cdot 45 \text{ mm} &= 0 \\ u_{Rand,min} &= \frac{0,039 \text{ g} \cdot \text{mm}}{254 \text{ mm}} \\ u_{Rand,min} &\approx 1,535 \cdot 10^{-3} \text{ g}\end{aligned}$$

Gl. 5.2: Berechnung der für die minimale Unwuchtmasse notwendigen Randbedingung[22]

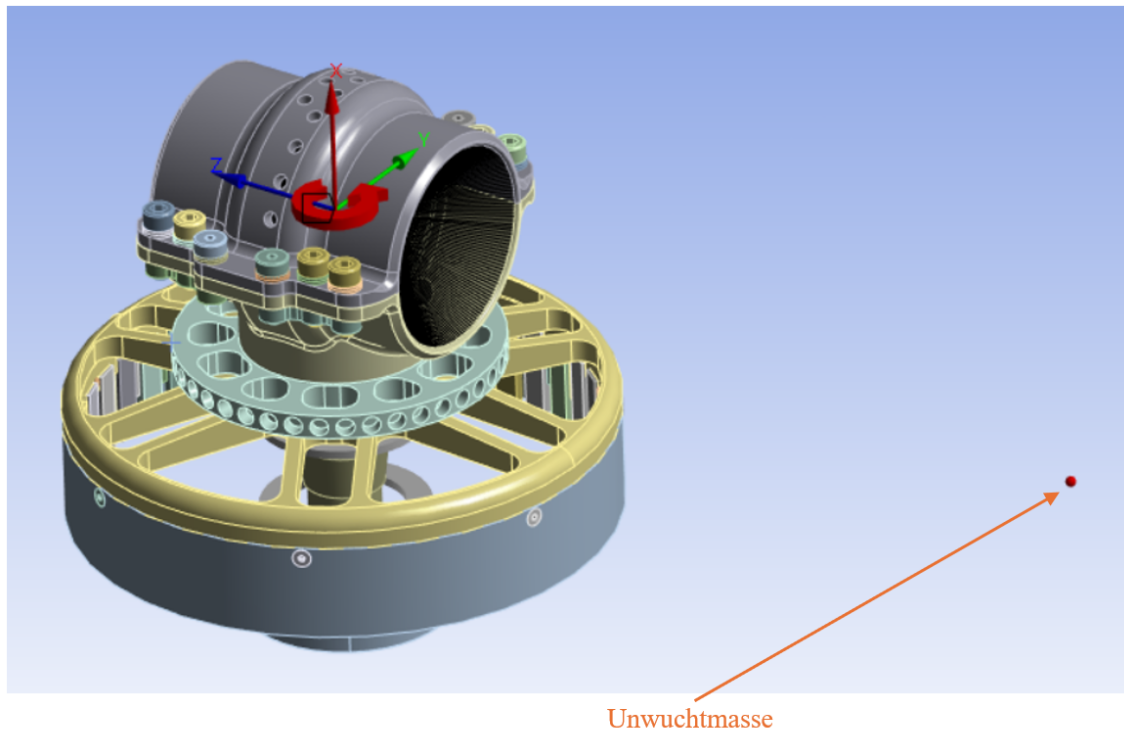


Abb. 5.16: Übersicht der Anordnung der rotierenden Kraft als Unwucht

Damit eine Auswuchtung innerhalb der Randbedingungen definiert werden konnte, mussten nun weitere externe Punkte erstellt, Komponenten angebunden und mit globalen Koordinaten im Zentrum der Rotation definiert werden. Diese umfassten einmal einen Punkt im Zentrum des Auswuchtringes und einen leicht in positiver x-Richtung bezüglich des Schwerpunktes der Propellerblätter verschobenen Punkt. Die Verschiebung des zweiten Punktes resultierte aus der Tatsache, dass in ANSYS zwei rotierende Kräfte nicht an den gleichen externen Punkt bzw. dieselbe Komponente gekoppelt werden können. Dieser sollte später für die Ausgleichs-Unwuchtmasse in der gleichen Ebene wie der Schwerpunkt dienen. Somit wurde bewusst ein geringer Abstand eingestellt, um Berechnungen durchführen zu können. Die jeweiligen MPC-Verbindungen dieser Komponenten sind in Abb. 5.17 und Abb. 5.18 mit ihren Bezugskanten dargestellt, und die genauen globalen Koordinaten sowie die Einstellungen der Komponenten befinden sich in Abb. A.68 bis Abb. A.71 im Anhang.

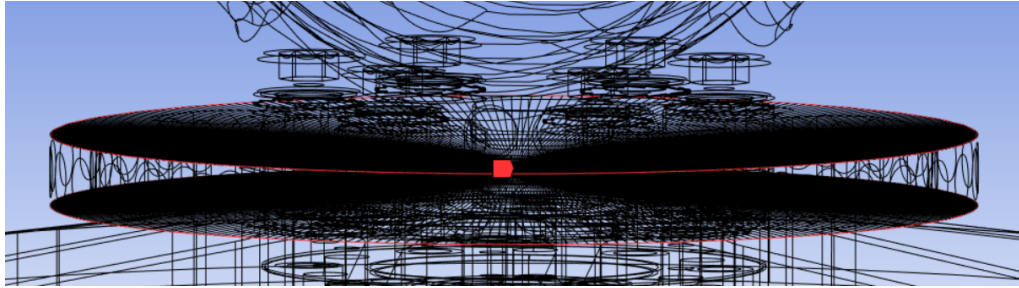


Abb. 5.17: MPC-Verbindung im Auswuchtring für Ausgleichsunwucht

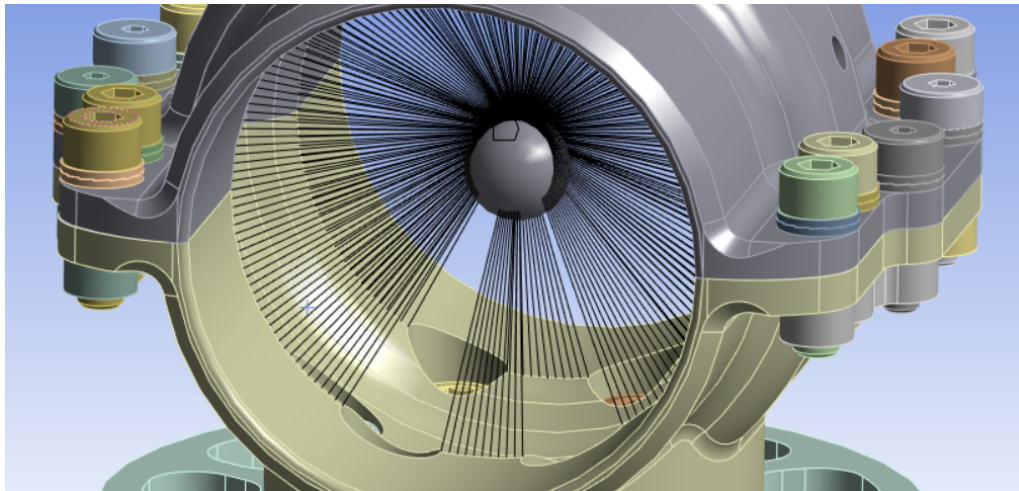


Abb. 5.18: MPC-Verbindung leicht über Schwerpunkt der Propellerblätter für Ausgleichsunwucht

Zunächst mussten die Analyseinstellungen der harmonischen Analysen jeweils entsprechend Abb. A.72 im Anhang gewählt werden. Innerhalb dieser Einstellungen wurden unter anderem der betrachtete Frequenzbereich von 0 bis 50 Hz und die Lösungsintervalle auf 25 eingestellt.

Schließlich wurde einmal die größere und einmal die kleinere Unwucht systematisch auf Basis der Handrechnungen in ANSYS implementiert. Für die Auswuchtung der großen Unwucht waren laut Gl. 5.1 14,32 g auf einem Durchmesser von 45 mm notwendig. In ANSYS wurde dies mit je einer weiteren „rotierenden Kraft“ implementiert, welche exakt 180° phasenverschoben zur ursprünglichen „rotierenden Kraft“ der Unwuchtmasse lag. Dafür dienten die neu definierten externen Punkte und Komponenten. In ANSYS mussten diese in den Einstellungen der rotierenden Kraft jeweils in der Position dieser definiert werden, und der jeweilige externe Punkt diene als „externer Punkt für Klick-Punkt“-Einstellung. Auf Basis von Gl. 5.2 wurde dies für die kleine Unwucht wiederholt. Dabei betrug die Masse 0,0009 g. Die Einstellungen für den Auswuchtversuch in der Ebene des Auswuchtringes und in jener, welche leicht über dem Schwerpunkt der Propellerblätter lag, wurden im Anhang in Abb. A.73 und Abb. A.74 für die große Unwucht sowie für die kleine Unwucht in Abb. A.75 und Abb. A.76 dargestellt. Dazu gehörte auch der Rotationsradius der Kraft von 45 mm. In Abb. 5.19 ist die in ANSYS implementierte Auswuchtung in der Ebene des Auswuchtringes und in Abb. 5.20 die des Auswuchtens in einer der Unwuchtebene nahe gelegenen Ebene dargestellt. Evident ist auch die angesprochene Rotationsrichtung der Unwucht und der Ausgleichsunwucht in Richtung der Rotordrehung. In ANSYS wurden die Eingaben richtig eingegeben und berücksichtigt, jedoch stellt ANSYS in Abb. 5.19 Abb. 5.20 diese Phasenverschiebung nicht dar.

$$\begin{aligned}\vec{U} + u_a \vec{r}_a &= 0 \\ 644,39 \text{ g} \cdot \text{mm} + u_{a,max} \cdot 45 \text{ mm} &= 0 \\ u_{a,max} &= \frac{644,39 \text{ g} \cdot \text{mm}}{45 \text{ mm}} \\ u_{a,max} &\approx 14,32 \text{ g}\end{aligned}$$

Gl. 5.3: Berechnung der maximal einzustellenden Unwuchtmasse [22]

$$\begin{aligned}\vec{U} + u_a \vec{r}_a &= 0 \\ \vec{U} + u_a \vec{r}_a &= 0 \\ 0,039 \text{ g} \cdot \text{mm} + u_{a,min} \cdot 45 \text{ mm} &= 0 \\ u_{a,min} &= \frac{0,039 \text{ g} \cdot \text{mm}}{45 \text{ mm}} \\ u_{a,min} &\approx 0,0009 \text{ g}\end{aligned}$$

Gl. 5.4: Berechnung der minimal einzustellenden Unwuchtmasse [22]

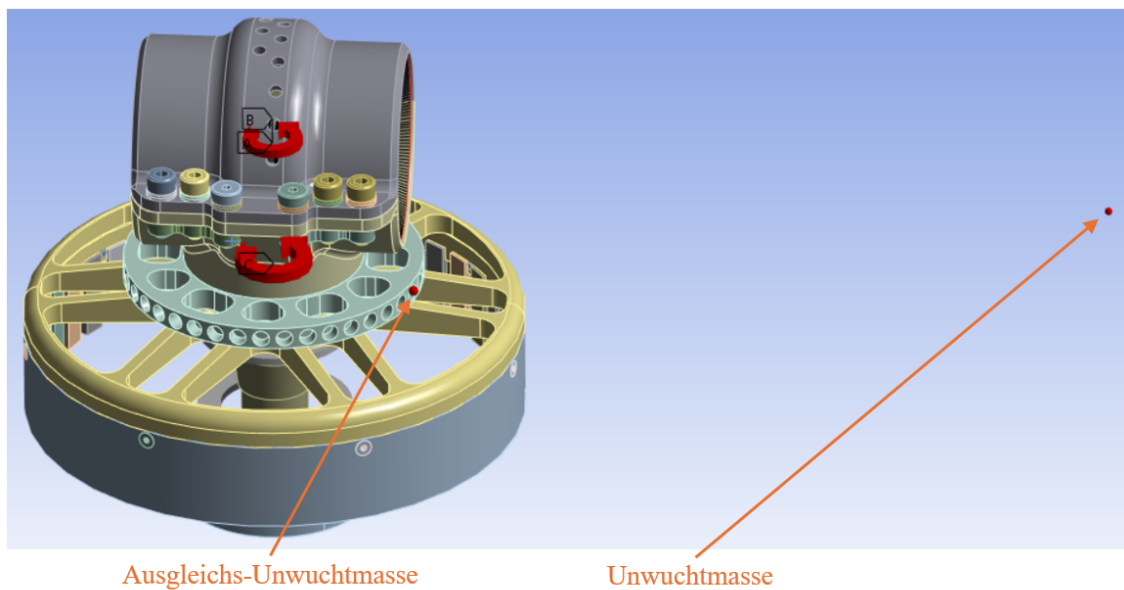


Abb. 5.19: Übersicht des Auswuchtversuchs in Auswuchtring-Ebene

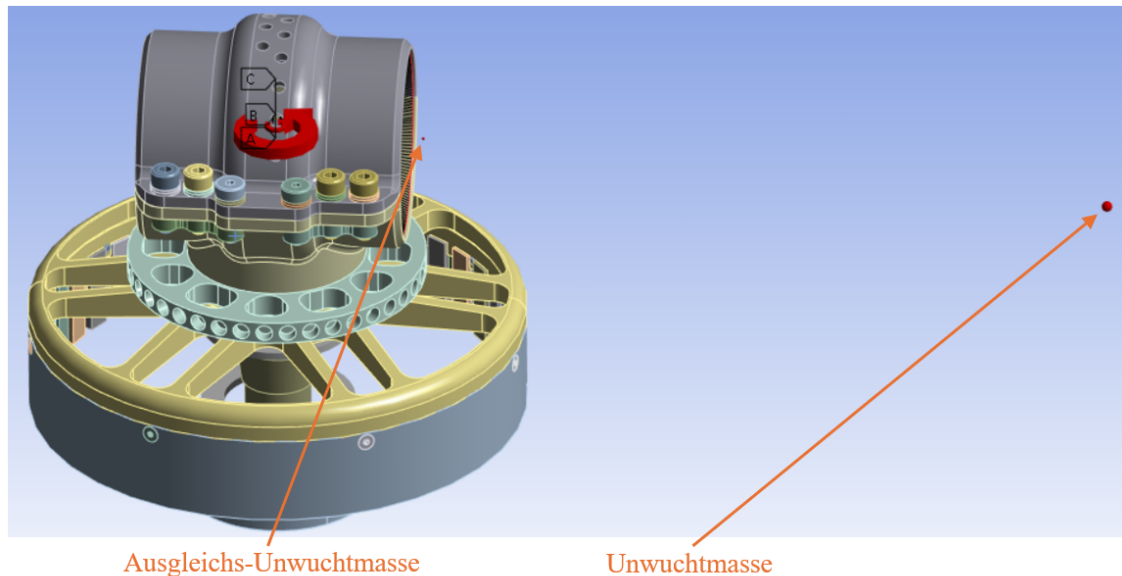


Abb. 5.20: Übersicht des Auswuchtversuchs in Unwucht-Ebene

Folglich wurde der Frequenzgang des externen Punktes „Schwerpunkt der Propellerblätter“ betrachtet. Dazu wurden die Einstellungen am Beispiel der y-Achse entsprechend der im Anhang befindlichen Abb. A.77 so gewählt, dass die Analyse des Schwerpunktes der Propellerblätter bezüglich seiner Verschiebung im gleichnamigen lokalen Koordinatensystem untersucht werden konnte. Dieses Koordinatensystem wurde aus der Modalanalyse übernommen und befand sich im Zentrum der Schellen. Es wurden anschließend die Veränderungen des Frequenzgangs innerhalb der dortigen y- und z-Achse vom unausgewuchteten zum Zustand nach den Auswuchtversuchen analysiert. Die x-Achse wurde vernachlässigt, da diese die Rotationsachse darstellt und die größten Auslenkungen in den zu dieser senkrechten Achsen vermutet wurden. Hierfür mussten die Zustandsveränderungen vom nicht ausgewuchteten Zustand zum Zustand nach der Auswuchtung in der Ebene des Auswuchtringes und in der Unwuchtebene verglichen werden. Beide betrachteten Achsen sind im nicht ausgewuchteten Zustand für die große Unwucht in Abb. 5.21 und für die kleine Unwucht in Abb. 5.23 ersichtlich. Die Ergebnisse der Auswuchtversuche der beiden Unwuchten sind in sowohl in der Ebene des Auswuchtringes in Abb. 5.22 und Abb. 5.24 als auch für den Versuch in der Ebene nahe der Unwucht in Abb. 5.25 und Abb. 5.26 dargestellt. Die genaueren Differenzen und die Frequenzgänge nach dem Auswuchtversuch in den beiden Ebenen sind in Abb. A.78 bis Abb. A.85 im Anhang zu finden. Wichtig beim Vergleich war lediglich, dass nicht die Resonanzstelle betrachtet wurde, da dort aufgrund der fehlenden Dämpfung keine quantitativen Aussagen möglich gewesen wären. Deswegen wurde hier 50 Hz gewählt. Zunächst wurde die Differenz der Zustände bei großer Unwucht nach Auswuchtversuch in der Auswuchtring-Ebene verglichen, wobei eine Differenz von $6,3 \cdot 10^{-3}$ mm in Richtung der y-Achse und $1,6 \cdot 10^{-3}$ mm in der z-Achse gemessen wurde. Kleiner war, wie zu erwarten, die Differenz nach dem Auswuchtversuch der kleinen Unwucht in der gleichen Ebene, da diese so klein ist, dass eine Auswuchtung schwieriger werden würde. Dabei ergibt sich lediglich eine Differenz von $3,8 \cdot 10^{-7}$ mm in Richtung der y- und $9,9 \cdot 10^{-8}$ mm in Richtung der z-Achse. Die genauen Werte der Frequenzgang-Amplituden sind in Tab. 5.9 nochmal zusammengefasst.

Tab. 5.9: Tabelle der Frequenzgang-Amplituden bzgl. Schwerpunkt beider Propellerblätter vor und nach der Auswuchtung in Auswuchtring- und Unwuchtebene

	Unwucht=644,34 g*mm		Unwucht=0,039 g*mm	
	Frequenzgang-Amplitude in Y-Achse bzgl. Schwerpunkt beider Propeller bei 50 Hz [mm]	Frequenzgang-Amplitude in Z-Achse bzgl. Schwerpunkt beider Propeller bei 50 Hz [mm]	Frequenzgang-Amplitude in Y-Achse bzgl. Schwerpunkt beider Propeller bei 50 Hz [mm]	Frequenzgang-Amplitude in Z-Achse bzgl. Schwerpunkt beider Propeller bei 50 Hz [mm]
nicht ausgewuchtet	1,6E-02	3,5E-03	9,7E-07	2,1E-07
ausgewuchtet (in Ebene des Auswuchtsystems)	9,7E-03	1,9E-03	5,9E-07	1,1E-07
ausgewuchtet (in Ebene der Unwucht)	9,5E-04	2,6E-04	6,2E-08	1,6E-08

Die Abb. 5.25 und Abb. 5.26 plausibilisieren dabei die Funktionstüchtigkeit der ANSYS-Simulation, da in diesen die Auswuchtebene leicht über die der Unwuchtebene verschoben wurde, sodass nahezu innerhalb der Unwuchtebene ausgewuchtet wurde. In der Realität wäre das zwar möglich, aber nur mit den schon verwendeten Mitteln, welche mit dieser Arbeit durch eine neue Art und Weise ergänzt werden sollten. Bei der großen Unwucht wurden bei der Auswuchtung in dieser Ebene Differenzen von $1,5 \cdot 10^{-2}$ mm in y- und $3,3 \cdot 10^{-3}$ mm in z-Richtung festgestellt. Im Vergleich dazu lagen die Differenzen bei der kleinen Unwucht bei $9,10 \cdot 10^{-7}$ mm in y- und $1,97 \cdot 10^{-7}$ mm in z-Richtung.

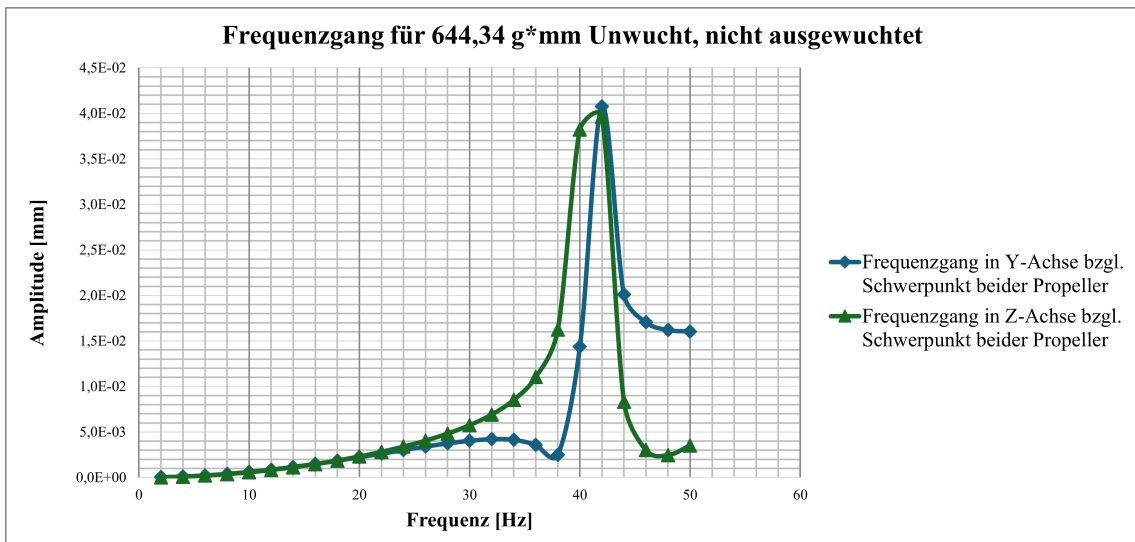


Abb. 5.21: Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, nicht ausgewuchtet

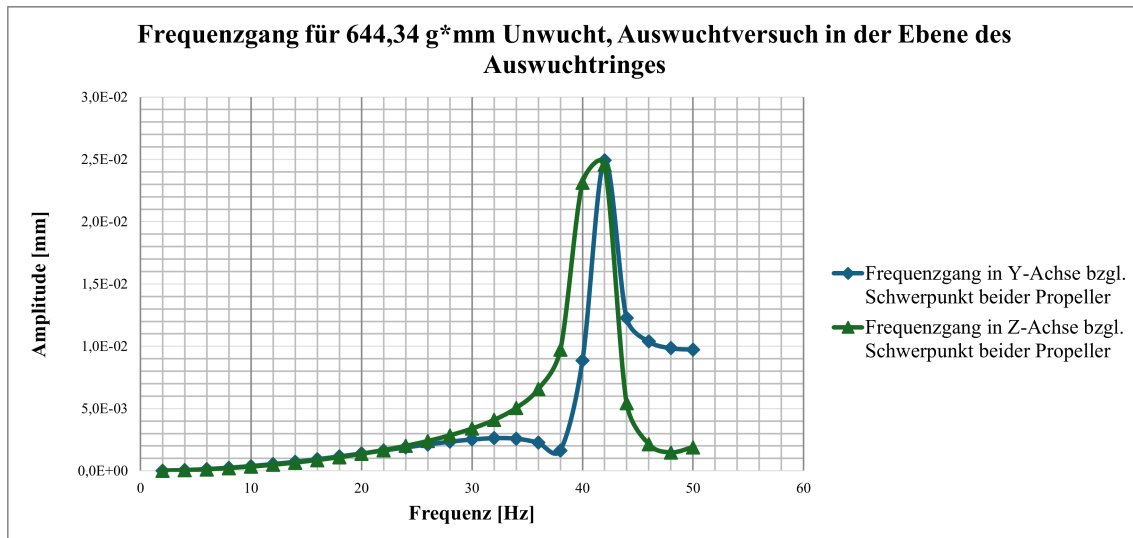


Abb. 5.22: Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch Auswuchtversuch in Auswuchtringebene

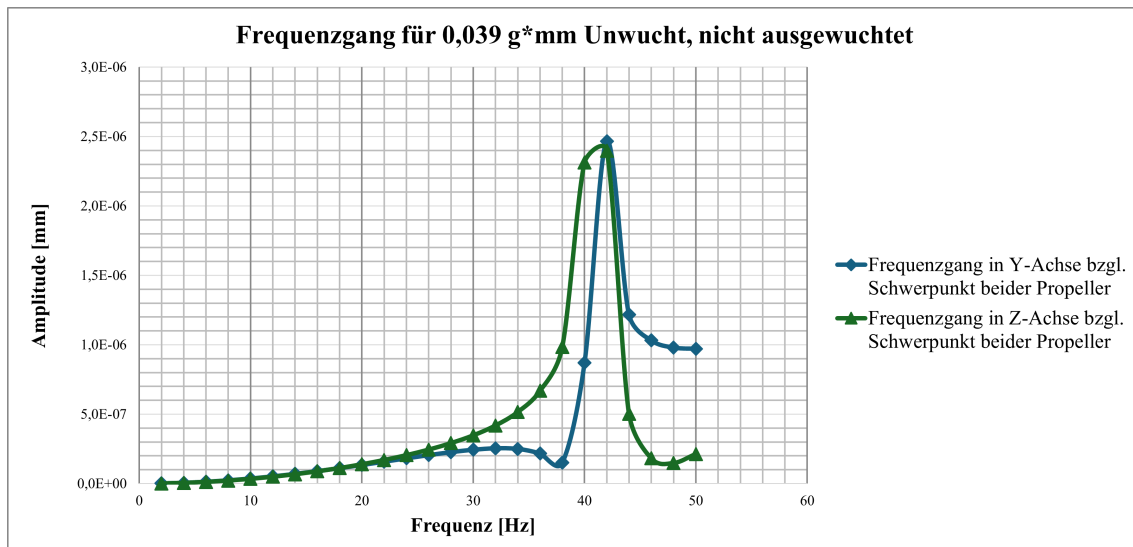


Abb. 5.23: Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, nicht ausgewuchtet

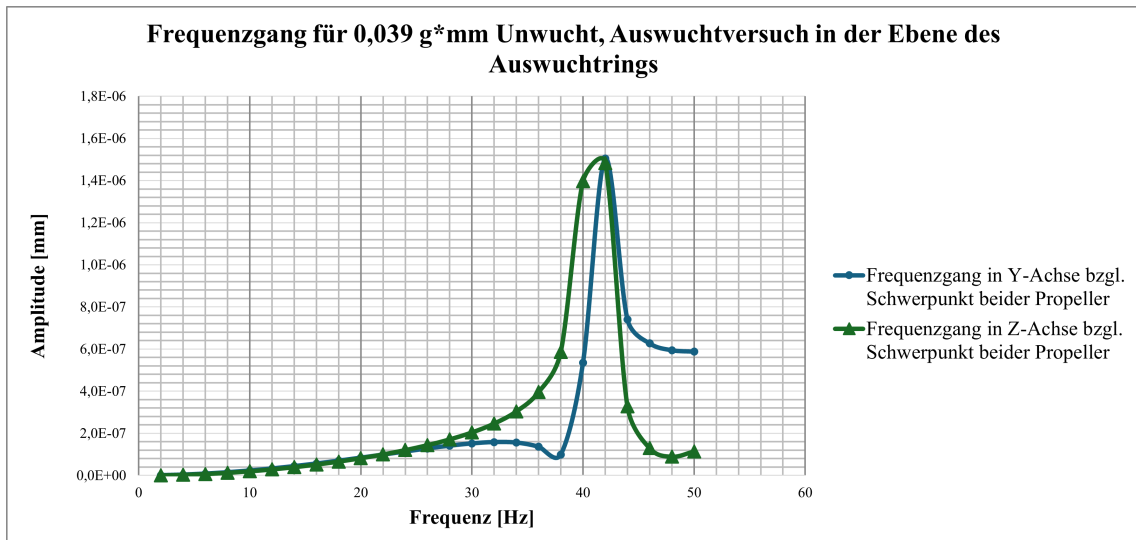


Abb. 5.24: Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch Auswuchtversuch in Auswuchtringebene

Wie groß die Differenzen in der Realität tatsächlich sein würden, konnte durch die Simulationen in ANSYS lediglich auf Basis angenommener Randbedingungen simuliert werden. Die Veränderungen nach dem Auswuchten mit dem Auswuchtring wären deshalb kleiner als die in der Unwuchtebene, da die Verschiebung der Auswuchtebene aus dieser heraus das Auftreten einer weiteren Unwuchtart zur Folge hatte: der sog. „Momentenunwucht“, welche in Kap. 3.3 genauer beschrieben wurde. Für eine weitere Auswuchtung dieser Unwuchtart müsste der Ring, welcher innerhalb dieser Arbeit auf ein Ein-Ebenen-Auswuchten abzielt, mit einem weiteren Ring versehen werden, damit das für die Auswuchtung der Momentenunwucht notwendige Zwei-Ebenen-Auswuchten möglich wäre. Dies müsste aber erneut mit den konstruktiven Mitteln in Einklang gebracht werden, da der Freiraum hinter dem Propeller nicht wirklich groß ist. Außerdem müsste die Position dieser zunächst rechnerisch definiert werden, was noch genauere Randbedingungen voraussetzt. Zudem müssten die Ausgleichsgewichte, welche auf dem Ring verteilt sind, im Allgemeinen etwas schwerer sein als die bloße Teilung der in Gl. 5.3 berechneten, gegenüberliegenden, aufzubringenden Ausgleichsmasse auf 14 Gewichte. Die Anbringung auf einer Kurve würde dafür sorgen, dass sich der gemeinsame Angriffspunkt der Massen weiter ins Innere des Auswuchtrings hinein verschiebt. Das heißt, der eigentliche Auswuchtringradius würde kleiner als 45 mm sein. Somit würde auch die Anbringung von noch mehr Ausgleichsgewichten innerhalb der weiteren Löcher keinen größeren Effekt erzielen.

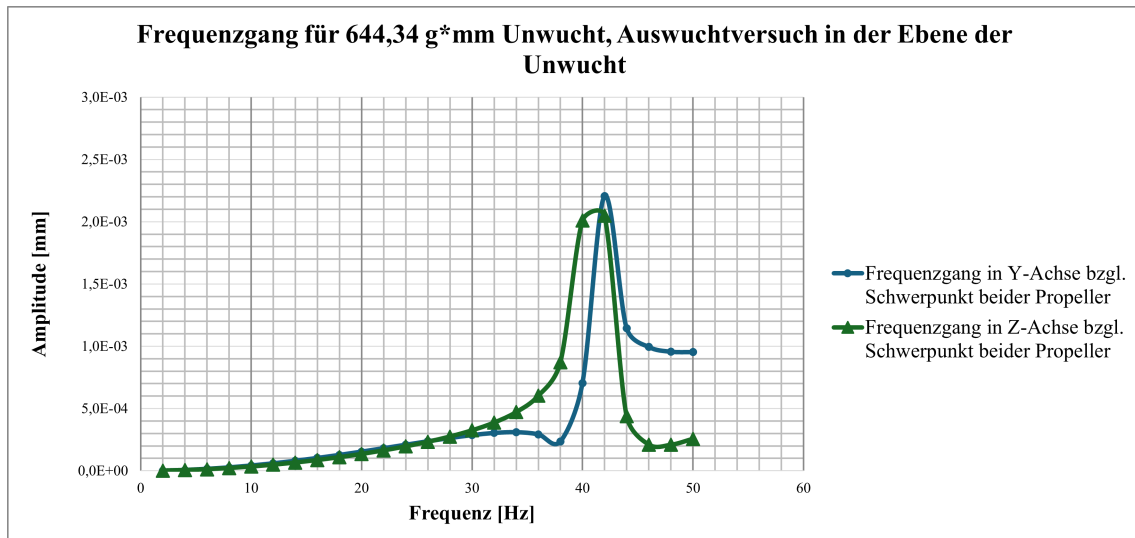


Abb. 5.25: Frequenzgang große Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Unwuchtebene aus Kap. 5.3

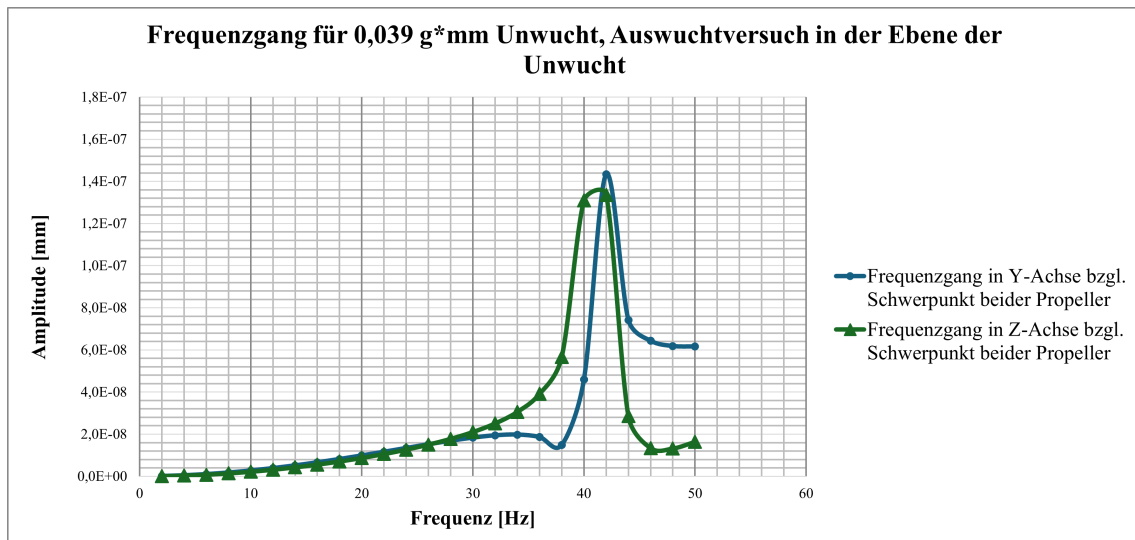


Abb. 5.26: Frequenzgang kleine Unwucht bzgl. Schwerpunkt Propellerblätter in y- und z-Achse, Auswuchtversuch in Unwuchtebene aus Kap. 5.3

Die Amplitudenänderungen des Frequenzgangs bezüglich der Verformung waren jedoch nicht die einzige gemessene Veränderung, welche im Zuge der Auswuchtung untersucht werden musste. Der Einfluss der Anbringung von Masse an eine rotierende Baugruppe musste auch bezüglich des propeller- als auch des encoderseitigen Lagers untersucht werden.

Dazu wurden die Abweichungen jeweils für die Verlängerung (Realteil) 1 und 2 einmal encodeseitig als auch propellerseitig vor und nach der Auswuchtung in den verschiedenen Auswuchtebenen verglichen. Die Diagramme bezüglich der Differenzen der Verlängerungen sind im Anhang von Abb. A.86 bis Abb. A.93 aufgeführt.

Dabei wurden auch hier jeweils die 50 Hz untersucht — aus dem gleichen Grund wie beim Frequenzgang. Insgesamt reichten die Differenzen durch den Auswuchtversuch in der Ebene des Auswuchtrings bei 50 Hz von minimal $2,2 \cdot 10^{-10}$ bis $1,2 \cdot 10^{-3}$ als maximale Abweichung. Der Versuch der Auswuchtung in der Ebene der Unwucht reichte dagegen von minimal $3,4 \cdot 10^{-9}$ bis maximal $2,2 \cdot 10^{-3}$. Aus diesen Ergebnissen ergab sich schließlich die Tatsache, dass folglich auch die Lager bei Auswuchtungen noch genauer betrachtet werden müssen, da dort Veränderungen durch die in Folge der Auswuchtung resultierenden Kraftänderungen auftreten können. Zusammenfassend konnte gesagt werden, dass diese Einflüsse nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Die Folgen zu großer Massen am Auswuchtring könnten auf lange Sicht zu erhöhtem Verschleiß in den beiden Lagern, sowohl propeller-, als auch encoderseitig führen.

5.4 Umsetzung der Ausgleichgewichte

Anschließend zu Kap. 5.3 mussten auf Basis der Simulationen Möglichkeiten im Einklang mit der in Kap. 4.5 gefundenen Ideallösung gefunden werden. Aus Tab. 4.6 ging die Lösung in Form von Gewindestiften hervor. Aufgrund eines vorerst festen Radius von 45 mm und einer Ringstärke von rund 6,87 mm wurden am Ring 42 Löcher radial von außen in Richtung der Schaftachse eingelassen. Jedes dieser Löcher wurde zudem mit einer Tiefe von 4 mm und einem Durchmesser von 5 mm versehen. Dafür mussten anschließend passende Gewindestifte gefunden werden, welche mindestens die berechnete Masse aus Gl. 5.3 für die maximale Unwucht-Auswuchtung bewerkstelligen könnten. Gleichzeitig war das Ziel, unterschiedlich lange Gewindestifte auszuwählen. Wie in Kap. 5.3 bereits erwähnt, würde bei 14 Gewindestiften deren Massenschwerpunkt durch die Anordnung auf einer Kurve in Richtung Rotationszentrum wandern. Die Auswuchtung würde folglich nicht genau bei einem Radius von 45 mm ausgeführt werden, sondern bei einem kleineren. In Abb. 5.27 ist diese Problematik schematisch übertrieben dargestellt. Das Ziel war es nun, wie im Vergleich von Abb. 5.27 mit Abb. 5.28, den Schwerpunkt so nah wie möglich am Außendurchmesser des Auswuchtringes zu halten. Damit waren mindestens zwei Gewindestiftlängen der Größe M5 vonnöten.

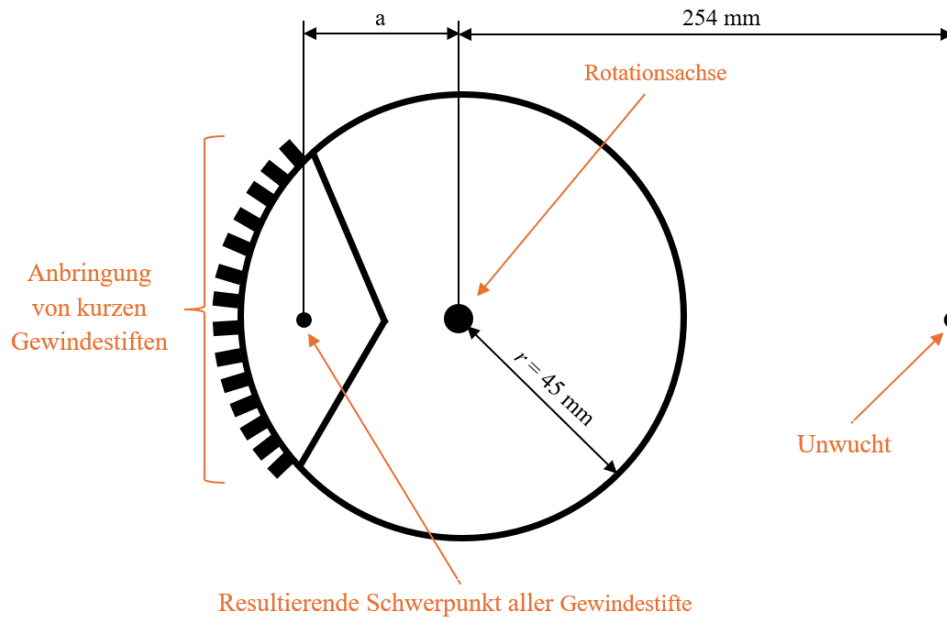


Abb. 5.27: schematische Übersicht der Gewichtsaufteilung bei 14 Gewichten

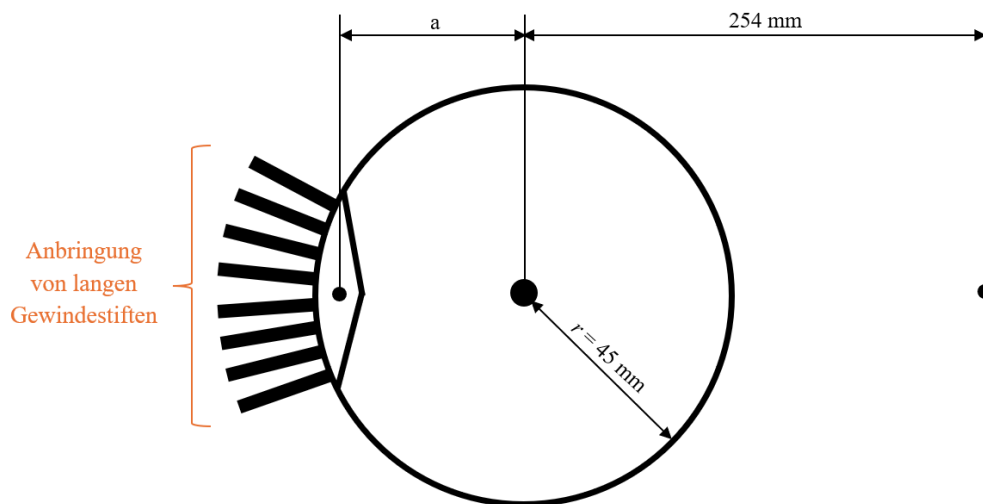


Abb. 5.28: schematische Übersicht der Gewichtsaufteilung bei 8 Gewichten

Damit die Gewichte zunächst preiswert bleiben konnten und trotzdem in Kombination verschiedene Ausgleichsunwuchtmassen verkörpern konnten, mussten die Gewindestifte in Länge und damit Gewicht verschieden sein. Die gefundenen Gewindestifte umfassten M5×10, M5×20 und M5×40. Das Material war galvanisch verzinkter Stahl 45 H und am unteren Ende hatten alle Gewindestifte eine Kegelkuppe. Dabei konnten in Form der M5×10-Gewindestifte mit einer Masse von 1 g kleine Ausgleichgewichte angebracht werden. Größere würden durch die M5×20 mit 2,2 g und die M5×40 mit 5,7 g am Auswuchtring anbringbar sein. Da als Zielsetzung auch eine relativ preisgünstige Lösung im Vordergrund stand, waren auch die Preise wichtig. Für 100 Stück würden beispielsweise für die M5×10 24,29 € [10], für die M5×20 21,04 € [11] und für die M5×40 33,42 € [12] anfallen, da meist nur feste Mengen bestellbar sind. Wichtig war nur,

dass der Gewindestift das Maß eines M5-Gewindes aufweist, da mit den schon eingelassenen Löchern im Auswuchtring auf diese Größe abgezielt wurde. Die Datentafel für alle drei ausgewählten Gewindestifte ist in Abb. 5.29 ersichtlich. Aus dieser vorläufigen Festlegung ging zudem hervor, dass zum Anbringen dieser Gewindestifte ein Inbusschlüssel notwendig sei, was im Hinblick auf die einfache Montage zunächst keine sichtbare Einschränkung hervorrufen sollte. Eine noch genauere Gewichtsangabe wäre durch das Bearbeiten einzelner Gewichte, z.B. durch geringes Abfeilen, möglich. Für die genauen Kombinationen müssen in Zukunft Tests durchgeführt werden, welche die Anwendung dieser Gewichte genauer beleuchten. Noch dazu müssen vorangegangene Simulationen bezüglich der durch die Gewichte im Auswuchtsystem entstehenden Verformungen und Spannungen durchgeführt werden. In Folge dessen könnte es auch durchaus möglich sein, dass der Ring in seiner Stärke erhöht und die Lochanzahl reduziert werden muss.

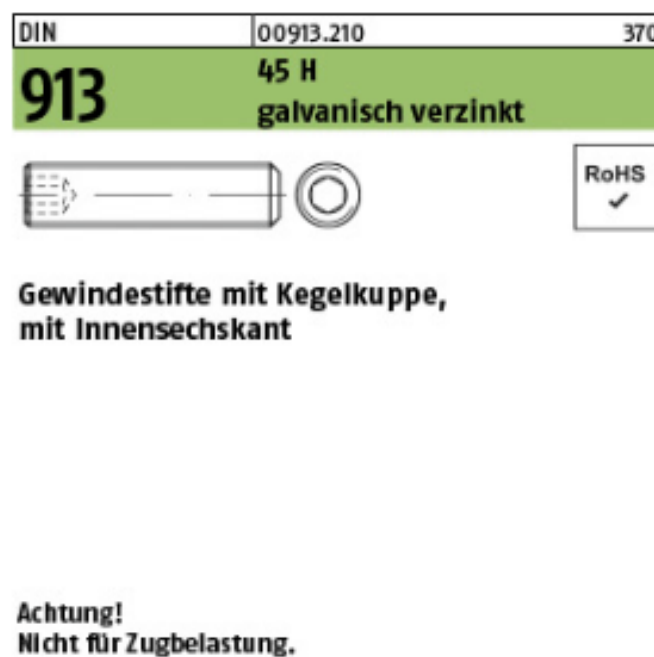


Abb. 5.29: Gewindestift-Datentafel

6 Ausarbeiten

Nachdem in Kap. 5 der endgültige Entwurf ausgewählt und eine grundlegende Funktionstüchtigkeit annähernd simuliert werden konnte, sind für die beiden Bestandteile der Konstruktion die dazugehörigen Zeichnungen erstellt worden. Diese sind auf Basis der in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 dargestellten originalen Konstruktionszeichnungen der ursprünglichen Innenschelle und der Antriebswelle entstanden. Abb. 6.3 und Abb. 6.4 stellen die Konstruktionszeichnungen der neu angepassten Innenschelle und des Auswuchtringes dar. Die in den Zeichnungen zu findenden Passungen entsprechen größtenteils jenen, welche auch in den originalen Zeichnungen zu finden waren. Jedoch muss dazu gesagt werden, dass vor allem die Passfläche für die Verbindung beider Bauteile nochmals auf Toleranzen untersucht werden muss. Auch bestehende Toleranzen sollten im Nachgang aufgrund der geometrischen Veränderungen im Hinblick auf den Auswuchtring auf Gültigkeit geprüft werden. Die entstandenen Konstruktionszeichnungen zeigen sehr gut die konstruktive Zerteilung zwischen Auswuchtring und Innenschelle. Diese wurde in Kap. 4.3.1 erstmals genannt und entstand aus der Tatsache, dass eine Fertigung dieses Auswuchtsystems sowohl mit 3D-Druck als auch Fräs- und Drehbearbeitung ohne Hinterschneidungen möglich sein sollte. Mit den in diesem Abschnitt aufgeführten Konstruktionszeichnungen wird der Stand der erreichten Konzeptionierung und Entwicklung eines nachträglich an ein Motor-Propeller-System montierbaren Auswuchtsystems dargestellt.

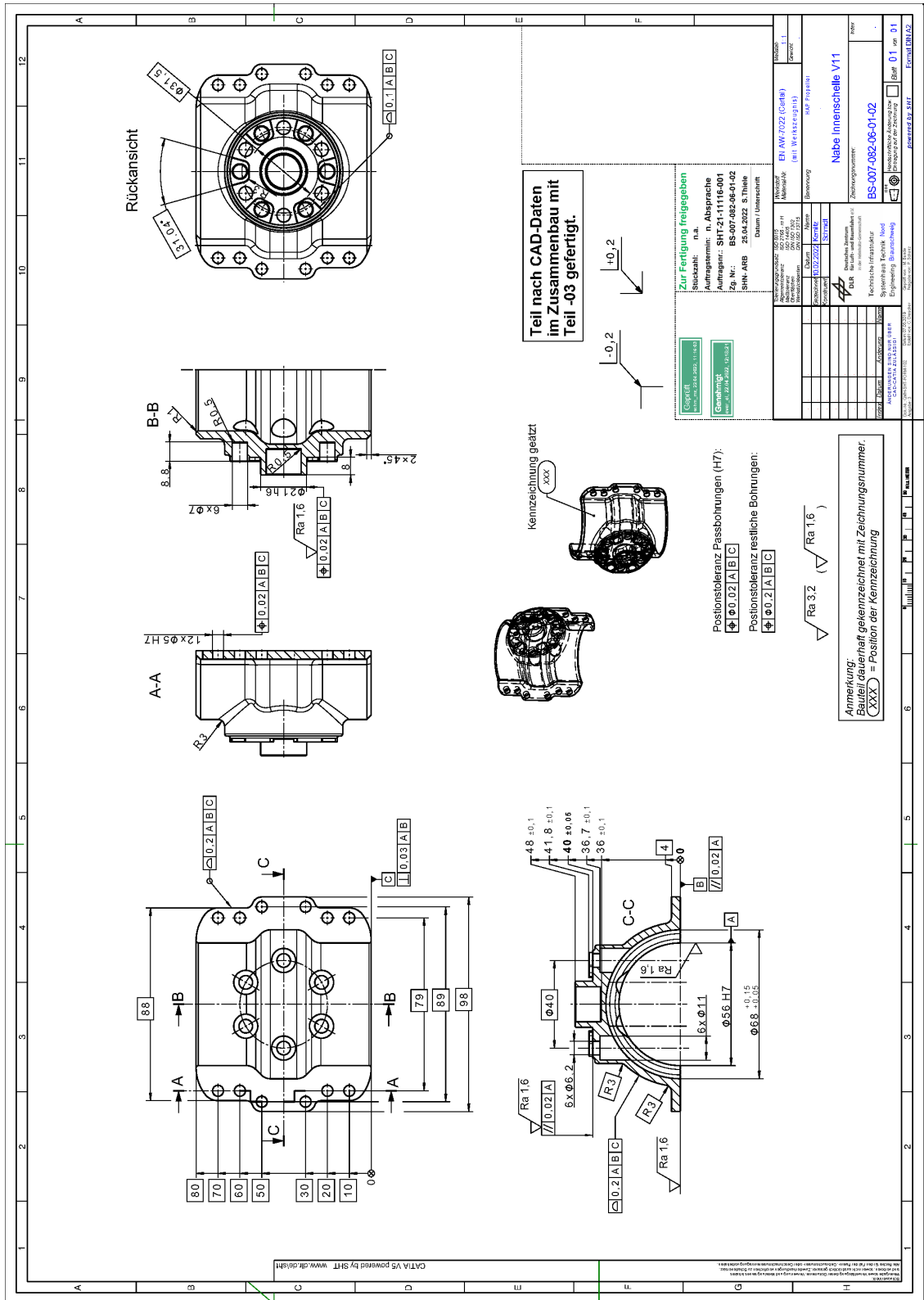


Abb. 6.1: Konstruktionszeichnung - Innenschelle (BS-007-082-06-01-02)

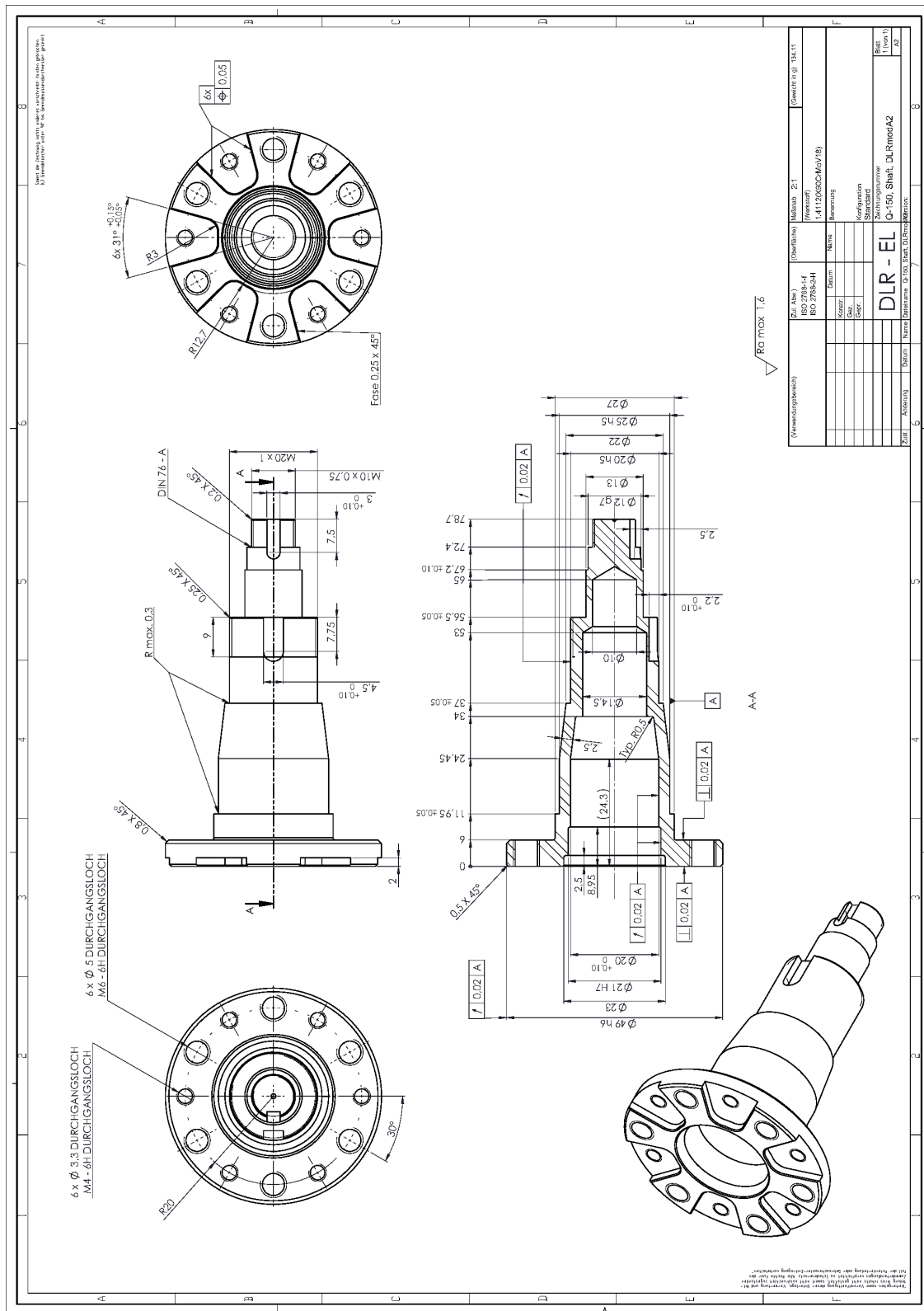


Abb. 6.2: Konstruktionszeichnung - Antriebswelle (Q-150, Shaft, DLRmodA2)

67



7 Fazit

Rückblickend wird noch einmal auf Tab. 4.6 als Ergebnis des Konzipierens von Kap. 4 geblickt. Dabei wurden verschiedene Ziele der ursprünglich geplanten Lösung erreicht. Diese gilt es folglich zusammenzufassen und einen Ausblick auf kommende Themen zu geben. Im Einklang mit den Punkten der Anforderungsliste in Tab. 2.1 aus Kap. 2.2.6 wurde in Kap. 4 zunächst das Verbindungskonzept mit einer getrennten Innenschelle und Auswuchtring als für die Lösung der Problemstellung am besten geeignet ausgewählt, an welchem senkrecht zur Schaftachse in beliebiger Winkellage Ausgleichsgewichte angebracht werden können. Ziel war es folglich, den Auswuchtring zwischen Innenschelle und Elektromotor-Rotor-Glocke konstruktiv zu platzieren, um mit dem Auswuchtsystem näher an der Ebene zu sein, in welcher die Unwucht auftritt. Dabei blieb das Auswuchtsystem aus Aluminium, genauer gesagt einer Aluminium-Zink-Magnesium-Kupfer-Legierung namens „EN AW-7022 (Cortal)“, aus welcher auch die ursprüngliche Innenschelle bestand. Diese Entscheidung war vorgegeben.

Zur Anbringung des besagten Auswuchtringes zwischen Antriebswelle und Innenschelle wurde die Projektion der vorliegenden formschlüssigen Verbindung zwischen diesen beiden Bauteilen gewählt. Diese wurde einmal in Richtung der Antriebswelle und einmal in Richtung der Innenschelle eingearbeitet und die Abmessungen dieser Verbindungsgeometrie größtenteils beibehalten. Damit der Propeller durch die Anbringung des Auswuchtsystems nicht weiter als 5 mm in Flugrichtung verschoben wird, wurde die ursprüngliche Innenschelle in der Länge der Anschlussgeometrie an die Antriebswelle gekürzt und mit dem Gegenstück für die formschlüssige Verbindung des Auswuchtringes versehen. Darüber hinaus diente die Zweiteilung der zukünftigen vereinfachten Fertigung mittels einer Kombination aus Fräsen und Drehen.

Bei den Prüfmöglichkeiten wurden die Möglichkeiten, welche Siemens NX mit sich bringt, gewählt. Dabei wurde das System zunächst bezüglich des Einflusses auf bestehende Eigenfrequenzen untersucht und angepasst. Man kam zu dem Schluss, dass sich im Speziellen die Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen durch das Auswuchtsystem nicht signifikant verändern. Darauf folgte die Prüfung der Auswuchtfunktion durch Anbringung von verschiedenen Ausgleichsgewichts-Konfigurationen am Auswuchtring innerhalb der harmonischen Analyse. Dabei bestand der Ausgangszustand in der Modalanalyse aus dem lediglich aus dem angebrachten Auswuchtsystem bestehenden ursprünglichen Motor-Propeller-System. Dies beinhaltet auch die Entfernung der ursprünglichen Innenschelle. Aufgrund des in der harmonischen Analyse überprüften Einflusses der Ausgleichsgewichte auf die am Schwerpunkt der Propellerblätter in allen Achsen gemessenen Schwingungsamplituden wurden passende Ausgleichsgewichte in Form von DIN553-M5×10-5.8-Gewindestiften ausgewählt.

Damit ist der aktuelle Stand dargestellt worden. Da es sich zum jetzigen Zeitpunkt lediglich um einen Prototypen handelt, wurden Ziele festgelegt, welche im Anschluss an die Bachelorarbeit in Angriff genommen werden. Dazu gehört einmal die genauere Betrachtung der durch die Hinzufügung von Bauteilen veränderten Spannungsverläufe. Dabei sollen vor allem die Verbindungsgeometrien und die Streben des Auswuchtringes durch angreifende Kräfte von Seiten der Antriebswelle sowie der bei den Schellen und der angebrachten Ausgleichsgewichte untersucht werden. Des Weiteren sind Tests im Auswucht-Prüfstand notwendig, bevor es am Flugzeug getestet werden kann. Wenn dabei festgestellt würde, dass die Ausgleichsgewichte nicht

ausreichend sind, müssen die Gewindestifte eventuell überdacht werden. Bei den Auswuchtsimulationen ergab sich bei ca. 40 Hz eine Eigenfrequenz, welche innerhalb des Betriebsbereiches liegt und bei Tests in Richtung des maximalen Betriebsdrehzahlbereiches genauer untersucht und auf ihre Ungefährlichkeit geprüft werden muss.

8 Danksagung

Ich möchte diesen Abschnitt nutzen, um mich bei allen zu bedanken, die mich während der Arbeit an der Bachelorarbeit in besonderem Maße unterstützt haben.

Mein erster persönlicher Dank gilt Dr.-Ing. Matthias Lang, der mir nicht nur ein äußerst spannendes Praktikum vor der Bachelorarbeit ermöglicht hat, sondern dieses auch gezielt so gestaltete, dass ich optimal auf die anschließende Arbeit am Institut vorbereitet war. Der regelmäßige Austausch über den Stand und Fortschritt der Arbeit im Einklang mit der Zielstellung war eine große Stütze mit motivierender und inspirierender Wirkung. Dazu gehörten sowohl Verbesserungsvorschläge als auch neue Überlegungen sowie die spontane Bereitschaft, auf aufkommende Fragen einzugehen. All dies führte letztlich zur vorerst bestmöglichen Lösung der Problemstellung, auf die ich sehr stolz bin.

Recht herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Jonas Fischer, der mir seit der Zusage des DLR-Cottbus zum Industriepraktikum stets zur Seite stand und mir darüber hinaus viele formale Hinweise zur Abwicklung des Praktikums und der Bachelorarbeit gegeben hat. Als Betreuer seitens der Hochschule Merseburg war er ein wichtiges Bindeglied zwischen mir und Herrn Lang und hatte bei Fragen immer ein offenes Ohr.

Ein weiterer Dank gilt meinem Abteilungsleiter Dr. Stefan Kazula, der mir die Möglichkeit gegeben hat, beim DLR-Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe in Cottbus mitzuwirken. Mit der positiven Rückmeldung auf meine Praktikumsanfrage in der allgemeinen Stellenausschreibung ging für mich ein lang gehegter Traum in Erfüllung. Dank der herzlichen Begrüßung und der kontinuierlichen Rückmeldungen des Instituts zu meiner außerinstitutionellen Mithilfe bei verschiedenen Vorbereitungen habe ich mich dem Team zunehmend verbunden gefühlt. Durch diese Möglichkeit, meinen Teil zum DLR beizutragen, wurde der Grundstein für meinen weiteren studentischen Weg gelegt. In diesem Zusammenhang gilt auch Prof. Dr. Lars Enghardt als Institutsdirektor mein besonderer Dank.

Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei meinen Kolleginnen und Kollegen innerhalb des DLR. Dazu gehören vor allem Marvin Illbruck, Enes Kemal Güngör, Amadeus Cavalcanti Salvador de Alcântara, Jose Chamorro Cuastuza, Fabian Kramer, Wolfgang Klimm, Ilja Koch, André Vetterlein, Enrico Reichert, Alperen Altun und Markus Kober, um nur einige zu nennen. Der gemeinsame konstruktive Austausch hat meine Motivation stets hochgehalten und durch die Bewertung aus verschiedenen fachlichen Perspektiven kontinuierlich verbessert. Letztendlich bedanke ich mich beim gesamten Institut für ein stets offenes Ohr bezüglich Fragen und Anregungen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem früheren Astronomie- und Physiklehrer Herrn Mattsstedt. Durch seinen Unterricht habe ich mein Leben der Forschung und dem Streben nach Größerem gewidmet. Seine inspirierenden Worte und sein Interesse an meiner Begeisterung für die Luft- und Raumfahrttechnik haben mich in die Richtung gelenkt, in der ich mich heute befinde. Die zahlreichen Unterhaltungen über die Kräfte, die die Welt formen, haben mein Streben nach Erkenntnis und dem Ergründen des Neuen nachhaltig geprägt. Von Herzen bedanken möchte ich mich bei meiner Freundin Cassandra Röder, die mir in schweren Zeiten stets zur Seite stand, mich motiviert hat und immer für mich da war.

Ein sehr großer Dank gilt meinen Eltern, die mich immer unterstützt und in schwierigen Zeiten mit Motivation gestärkt haben. Nicht nur für die Ermöglichung des Besuchs naturwissenschaftlich orientierter Schulen und schließlich der Hochschule Merseburg, sondern auch für ihre Hilfe bei schwierigen Entscheidungen und ihre unendliche Unterstützung in jeder Lebenslage möchte ich mich bedanken.

Zu guter Letzt danke ich meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mir die Zeit während meiner akademischen Ausbildung sowohl in Merseburg als auch in Cottbus zu einer schönen und bereichernden Zeit gemacht haben.

Jonas Rabitz

Cottbus, 02.04.2026

Literatur

- [1] Andreas Schütz, *Unbemanntes hochfliegendes Solarflugzeug: HAP-alpha besteht wichtige Bodentests*, Köln, 2018. Adresse: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2025/unbemanntes-hochfliegendes-solarflugzeug-hap-alpha-besteht-wichtige-bodentests%7D> (besucht am 08.12.2025), Kap. 2.1, Kap. 2.2.6, Kap. 4.1.
- [2] ANSYS Innovation COURSES, *ANSYS Mechanical Connection Tips and Tricks*, 2026. Adresse: <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/topics-under-connections-in-ansys-mechanical/lessons/ansys-mechanical-connection-tips-and-tricks/> (besucht am 25.03.2026), Kap. 5.1.1.
- [3] ANSYS part of SYNOPSYS, 5.6.2. *Harmonic Response Analysis*. Adresse: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_harmonic_analysis_type.html, Kap. 3.9.
- [4] H.-C. Biank, *Auswuchtprotokoll (Solarflieger Antrieb links nach Umbau)*, 2025, Kap. 5.3.
- [5] —, *Auswuchtprotokoll (Solarflieger Antrieb links)*, 2025, Kap. 5.3.
- [6] —, *Auswuchtprotokoll (Solarflieger Antrieb rechts)*, 2025, Kap. 5.3.
- [7] Dankert/ Dankert, *Methode der finiten Elemente*. Adresse: <http://www.tm-mathe.de/Themen/html/femzugaenge.html>, Kap. 2.1, Kap. 3.8.
- [8] Dario Marjanovic, *Reifentechnik: Auswuchtgewichte – Welche Materialien sind erlaubt?* RP Handels und Service GmbH, Hrsg., 2017. Adresse: <https://www.rp-tools.com/Reifentechnik-Auswuchtgewichte-Welche-Materialien-sind-erlaubt>, Kap. 4.3.5.
- [9] Engineering Shield, *Modalanalyse mit FEM: Resonanzen erkennen, Konstruktionen sichern*, 2025. Adresse: <https://eshield.pl/de/fuer-ingenieur/modalanalyse-mit-fem-resonanzen-erkennen-konstruktionen-sichern/>, Kap. 3.4.
- [10] *Gewindestifte mit Kegelnkuppe - mit Innensechskant - DIN 913 - Stahl 45 H galvanisch verzinkt - M5x10 - 1000 Stück*, 2026. Adresse: <https://www.schrauben24.biz/DIN-913-45-H-galvanisch-verzinkt-Gewindestifte-mit-Kegelnkuppe-mit-Innensechskant-Abmessung-M-5-x-10-VE-mit-1000-Stueck>, Kap. 5.4.
- [11] *Gewindestifte mit Kegelnkuppe - mit Innensechskant - DIN 913 - Stahl 45 H galvanisch verzinkt - M5x20 - 500 Stück*, 2026. Adresse: <https://www.schrauben24.biz/DIN-913-45-H-galvanisch-verzinkt-Gewindestifte-mit-Kegelnkuppe-mit-Innensechskant-Abmessung-M-5-x-20-VE-mit-500-Stueck>, Kap. 5.4.
- [12] *Gewindestifte mit Kegelnkuppe - mit Innensechskant - DIN 913 - Stahl 45 H galvanisch verzinkt - M5x40 - 200 Stück*, 2026. Adresse: <https://www.schrauben24.biz/DIN-913-45-H-galvanisch-verzinkt-Gewindestifte-mit-Kegelnkuppe-mit-Innensechskant-Abmessung-M-5-x-40-VE-mit-200-Stueck>, Kap. 5.4.
- [13] *Hammerwurf*, 2018. Adresse: <https://spolex.de/lexikon/hammerwurf/>, Kap. 3.

- [14] kein Autor, *Eigenschaften von Messingmaterialien*, 0. Adresse: <https://langhe-industry.com/de/brass-material/>, Kap. 4.3.5.
- [15] T. Kuttner und A. Rohnen, *Praxis der Schwingungsmessung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-25048-5, Kap. 3.5.
- [16] Liam Cope, *What Is a Campbell Diagram and How Do You Read One?* engineerfix, Hrsg., 2025. Adresse: <https://engineerfix.com/what-is-a-campbell-diagram-and-how-do-you-read-one/>, Kap. 3.7.
- [17] Lily Hulatt, *Rotordynamik*, 2024. Adresse: <https://www.studysmarter.de/studium/ingenieurwissenschaften/technische-mechanik/rotordynamik/>, Kap. 3.6.
- [18] M. Eng. Konrad Mehle, *Finite-Elemente-Methoden (Vorlesungsskript)*, Merseburg, 2024, Kap. 3.8.
- [19] Martin Hepperle, *Vermerk Propeller Massenträgheit 12-JAN-2023*, 2023, Kap. 5.1.1, Kap. 5.3.
- [20] Moritz Schmidt, *Hochfliegende unbemannte Plattform (HAP): HAP P060210 V0 R L3 Auslegungsbericht Propeller*, Kap. 5.3.
- [21] Prof. Dr.-Ing. Stefan Schwan, *Konstruktionsmethodik & Produktentwicklung (Vorlesungsskript)*, Merseburg, 2025, Kap. 1.3, Kap. A.1.
- [22] H. Schneider, *Auswuchttechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, ISBN: 978-3-662-61890-5. DOI: 10.1007/978-3-662-61891-2, Kap. 3.1, Kap. 3.2, Kap. 3.3, Kap. 3.5.
- [23] Søren Linnet Gjelstrup, *Modalanalyse: Der ultimative Ratgeber*, DEWESoft, Hrsg., 2025. Adresse: <https://dewesoft.com/de/blog/was-ist-modalanalyse>, Kap. 3.4.
- [24] Stefan Haslwanter, *Saisonabschluss der Inzinger Hammerwerfer:innen*, 2023. Adresse: https://www.meinbezirk.at/telfs/c-regionauten-community/saisonabschluss-der-inzinger-hammerwerferinnen_a6340616, Kap. 3.
- [25] *Was ist eine Rotorunwucht und warum ist sie gefährlich?* 2025. Adresse: <https://vibromera.de/blog/was-ist-unwucht.html>, Kap. 3.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

*Konzept und Entwurf einer nachträglich montierbaren Vorrichtung zur Anbringung
von Ausgleichsgewichten an einem elektrisch angetriebenen Propeller*

selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Cottbus, den 02.04.2026

Jonas Rabitz

A Anhang

A.1 Ergänzungen zu Abschnitt 4

Tab. A.1: Tabelle für Einzelfunktion Nr. 1 „Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System“ aus Kap. 4.3.1

Nr.	1	2	3
Einzelfunktion Nr. 1			
Verbindungskonzept mit Motor-Propeller-System	Klemmenlösung	Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtring	getrennte Innenschelle und Auswuchtring
Vorteile	maximale Modularität, nachträgliche Anbringung an Motor-Propeller-System	radiale Sicherung ohne zusätzliche Verbindungselemente, Anbringung vor ersten Auswuchtvorgang, Auswuchtvorrichtung besteht nur aus einem Teil, Außendurchmesser des Elektromotor-Rotors einhaltbar	einfachere und kostengünstigere Fertigungsmöglichkeiten, Außendurchmesser des Elektromotor-Rotors einhaltbar
Nachteile	Erhöhung der Schwachstellen durch Erhöhung der nötigen Verbindungselemente, schwierigere und teurere Fertigung, Außendurchmesser des Elektromotor-Rotors nicht einhaltbar, benötigt einen Auswuchtvorgang mehr, zweigeteilter Auswuchtring nötig	Neufertigung der Innenschelle nötig, nachträgliche Anbringung nicht möglich, schwierigere und teurere Fertigung	Neufertigung der Innenschelle nötig, Erhöhung der Schwachstellen durch Teilung von Variante 2 in zwei Teile, nachträgliche Anbringung nicht möglich, verlängerte Versionen der DIN 6912 M6x12 10.9

Tab. A.2: Tabelle für Einzelfunktion Nr. 2 „Gestaltung der Tragstruktureinrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten“ aus Kap. 4.3.2

Nr.	1	2	3
Einzelfunktion Nr. 2			
Gestaltung der Tragstruktur- einrichtung für die Anbringung von Ausgleichsgewichten	encoderseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	propellerseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse
Vorteile	geometrisch radial gesichert, problemstellenfreie Montage, Gewichts Anpassung der Auswuchtgewichte möglich	radiale Sicherung nicht notwendig, Annäherung an ursprüngliche Aus- wuchtebene, Gewichts Anpassung der Auswuchtgewichte möglich	montagetechnisch einfachere Anbringung von Ausgleichsgewichten ohne Einschränkung. nahezu problemstellen- freie Montage, Annäherung an ursprüngliche Auswuchtebene, einfachere und kostengünstigere Fertigungsmöglichkeiten, Gewichts- und Radiusanpassung der Auswuchtgewichte möglich
Nachteile	Elektromotor- Rotor- Außendurchmesser- Überschreitung notwendig, teure Fertigung aufgrund höher Bauteilzahl, erfordert axiales und radiales Mindestmaß des Auswuchtrings zur Einbringung von Gewichten	Elektromotor-Rotor- Außendurchmesser- Überschreitung notwendig, montagetechnische Einschränkungen durch Propellerblätter, Mindestbreite zur Einbringung von Gewichte, teure Fertigung aufgrund höher Bauteilzahl, erfordert axiales und radiales Mindestmaß des Auswuchtrings zur Einbringung von Gewichten	erfordert axiales und radiales Mindestmaß des Auswuchtrings zur Einbringung von Gewichten

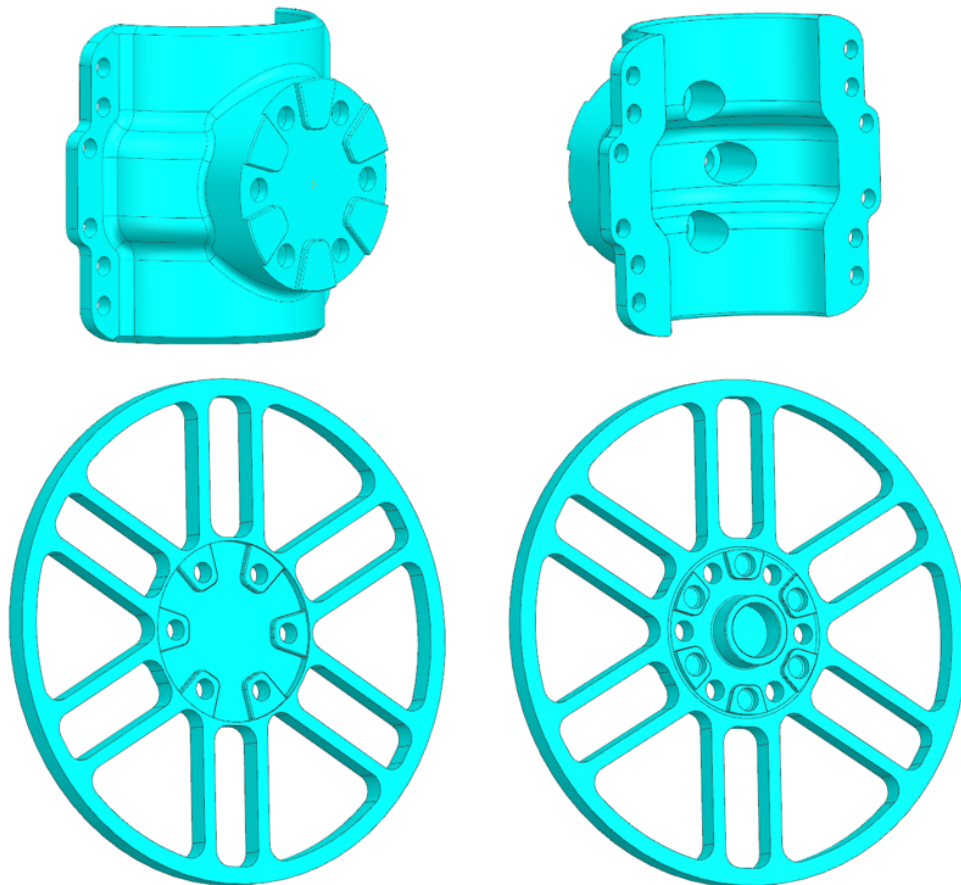


Abb. A.1: Lösungsvariante 3 - Tragstruktureausrichtung senkrecht zur Schaftachse, Verbindungsgeometrieänderungen aus Kap. 4.3.2

Tab. A.3: Tabelle für Einzelfunktion „Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestalt der Ausgleichsgewichte“ aus Kap. 4.3.3

Nr.	1	2	3	4
Einzelfunktion Nr. 4				
Gestaltung der Anbringung an Tragstruktur und Gestalt der Ausgleichsgewichte	umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	umlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichsgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen	Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichsgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)
Vorteile	Verzicht auf Erhöhung der Bauteilanzahl, frei wählbare radiale Anpassung der Winkellage, kostengünstige Fertigung	360°-Anpassung der Winkellage zur Schaftachse, Gewichtsanpassung, formschlüssige Sicherung, kostengünstige Fertigung	Radiusanpassung, Gewichtsanpassung, kostengünstige Fertigung	Radiusanpassung, bessere Gewichtsanpassung, kostengünstige Fertigung
Nachteile	Radius nicht mehr nachträglich anpassbar, undefinierte Gewichtsanpassung, Klebwirkung ist Witterung ausgesetzt, nur schwere Positionierung möglich, Wartezeit für Aushärtung des Klebers	Erhöhung der Bauteilanzahl, begrenzte Anzahl an Bohrungen senkrecht zur Schaftachse möglich, Radiusanpassung nichtmöglich	erfordert axiales und radiales Mindestmaß des Auswuchtrings zur Einbringung von Gewichten begrenzte Anzahl an Bohrungen senkrecht zur Schaftachse möglich Radiusanpassung nichtmöglich	erfordert axiales und radiales Mindestmaß des Auswuchtrings zur Einbringung von Gewichten, Erhöhung der Bauteilanzahl, begrenzte Anzahl an Bohrungen senkrecht zur Schaftachse, möglich Radiusanpassung nichtmöglich

Tab. A.4: Tabelle für Einzelfunktion Nr. 5 aus Ebac Konzipieren, „Materialwahl der Ausgleichsgewichte“ aus Kap. 4.3.5

Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Einzelfunktion Nr. 5							
Materialwahl der Ausgleichsgewichte	Zink	Stahl	Blei	Wolfram	Zinn	Messing	schon im Motor verwendeter Klebstoff
Vorteile	umweltverträglich	hohe Temperaturbeständigkeit, umweltverträglich	hohe Dichte, elastisch	hohe Dichte	hohe Dichte	hohe Dichte (abhängig von Legierung), günstig	einfache Auftragung
Nachteile	größer als Bleigewichte durch geringere Dichte bei gleicher Masse	geringe Elastizität, größer als Bleigewichte durch geringere Dichte bei gleicher Masse	umweltschädlich	teure Gewinnung und Fertigung	teure Gewinnung und Fertigung	mäßig elastisch	Witterungseinfluss schlecht kalkulierbar, ungenaue Positionierung

Tab. A.5: Tabelle für Einzelfunktion Nr. 6 „Fertigungstechnologien der Tragstruktur“ aus Kap. 4.3.6

Nr.	1	2	3
Einzelfunktion Nr. 6			
Fertigungsmöglichkeiten für die Tragstruktur	Drehen und Fräsen	3D-Druck	Gießen
Vorteile	bei geteilten Bauteilen vorteilhaft (klare Teilung in rotationssymmetrische und prismatische Bauteile möglich)	Prototypen, komplexe Geometrien	gute Werkstoffausnutzung, hohe Gestaltungsvielfalt
Nachteile	schlechte Werkstoffausnutzung	in der Regel relativ langsam, je nach Material evtl. teuer	anfällig für Zugkräfte, teure Werkzeuge

Tab. A.6: Lösungsvariantenbildung aus morphologischen Kästen aus Kap. 4.5

Teilfunktionen	Lösungsprinzipien/ Lösungsideen						
Verbindungskonzept	Klemmenlösung	Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtring	getrennte Innenschelle und Auswuchtring				
Tragstruktureausrichtung	encoderseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	propellersseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	senkrechte Anbringung der Gewichte zur Schaftachse				
Materialwahl Tragstruktur	EN AW-7022						
Tragstruktur- und Ausgleichgewichtsgestaltung	umlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	umlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen	Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)			
Materialwahl Ausgleichgewichte	Zink	Stahl	Blei	Wolfram	Zinn	Messing	schon im Motor verwendeter Klebstoff
Fertigungstechnologien Tragstruktur	Drehen und Fräsen	3D-Druck	Gießen				
Prüfmöglichkeiten	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical						
	Auswuchtmessgerät						

Variante 1 Variante 2 Variante 3 Variante 4

Wertskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Pkt.	Bedeutung	Pkt.	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung		
2	schwache Lösung	1	gerade noch tragbar
3	tragbare Lösung		
4	ausreichende Lösung	2	ausreichend
5	befriedigende Lösung		
6	gute Lösung mit geringen Mängeln	3	gut
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung	4	sehr gut (ideal)
9	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung		
10	Ideallösung		

Abb. A.2: verwendete Werteskalen [21] aus Kap. 4.5

Tab. A.7: Variantenvergleich basierend auf der Wertskala "VDI 2225" bzgl. Kosten und Funktion aus Kap. 4.5

Einzelfunktion	Variante 1	K	F	P	Variante 2	K	F	P	Variante 3	K	F	P	Variante 4	K	F	P
Verbindungskonzept	Klemmenlösung	3	2	5	Klemmenlösung	3	2	5	Verschmelzung Innenschelle mit Auswuchtung	1	3	4	getrennte Innenschelle und Auswuchtung	2	3	5
Tragstrukturaustrichtung	encoderseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	2	2	4	propellersseitige Anbringung der Gewichte parallel zur Schaftachse	2	2	4	senkrechte Anbringung der Gewichte zu Schaftachse	3	3	6	senkrechte Anbringung der Gewichte zu Schaftachse	3	3	6
Materialauswahl Tragstruktur	EN AW-7022	4	4	8	EN AW-7022	4	4	8	EN AW-7022	4	4	8	EN AW-7022	4	4	8
Tragstrukturanbringung- und Ausgleichgewichtsgestaltung	unlaufende Rechtecknut und Klebereinfüllung	3	1	4	unlaufende T-Nut mit geometrisch angepassten Ausgleichsgewichten in Kombination mit Schraubverbindung	1	2	3	Gewindebohrung für Gewindestifte und daran angebrachten Ausgleichsgewichten (Kombination aus Variante 2 und 3)	3	3	6	verschiedene Gewindestifte in Gewindebohrungen	3	3	6
Materialwahl Ausgleichgewichte	schon im Motor verwendeter Klebstoff	2	2	4	Zink	2	3	5	Stahl	3	3	6	Stahl	3	3	6
Fertigungstechnologische Tragstruktur	Drehen und Fräsen	3	3	6	Drehen und Fräsen	3	3	6	3D-Druck	2	3	5	Drehen und Fräsen	3	3	6
Prüfmöglichkeiten	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	4	4	8	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	4	4	8	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	4	4	8	Belastungstest im Prüfstand bzw. ANSYS-Mechanical + Auswuchtmessgerät	4	4	8
Summe		39				39				43				45		

A.2 Ergänzungen zu Abschnitt 5.1

	A	B	C	D	E
1	Eigenschaft	Wert	Einheit		
2	Field Variables des Materials	Tabelle			
3	Dichte	2770	kg m ⁻³		
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)				
5	Koeffizient der thermischen Ausdehnung	2,3E-05	C ⁻¹		
6	Isotrope Elastizität				
7	Ableiten von	E-Modul und Querkontraktion...			
8	E-Modul	70	GPa		
9	Querkontraktionszahl	0,33			
10	Kompressionsmodul	6,8627E+10	Pa		
11	Schubmodul	2,6316E+10	Pa		
12	S-N Kurve	Tabellarisch			
16	Zug-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
17	Druck-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
18	Max. Zugfestigkeit	3,1E+08	Pa		
19	Druckfestigkeit	0	Pa		
20	Isotrope thermische Leitfähigkeit	Tabellarisch			
23	Spezifische Wärme - Kontaktdruck, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
24	Relative isotrope Permeabilität	1			
25	Isotroper Widerstand	Tabellarisch			

Abb. A.3: in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften der Aluminiumlegierung aus Kap. 5.1

	A	B	C	D	E
1	Eigenschaft	Wert	Einheit		
2	Field Variables des Materials	Tabelle			
3	Dichte	7850	kg m ⁻³		
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)				
5	Koeffizient der thermischen Ausdehnung	1,2E-05	C ⁻¹		
6	Isotrope Elastizität				
7	Ableiten von	E-Modul und Querkontraktion...			
8	E-Modul	210	GPa		
9	Querkontraktionszahl	0,3			
10	Kompressionsmodul	1,75E+11	Pa		
11	Schubmodul	8,0769E+10	Pa		
12	Dehnungswöhlerlinien-Parameter				
13	Kurventyp anzeigen	Dehnungswöhlerlinie			
14	Festigkeitskoeffizient	9,2E+08	Pa		
15	Festigkeitsexponent	-0,106			
16	Koeffizient der Duktilität	0,213			
17	Duktilitätsexponent	-0,47			
18	Zyklischer Festigkeitskoeffizient	1E+09	Pa		
19	Zyklischer Verfestigungsexponent	0,2			
20	S-N Kurve	Tabellarisch			
24	Zug-Streckgrenze	2,5E+08	Pa		
25	Druck-Streckgrenze	2,5E+08	Pa		
26	Max. Zugfestigkeit	4,6E+08	Pa		
27	Druckfestigkeit	0	Pa		
28	Isotrope thermische Leitfähigkeit	60,5	W m ⁻¹ C ⁻¹		
29	Spezifische Wärme - Kontaktdruck, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
30	Relative isotrope Permeabilität	10000			
31	Isotroper Widerstand	1,7E-07	ohm m		

Abb. A.4: in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von Baustahl aus Kap. 5.1

	A	B	C	D	E
1	Eigenschaft	Wert	Einheit		
2	Field Variables des Materials	Tabelle			
3	Dichte	2,78	g cm ⁻³		
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)				
5	Koeffizient der thermischen Ausdehnung	2,3E-05	C ⁻¹		
6	Isotrope Elastizität				
7	Ableiten von	E-Modul und Querkontraktion...			
8	E-Modul	70	GPa		
9	Querkontraktionszahl	0,33			
10	Kompressionsmodul	6,8627E+10	Pa		
11	Schubmodul	2,6316E+10	Pa		
12	S-N Kurve	Tabellarisch			
16	Zug-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
17	Druck-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
18	Max. Zugfestigkeit	3,1E+08	Pa		
19	Druckfestigkeit	0	Pa		
20	Isotrope thermische Leitfähigkeit	Tabellarisch			
23	Spezifische Wärme - Kontaktdruck, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
24	Relative isotrope Permeabilität	1			
25	Isotroper Widerstand	Tabellarisch			

Abb. A.5: in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von EN-AW-7022 aus Kap. 5.1

	A	B	C	D	E
1	Eigenschaft	Wert	Einheit		
2	Field Variables des Materials	Tabelle			
3	Dichte	2770	kg m ⁻³		
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)				
5	Koeffizient der thermischen Ausdehnung	2,3E-05	C ⁻¹		
6	Isotrope Elastizität				
7	Ableiten von	E-Modul und Querkontraktion...			
8	E-Modul	70	GPa		
9	Querkontraktionszahl	0,33			
10	Kompressionsmodul	6,8627E+10	Pa		
11	Schubmodul	2,6316E+10	Pa		
12	S-N Kurve	Tabellarisch			
16	Zug-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
17	Druck-Streckgrenze	2,8E+08	Pa		
18	Max. Zugfestigkeit	3,1E+08	Pa		
19	Druckfestigkeit	0	Pa		
20	Isotrope thermische Leitfähigkeit	Tabellarisch			
23	Spezifische Wärme - Kontaktdruck, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
24	Relative isotrope Permeabilität	1			
25	Isotroper Widerstand	Tabellarisch			

Abb. A.6: in ANSYS eingestellte Materialeigenschaften von „robustes hart anodisiertes Aluminium“ aus Kap. 5.1

Details von "Schwerpunkt beider Propellernlätter"	
Zuweisung	
Zuweisungsmethode	Externer Punkt
Angewendet durch	Externe Zuordnung
Externe Punkte	Schwerpunkt beider Propeller
Koordinatensystem	Schwerpunkt der Propeller
X-Koordinate	0, mm
Y-Koordinate	0, mm
Z-Koordinate	0, mm
Definition	
Masse	1,531 kg
Massenträgheitsmoment X	1,5e+005 kg·mm ²
Massenträgheitsmoment Y	1,5e+005 kg·mm ²
Massenträgheitsmoment Z	3000, kg·mm ²
Verhalten	Verformbar
Pinball-Bereich	Alle
Element APDL Name	
Unterdrückt	Nein

Abb. A.7: Schwerpunkt-Einstellungen der Propellerblätter-Punktmasse aus Kap. 5.1.1

Details von "Lager in Propeller-Richtung" ▾ ▴ □ ×

Grafikeigenschaften	
Sichtbar	Ja
Definition	
Verbindungstyp	Körper-Lagerung
Rotationsebene	Y-Z Ebene
☐ Steifigkeit K11	1,e+005 N/mm
☐ Steifigkeit K22	1,e+005 N/mm
☐ Steifigkeit K12	0, N/mm
☐ Steifigkeit K21	0, N/mm
☐ Dämpfung C11	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C22	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C12	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C21	0, N·s/mm
Unterdrückt	Nein
Mobil	
Zuweisungsmethode	Geometrieauswahl
Zuweisung	1 Fläche
Körper	0.2Welle_mit_orginalen_Bauteilen-Ba...
Koordinatensystem	Globales Koordinatensystem
Mobile X-Koordinate	-330,65 mm
Mobile Y-Koordinate	100,09 mm
Mobile Z-Koordinate	22,993 mm
Verhalten	Verformbar
Pinball-Bereich	Alle

Abb. A.8: Einstellungen des propellerseitigen Lagers aus Kap. 5.1.1

Details von "Lager in Encoder-Richtung" ▾ ▴ □ ×

Grafikeigenschaften	
Sichtbar	Ja
Definition	
Verbindungstyp	Körper-Lagerung
Rotationsebene	Y-Z Ebene
☐ Steifigkeit K11	1,e+005 N/mm
☐ Steifigkeit K22	1,e+005 N/mm
☐ Steifigkeit K12	0, N/mm
☐ Steifigkeit K21	0, N/mm
☐ Dämpfung C11	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C22	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C12	0, N·s/mm
☐ Dämpfung C21	0, N·s/mm
Unterdrückt	Nein
Mobil	
Zuweisungsmethode	Geometrieauswahl
Zuweisung	1 Fläche
Körper	0.2Welle_mit_orginalen_Bauteilen-Ba...
Koordinatensystem	Globales Koordinatensystem
Mobile X-Koordinate	-302,4 mm
Mobile Y-Koordinate	100,4 mm
Mobile Z-Koordinate	22,815 mm
Verhalten	Verformbar
Pinball-Bereich	Alle

Abb. A.9: Einstellungen des encoderseitigen Lagers aus Kap. 5.1.1

Details von "Netz" ▾ 🔍 □

Adaptive Größe verwe...	Ja
Auflösung	4
Netz-Defeaturing	Ja
☐ Defeaturing-Größe	Standardeinstellung
Übergang	Schnell
Spannwinkel	Grob
Globale Netzgröße be...	Baugruppe
Begrenzungsrahmen-...	264,03 mm
Mittlerer Flächeninhalt	36,029 mm ²
Minimale Kantenlänge	1,4142e-002 mm
Qualität	
Netzqualität überprüf...	Ja, Fehler
Fehlergrenzen	Mechanik - Aggressiv
☐ Ziel der Elementqu...	Standardeinstellung (5, e-002)
Glätten	Mittel
Netzqualität	Keine
Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Automatische Prismen...	Keine
Option zur Erzeugun...	Weicher Übergang
☐ Übergangsverhältnis	0,272
☐ Max. Anzahl der Sc...	5
☐ Wachstumsrate	1,2
Algorithmus für die Er...	Pre
Prismenschicht-Eleme...	Keile
Erweiterte Optionen a...	Nein
Erweitert	
Anzahl CPUs für parall...	Programmgesteuert
Elemente mit geraden...	Nein
Starrkörperverhalten	Dimensionsmäßig reduziert
Dreiecks-Oberflächen...	Programmgesteuert
Topologieprüfung	Ja
Pinch-Toleranz	Definieren Sie
Pinch beim Aktualisier...	Nein
Statistik	
☐ Knoten	2159894
☐ Elemente	1227541
Detaillierte Statistiken...	Nein

Abb. A.10: Netzeinstellungen der Modalanalysen aus Kap. 5.1.1

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	8
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Nein
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Aus
Campbell-Diagramm	Aus
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontaktaten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.11: Analyseereinstellungen des ursprünglichen Systems im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.1

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	6
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Ja
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Ein, Stationäres Bezugssystem
Campbell-Diagramm	Ein
Anzahl Punkte	17
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontaktaten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Dämpfungssteuerungen	
☐ Konstanter Verlustfaktor	0,
☐ Beta-Dämpfung definiert durch	Direkte Eingabe
☐ Beta-Dämpfungswert	0,
☐ Alpha-Dämpfungswert	0,
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.12: Analyseereinstellungen des ursprünglichen Systems im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.1

Tabellarische Daten		
	Punkte	☒ Rotationsgeschwindigkeit [U/min]
1	1	0,
2	2	93,75
3	3	187,5
4	4	281,25
5	5	375,
6	6	468,75
7	7	562,5
8	8	656,25
9	9	750,
10	10	968,75
11	11	1187,5
12	12	1406,3
13	13	1625,
14	14	1843,7
15	15	2062,5
16	16	2281,3
17	17	2500,

Abb. A.13: betrachtete Frequenzbereich der Modalanalyse aus Kap. 5.1.1

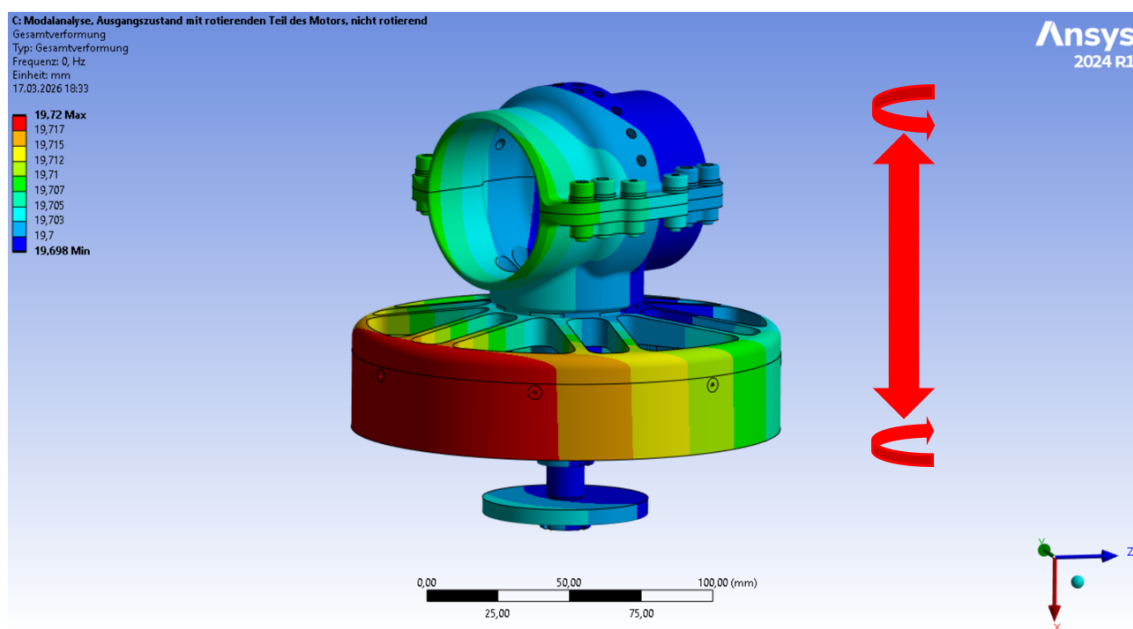


Abb. A.14: erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

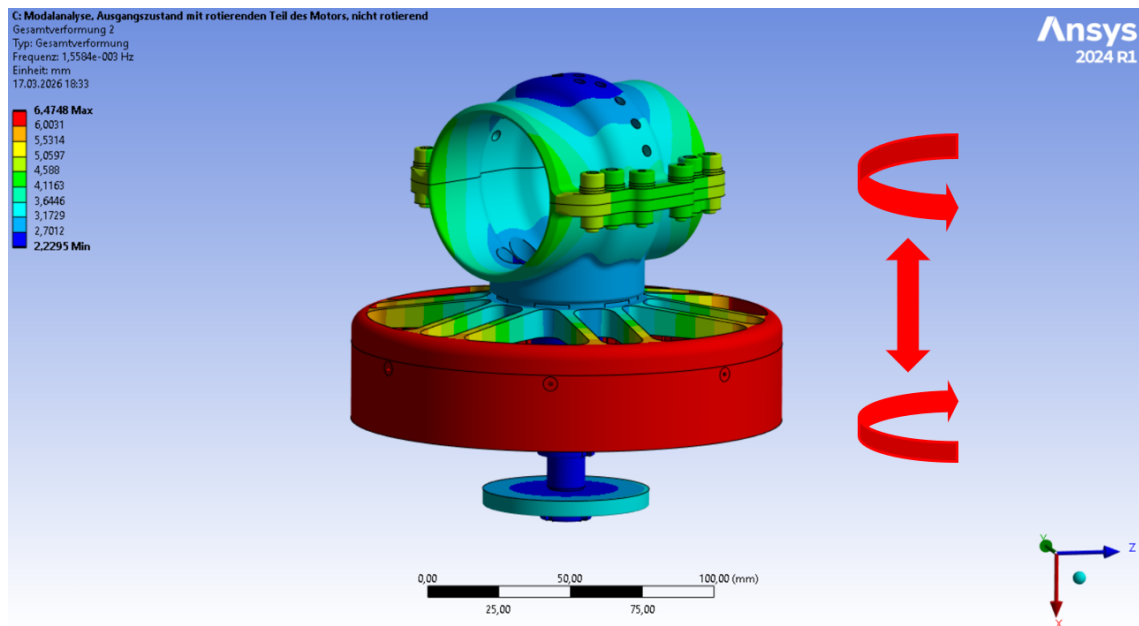


Abb. A.15: zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

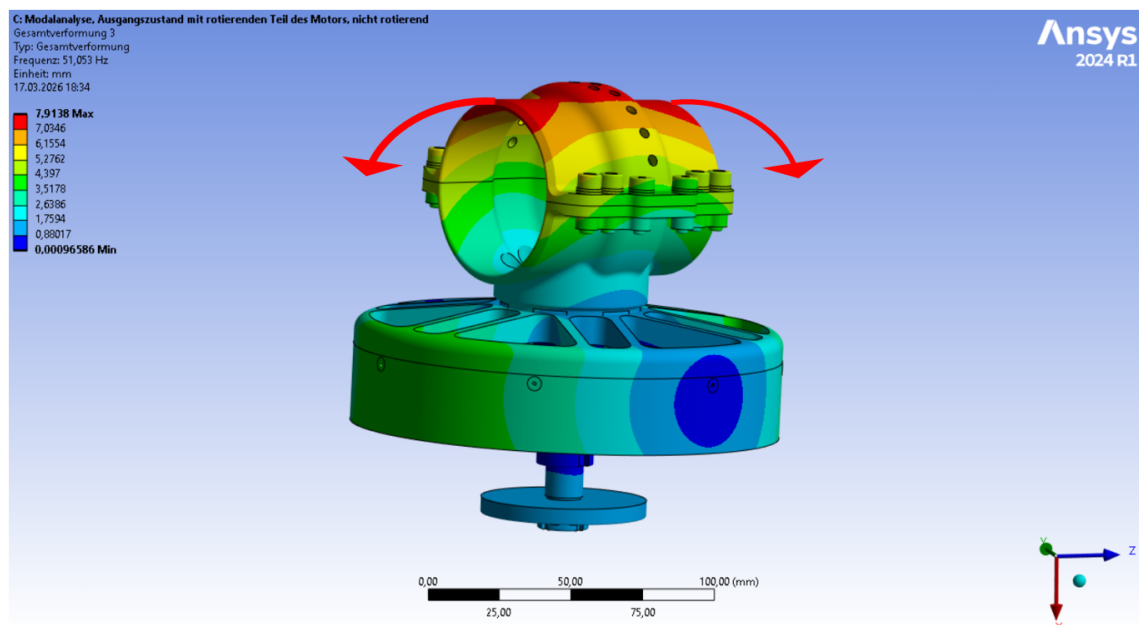


Abb. A.16: dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

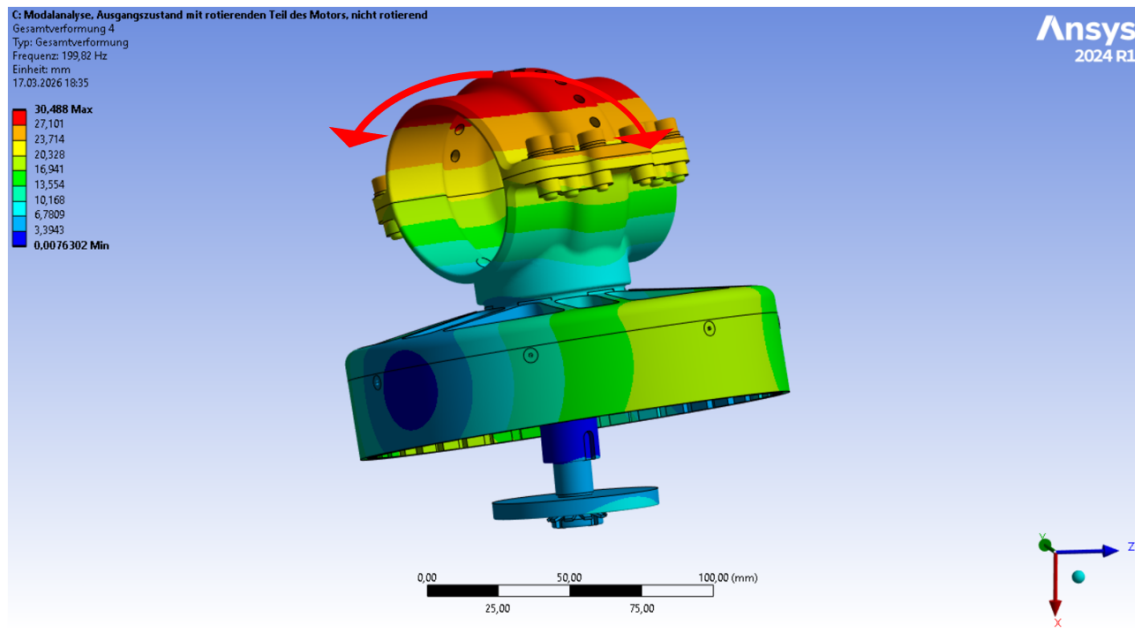


Abb. A.17: vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

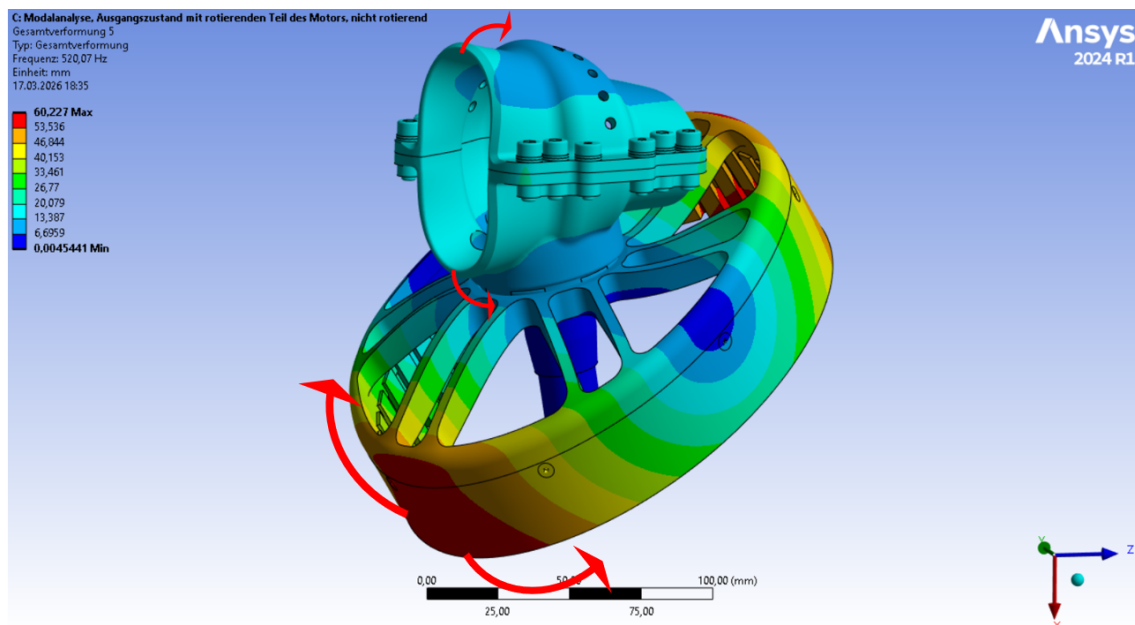


Abb. A.18: fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

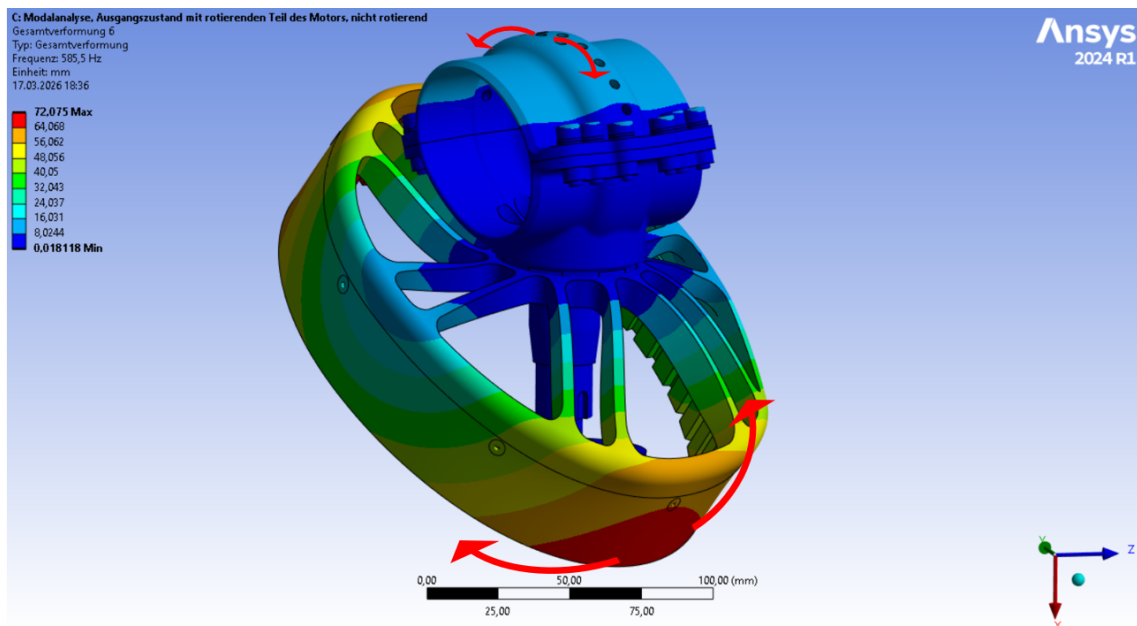


Abb. A.19: sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.1

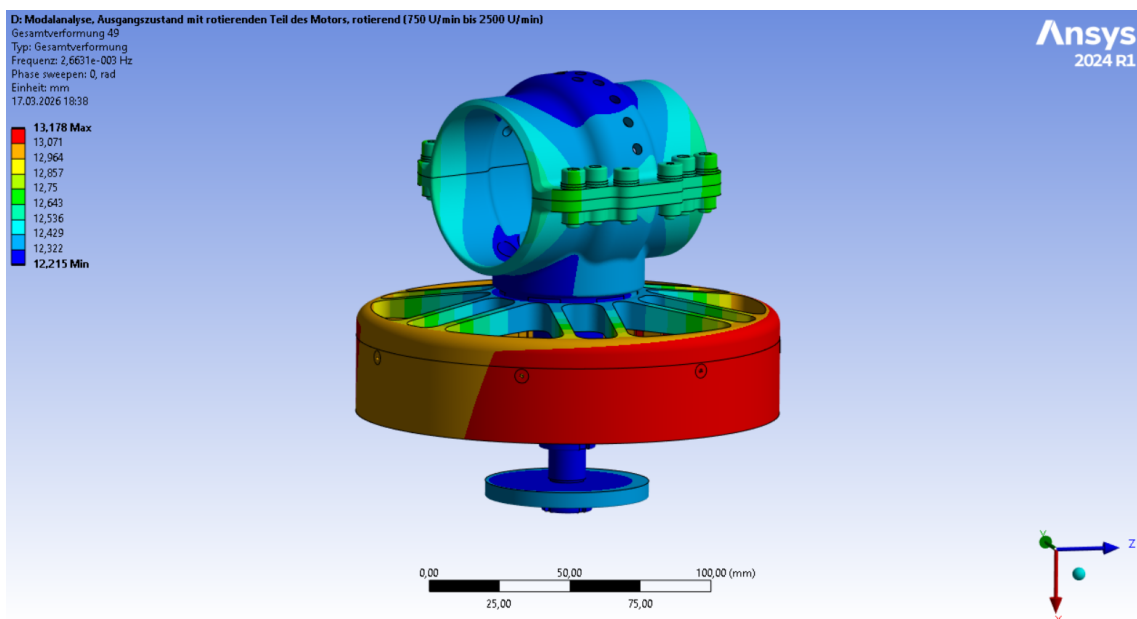


Abb. A.20: erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

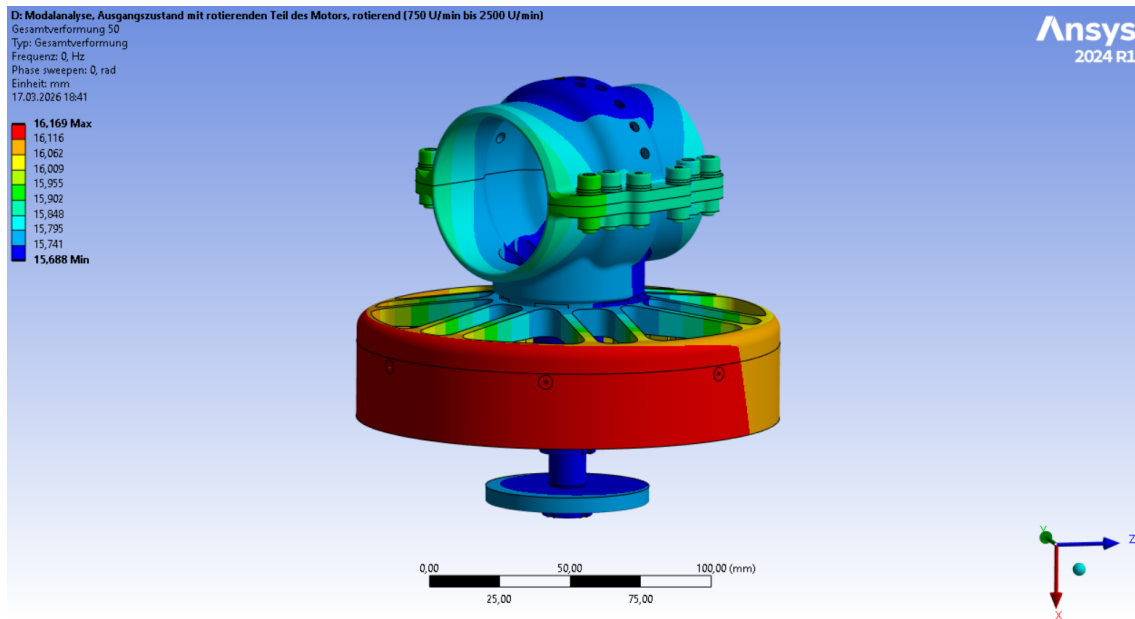


Abb. A.21: zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

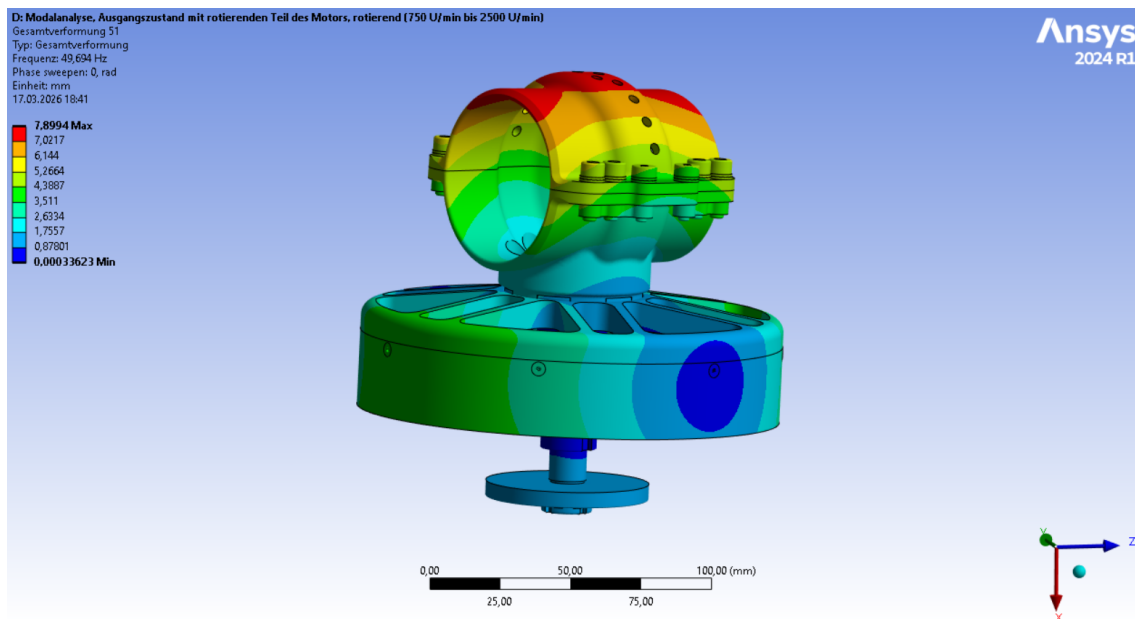


Abb. A.22: dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

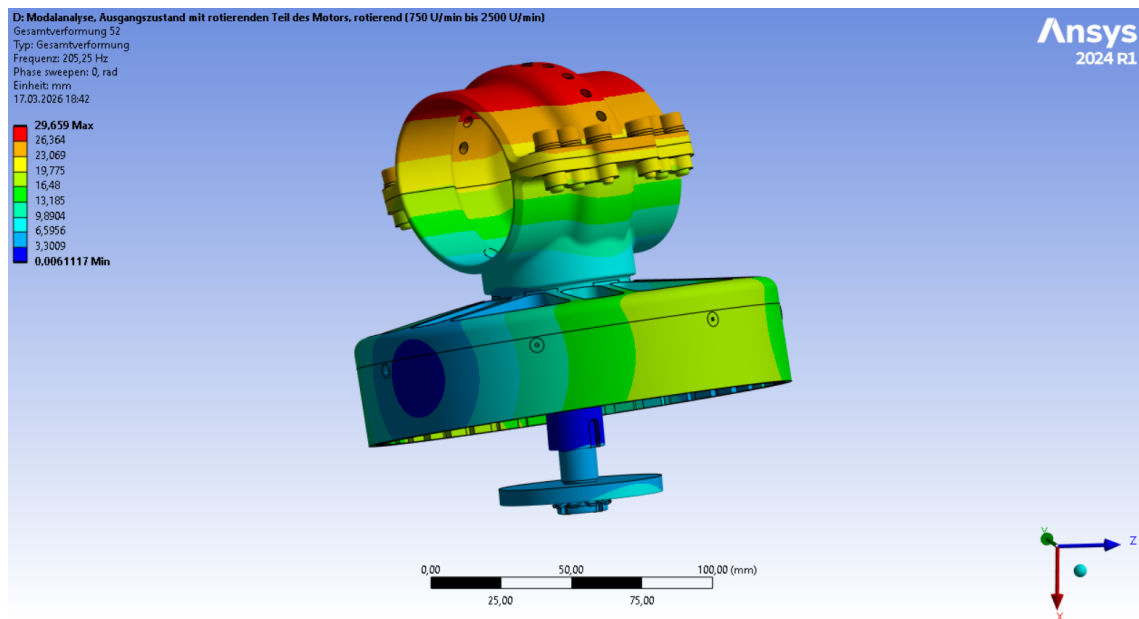


Abb. A.23: vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

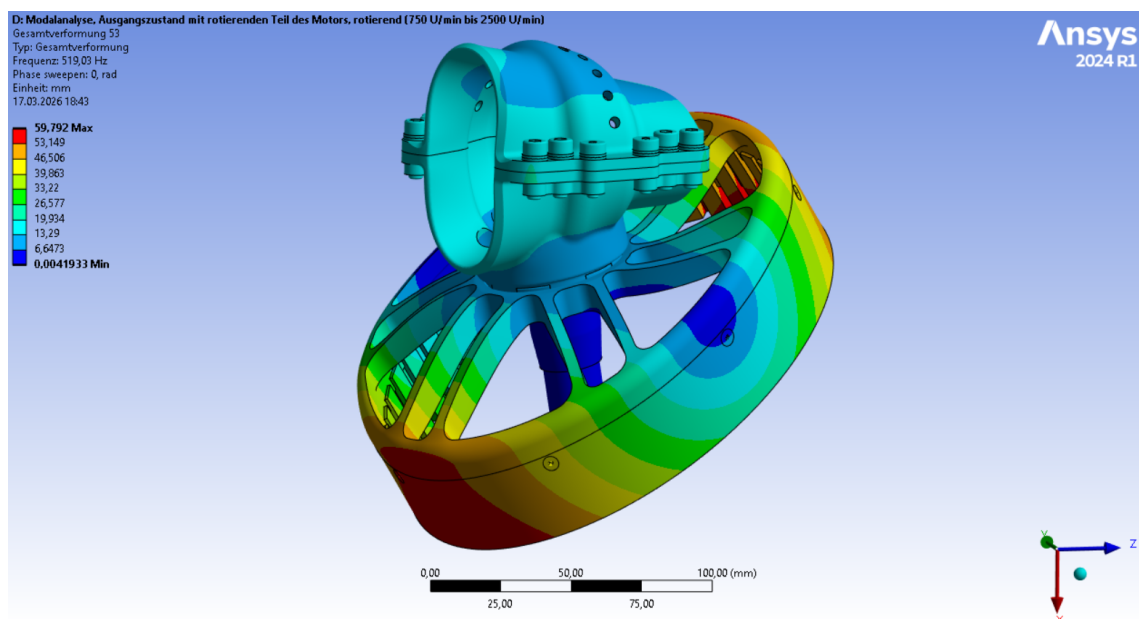


Abb. A.24: fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

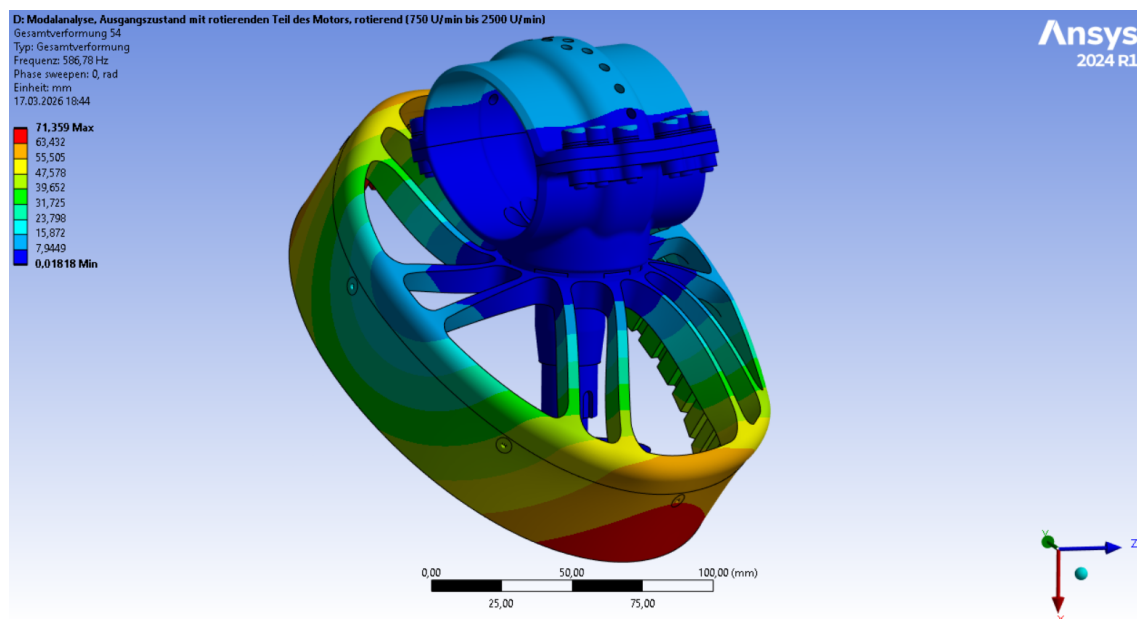


Abb. A.25: sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

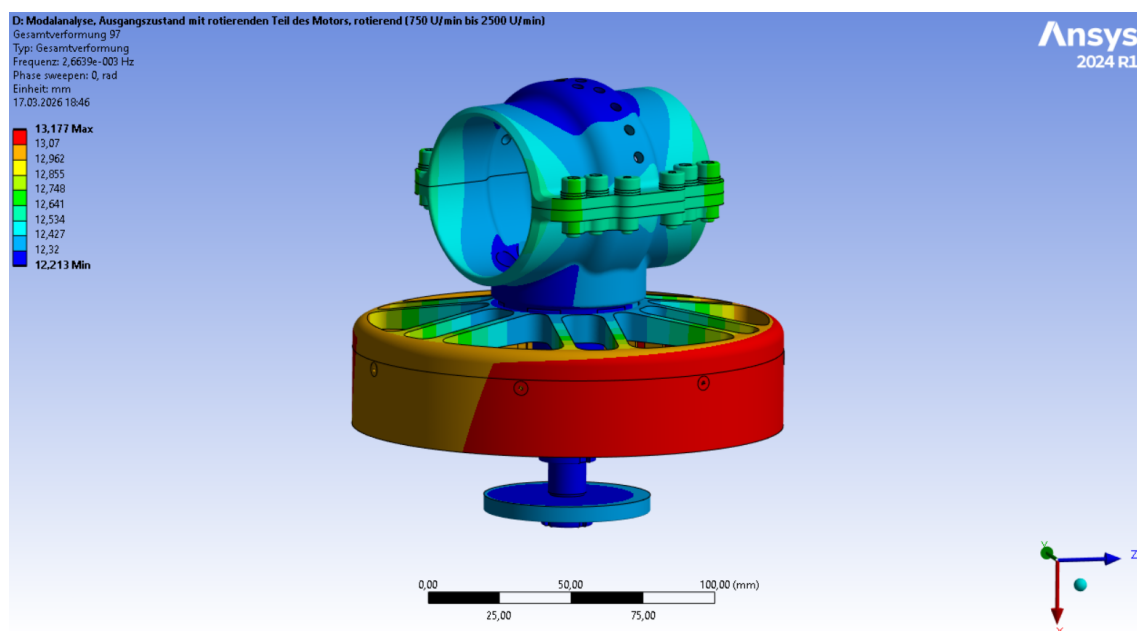


Abb. A.26: erste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

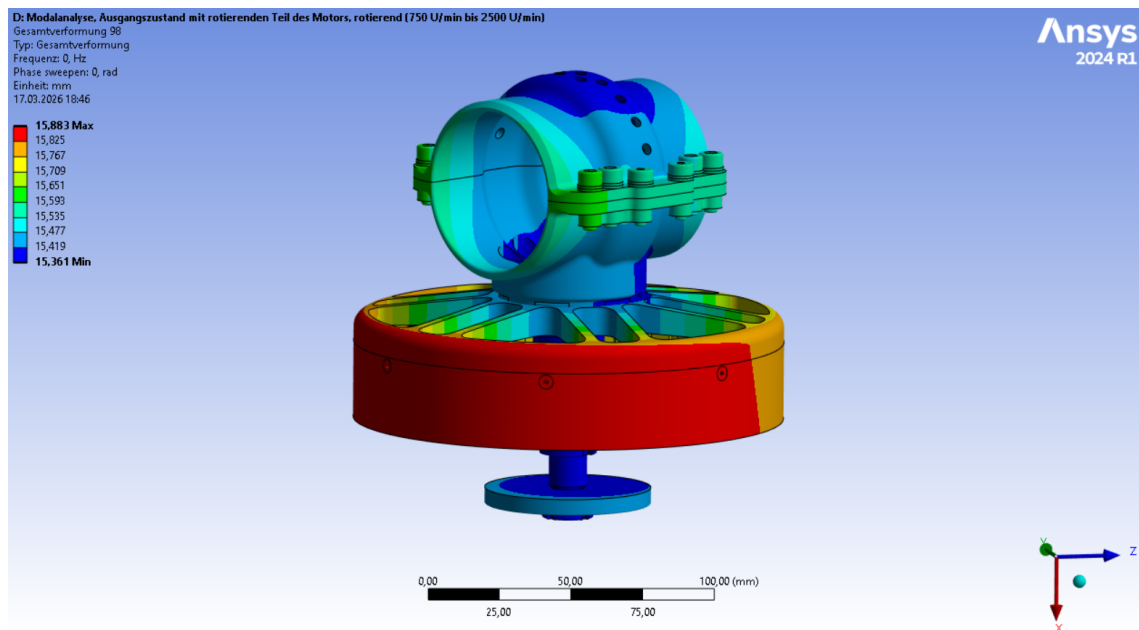


Abb. A.27: zweite Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1

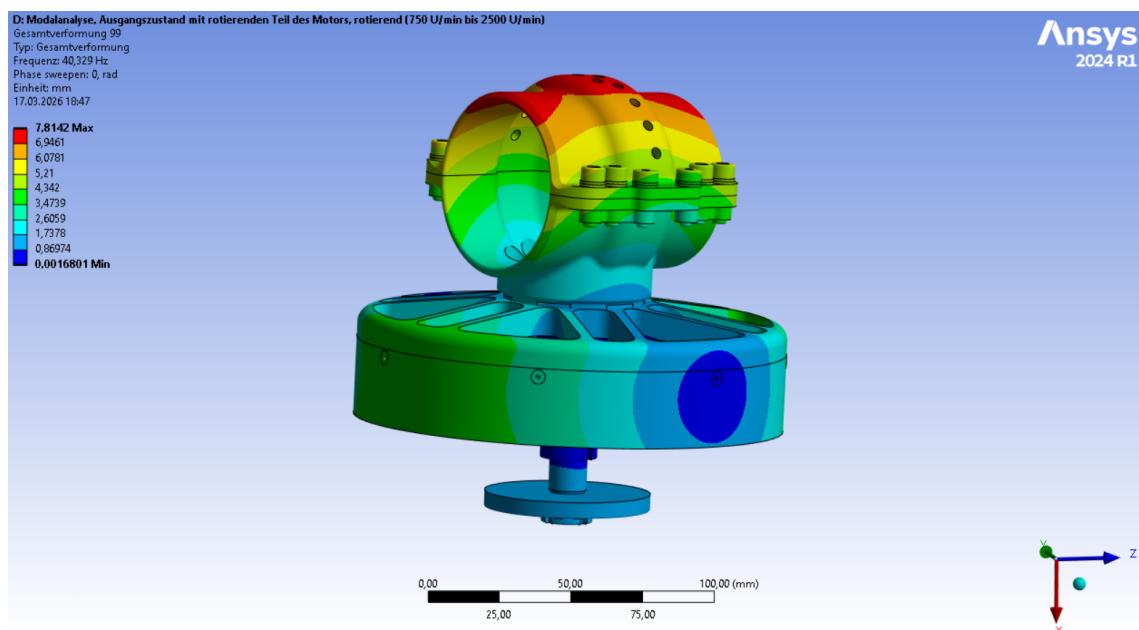


Abb. A.28: dritte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1

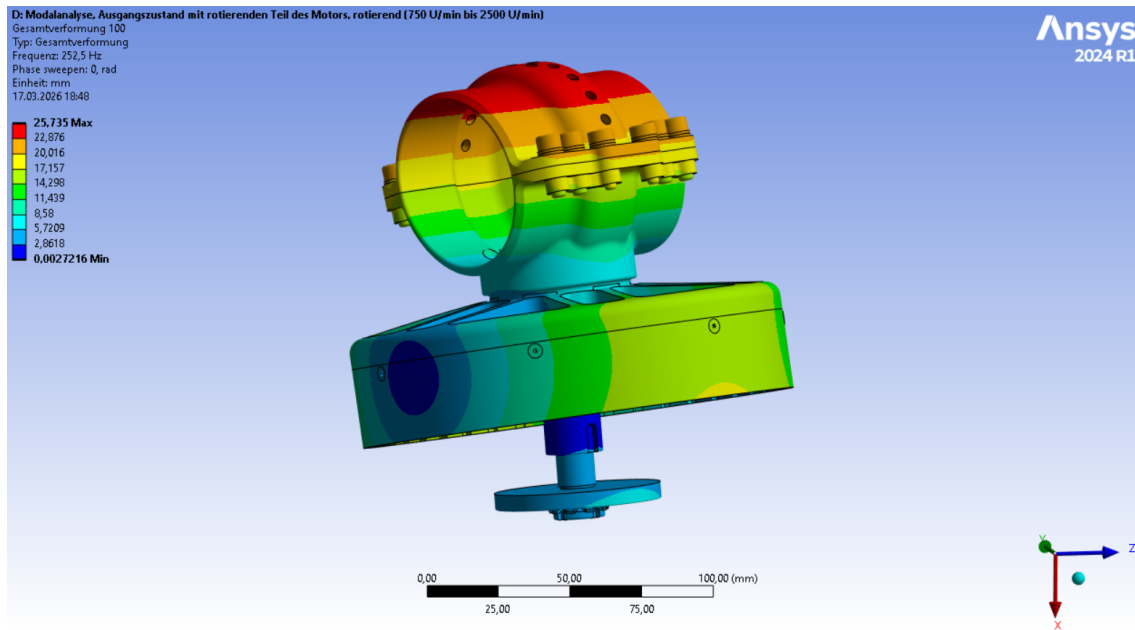


Abb. A.29: vierte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1

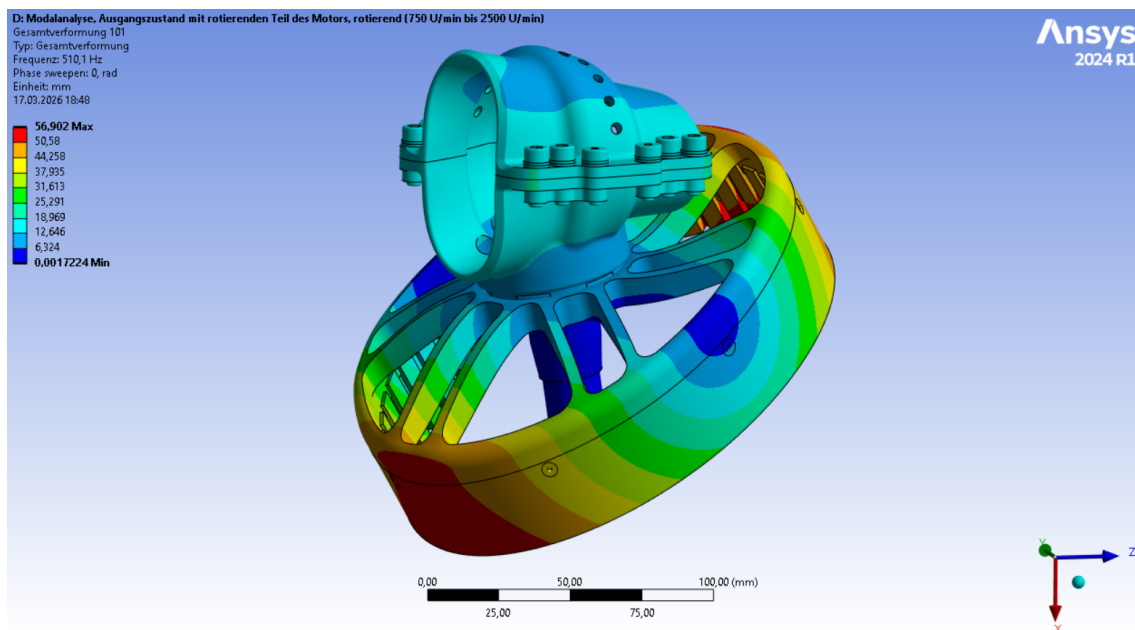


Abb. A.30: fünfte Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{U}{min}$ aus Kap. 5.1.1

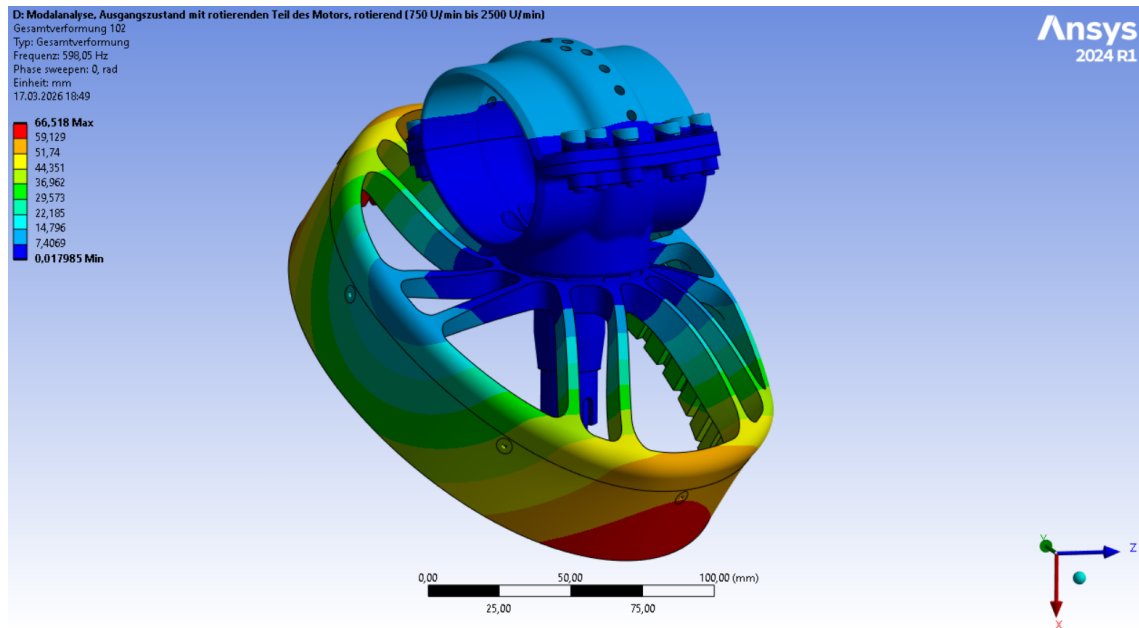


Abb. A.31: sechste Eigenfrequenz der rotierenden Originalbaugruppe, rotierender Zustand, $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.1

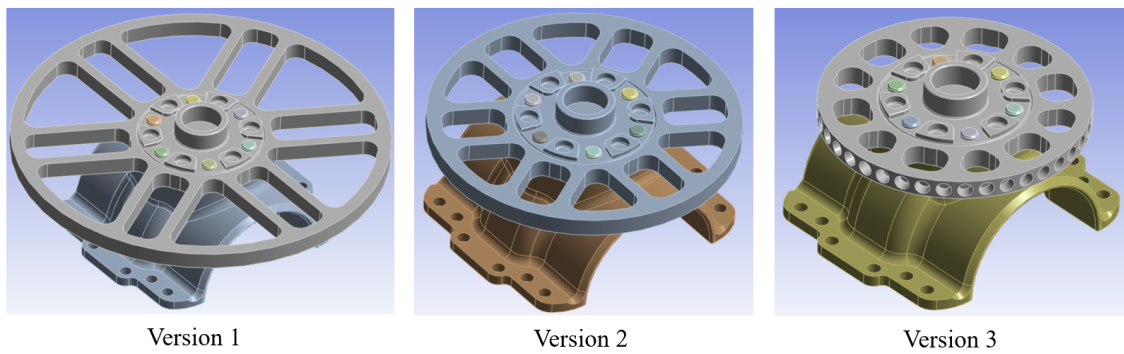


Abb. A.32: Kombinationsübersicht der einzelnen Auswuchtssysteme (Antriebswellenseitig) aus Kap. 5.1.2

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	19
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Nein
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Aus
Campbell-Diagramm	Aus
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontaktaten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.33: Analyseereinstellungen des des einzelnen Auswuchtsystems am Beispiel der Variante mit 90 mm Außendurchmesser im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.2

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	22
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Ja
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Ein, Stationäres Bezugssystem
Campbell-Diagramm	Ein
Anzahl Punkte	17
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontaktaten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Dämpfungssteuerungen	
☐ Konstanter Verlustfaktor	0,
Beta-Dämpfung definiert durch	Direkte Eingabe
☐ Beta-Dämpfungswert	0,
☐ Alpha-Dämpfungswert	0,
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.34: Analyseereinstellungen des des einzelnen Auswuchtsystems am Beispiel der Variante mit 90 mm Außendurchmesser im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.2

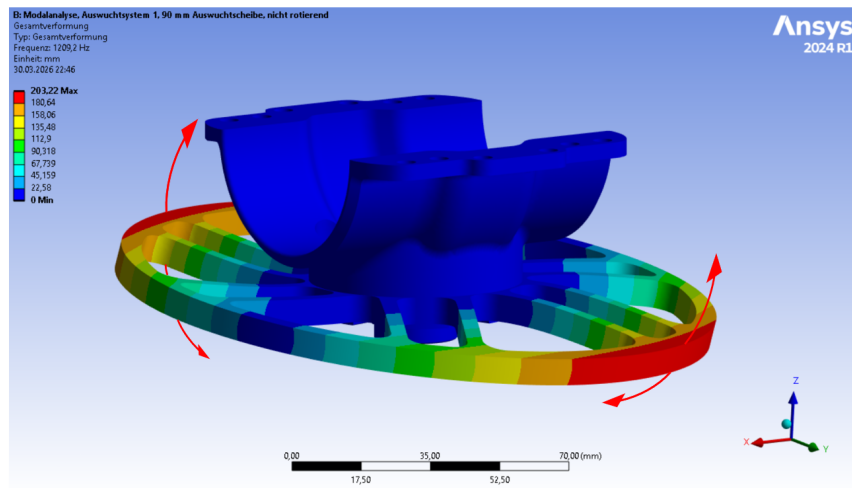


Abb. A.35: erste Eigenfrequenz der ersten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2

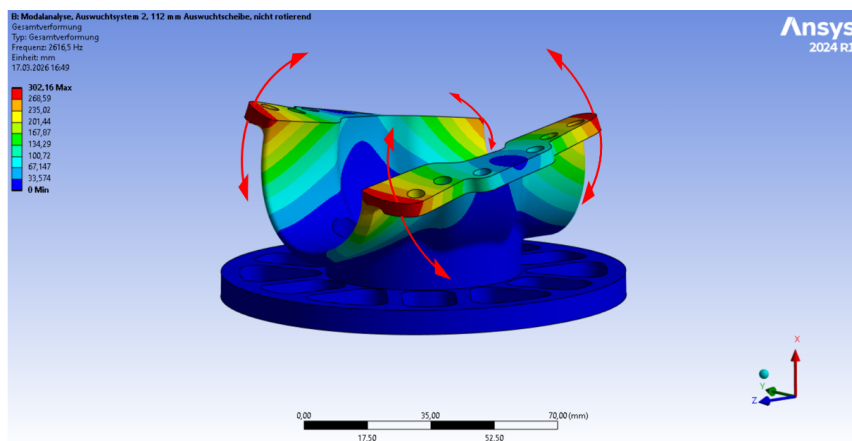


Abb. A.36: zweite Eigenfrequenz der zweiten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2

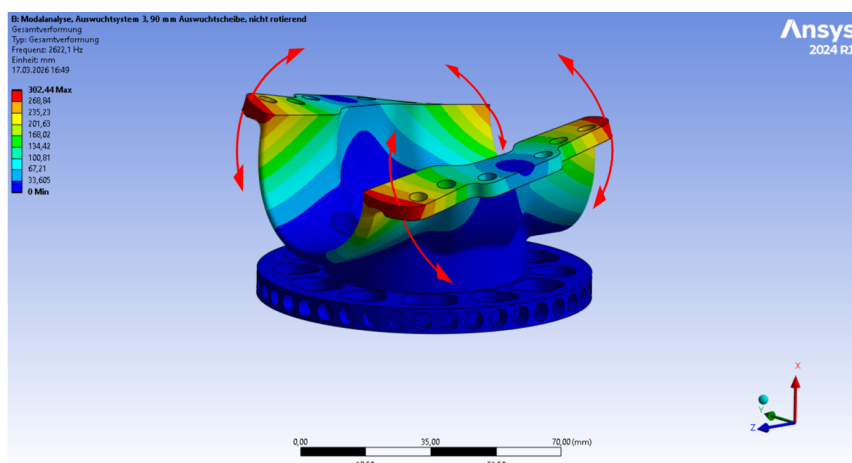


Abb. A.37: dritte Eigenfrequenz der dritten Version des Auswuchtsystems, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2

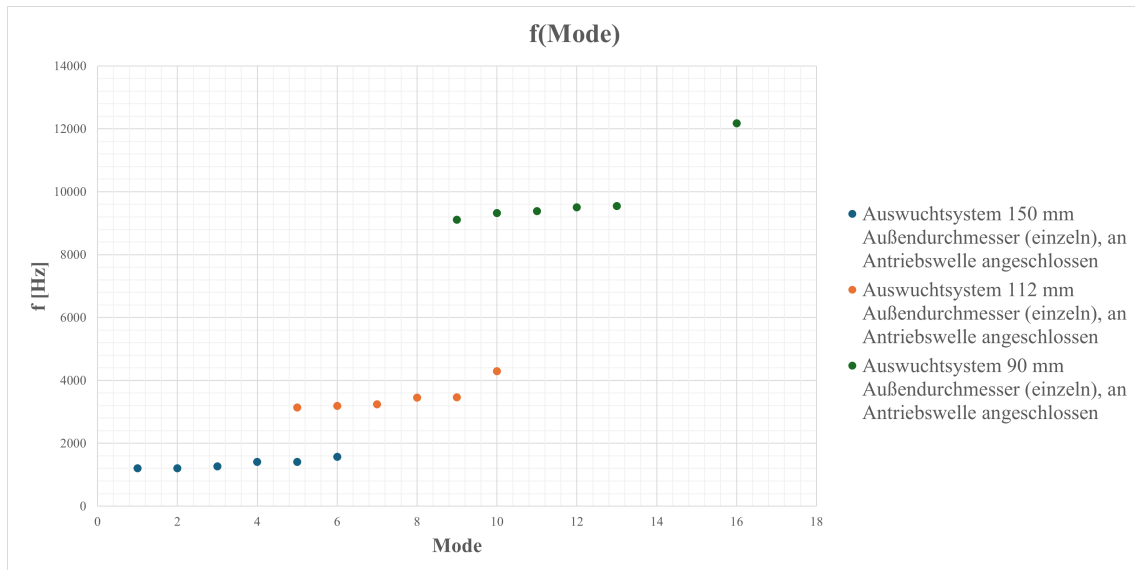


Abb. A.38: Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtsysteme, an Antriebswelle angeschlossener Zustand aus Kap. 5.1.2

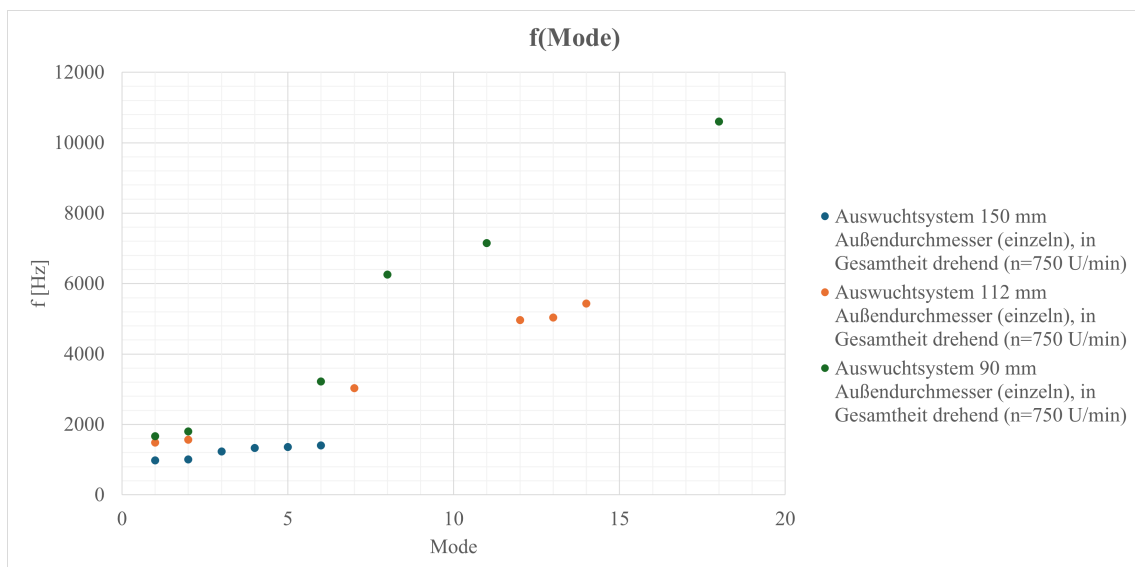


Abb. A.39: Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtsysteme, im ganzen drehender Zustand $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.2

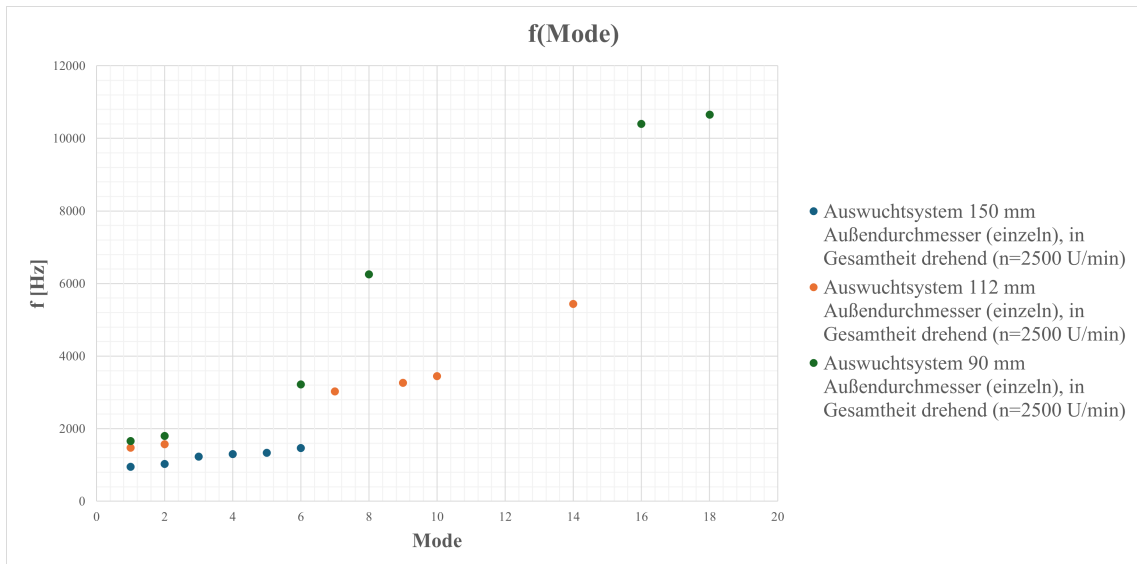


Abb. A.40: Eigenfrequenzen-Vergleichsdiagramm der Auswuchtssysteme, im ganzen drehender Zustand $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.2

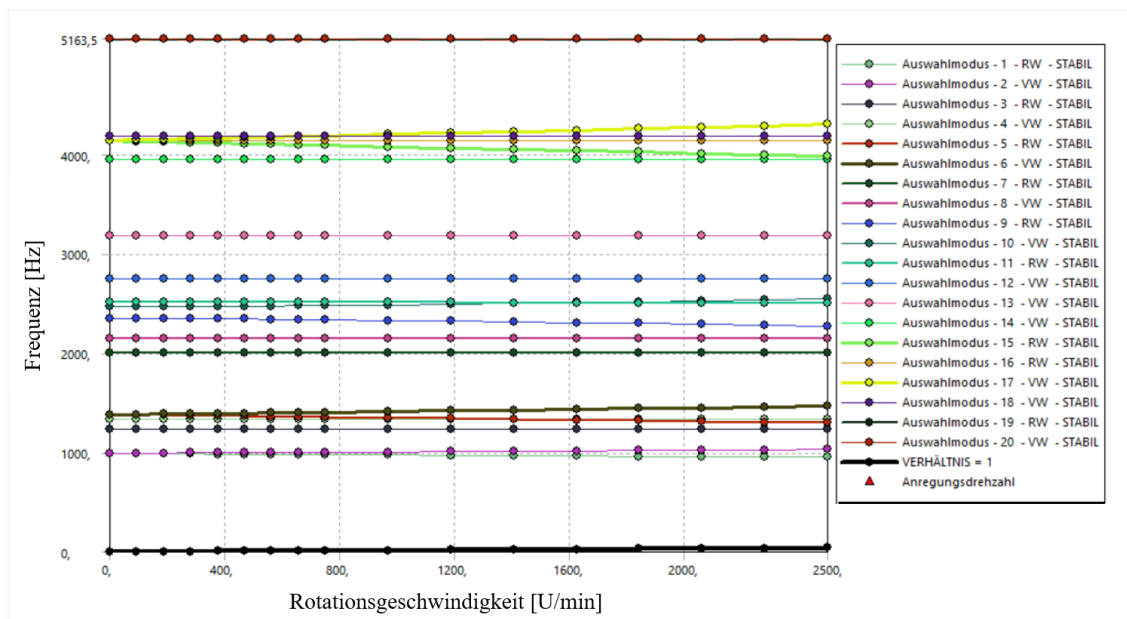


Abb. A.41: Campbell-Diagramm des Auswuchtssystem 1, 150 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2

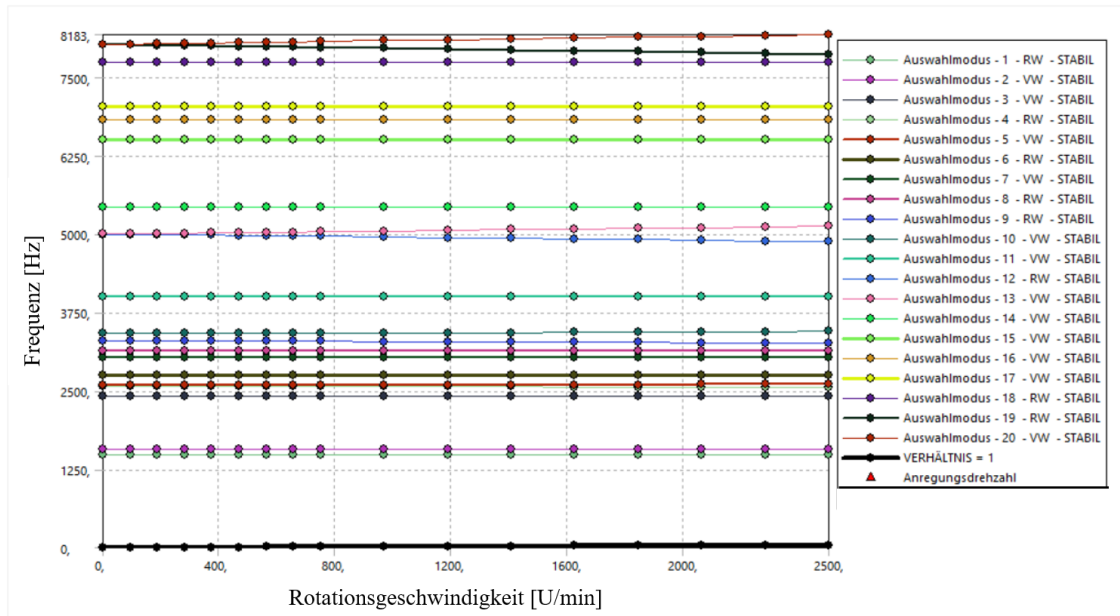


Abb. A.42: Campbell-Diagramm des Auswuchtungs-System 2, 112 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2

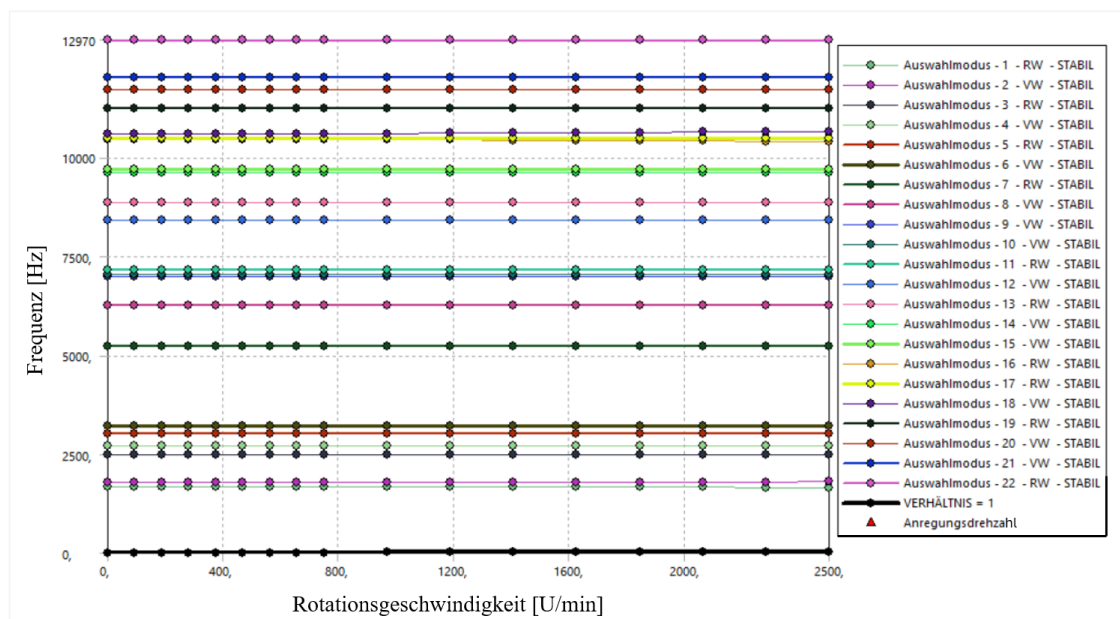


Abb. A.43: Campbell-Diagramm des Auswuchtungs-System 3, 90 mm Auswuchtring-Außendurchmesser, im ganzen drehender Zustand aus Kap. 5.1.2

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	6
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Nein
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Aus
Campbell-Diagramm	Aus
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontakt Daten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.44: Analyseereinstellungen der Kombinationen am Beispiel von Kombination 1 im nicht rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.3

Details von "Analyseereinstellungen"	
Optionen	
Höchstanzahl zu suchender Moden	6
Frequenzbereich einschränken?	Nein
Option Expansion auf Anfrage	Programmgesteuert
-- Expansion auf Anfrage	Nein
Solver-Steuerungen	
Gedämpft	Ja
Solver-Typ	Programmgesteuert
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Ein, Stationäres Bezugssystem
Campbell-Diagramm	Ein
Anzahl Punkte	17
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Nein
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Nein
Kontakt Daten	Nein
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Nein
Euler-Winkel	Nein
Reaktionskräfte berechnen	Nein
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Dämpfungssteuerungen	
☐ Konstanter Verlustfaktor	0,
☐ Beta-Dämpfung definiert durch	Direkte Eingabe
☐ Beta-Dämpfungswert	0,
☐ Alpha-Dämpfungswert	0,
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.45: Analyseereinstellungen der Kombinationen am Beispiel von Kombination 1 im rotierenden Zustand aus Kap. 5.1.3

Tab. A.8: Eigenfrequenztafel der Kombination 1, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

nicht rotierend		rotierend, n=750 [1/min]		rotierend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
1	0,0	1	0,0	1	0,0
2	0,0	2	0,0	2	0,0
3	51,7	3	50,4	3	41,2
4	193,2	4	198,2	4	242,0
5	497,8	5	497,2	5	491,6
6	590,8	6	591,6	6	599,3

Tab. A.9: Eigenfrequenztafel der Kombination 2, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

nicht rotierend		rotierend, n=750 [1/min]		rotierend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
1	0,0	1	0,0	1	0,0
2	0,0	2	0,0	2	0,0
3	51,7	3	50,4	3	41,2
4	203,5	4	208,8	4	255,1
5	519,8	5	518,8	5	510,7
6	593,3	6	594,4	6	605,1

Tab. A.10: Eigenfrequenztafel der Kombination 3, nicht rotierender und rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

nicht rotierend		rotierend, n=750 [1/min]		rotierend, n=2500 [1/min]	
Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]	Mode	Frequenz [Hz]
1	0,0	1	0,0	1	0,0
2	0,0	2	0,0	2	0,0
3	51,6	3	50,3	3	41,1
4	193,7	4	198,8	4	242,9
5	502,8	5	502,1	5	496,1
6	590,8	6	591,6	6	599,8

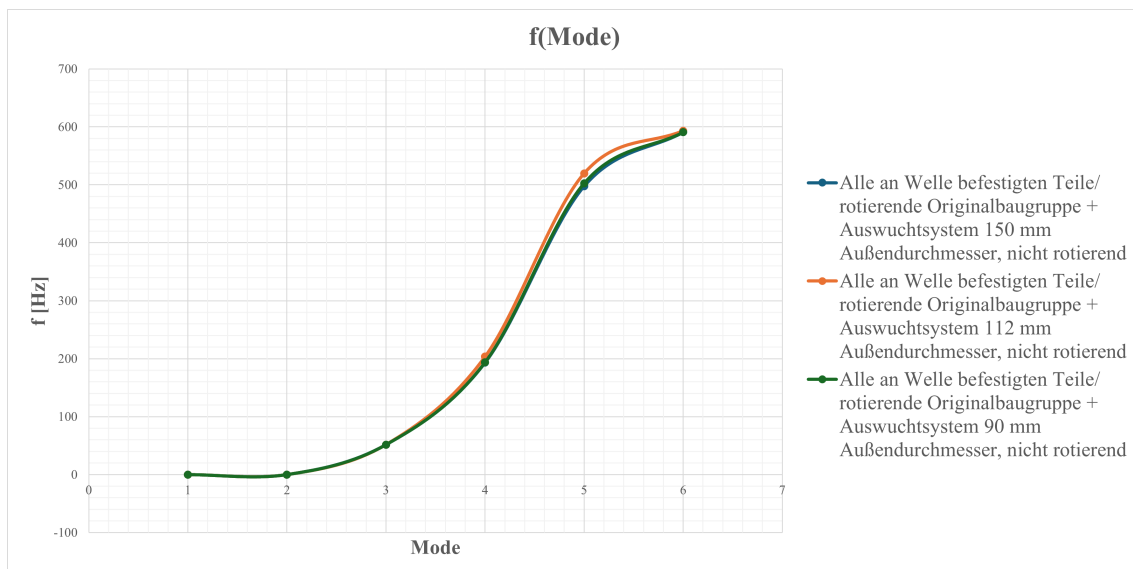


Abb. A.46: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

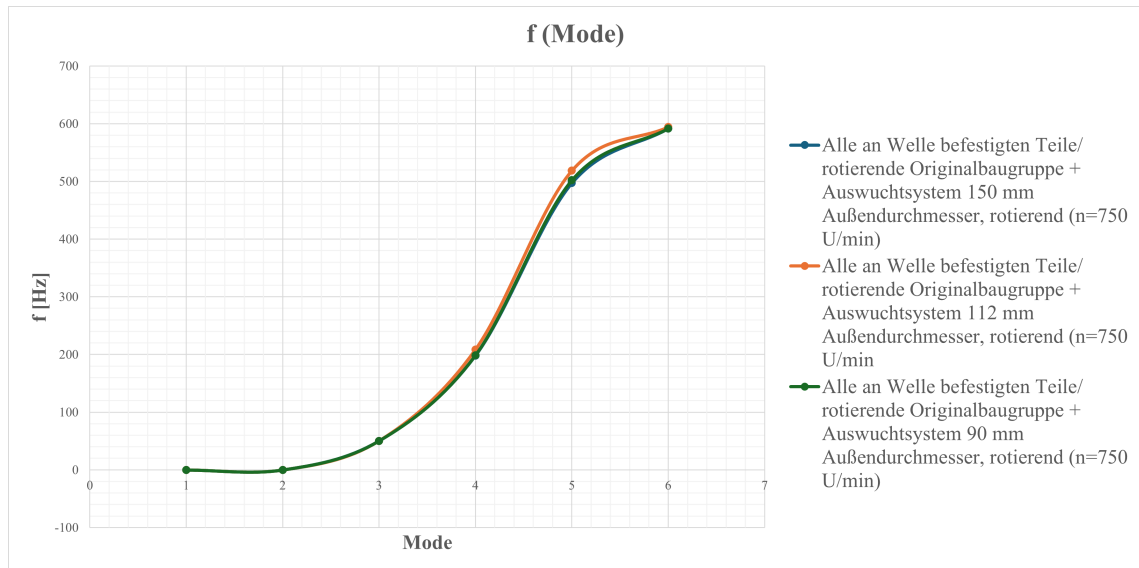


Abb. A.47: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, rotierender Zustand $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

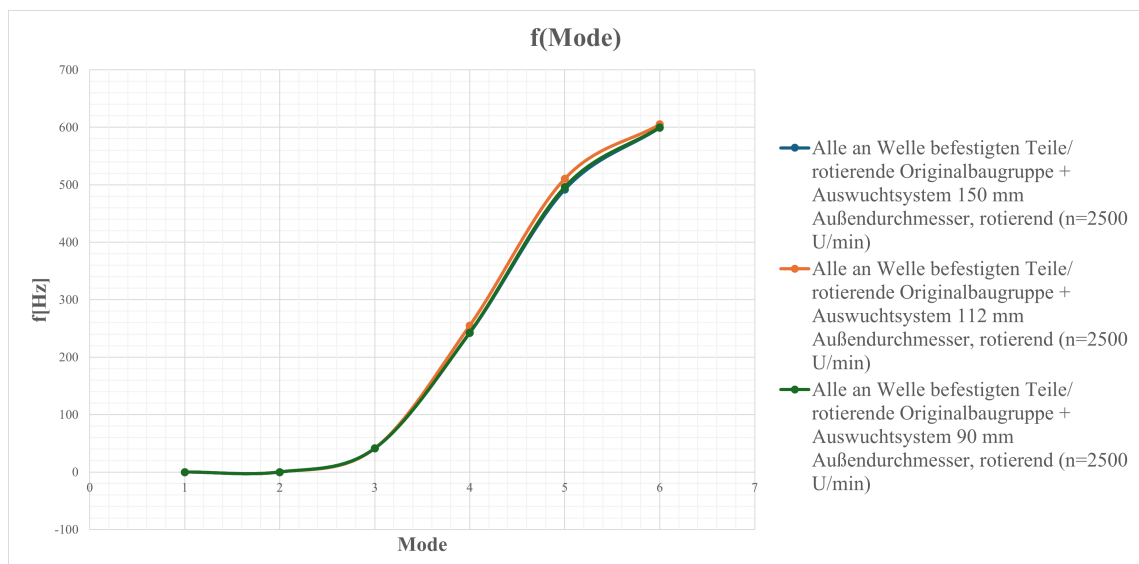


Abb. A.48: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm der Kombinationen, rotierender Zustand $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

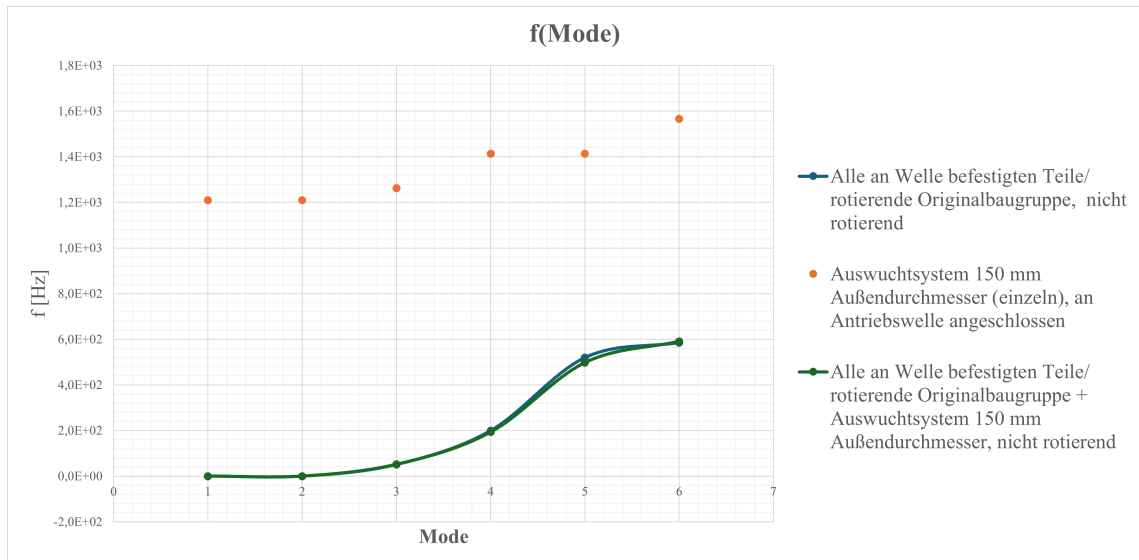


Abb. A.49: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

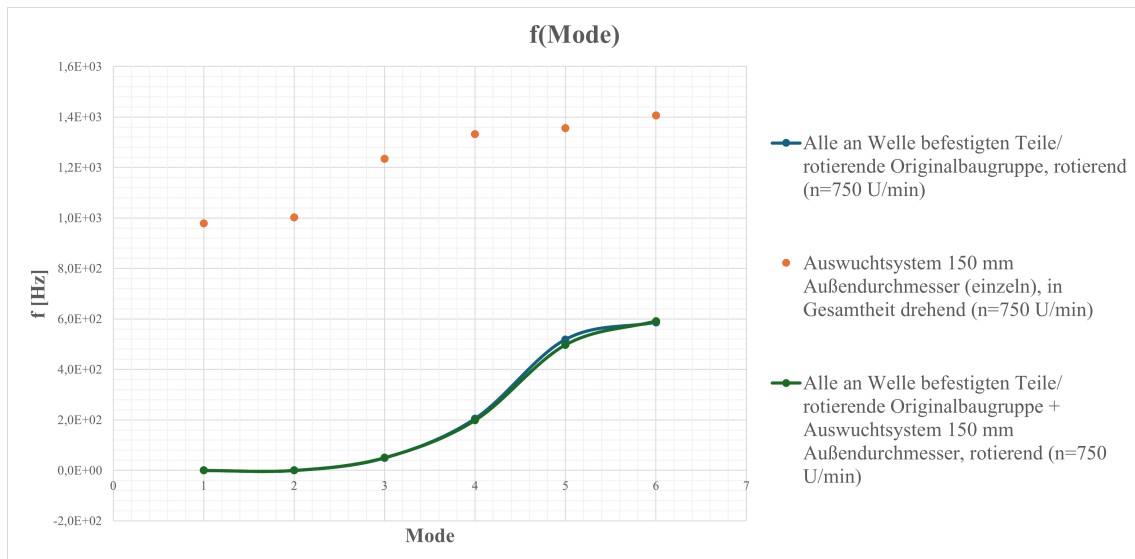


Abb. A.50: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, rotierender Zustand $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

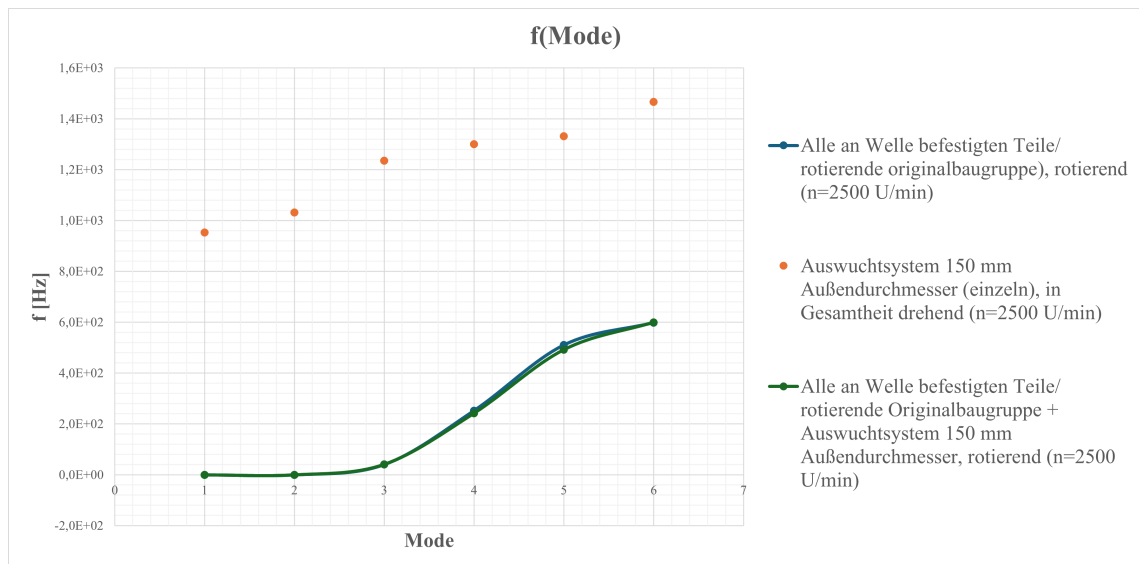


Abb. A.51: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 1 und Kombination 1, rotierender Zustand $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

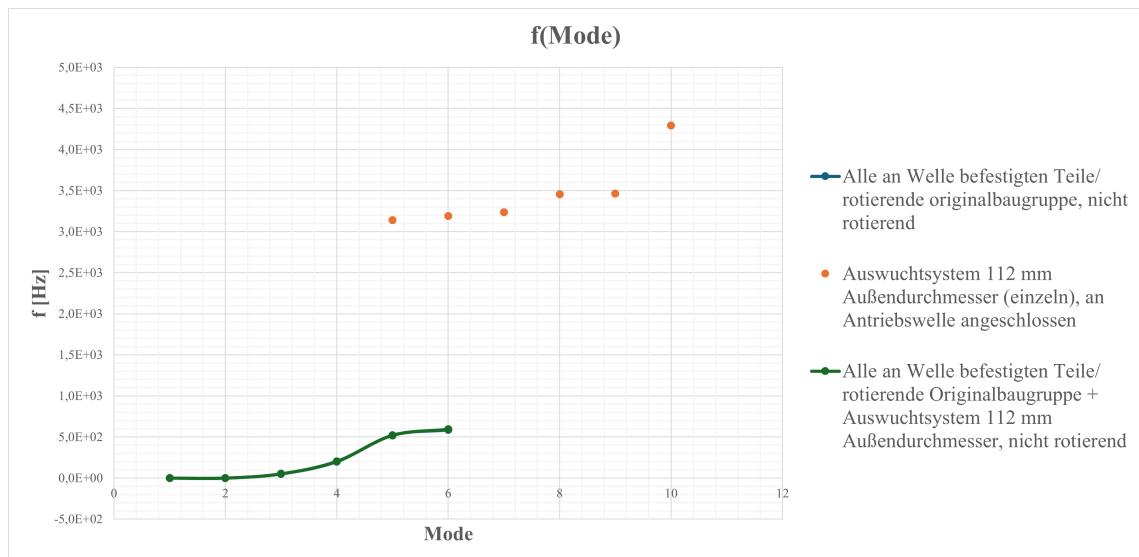


Abb. A.52: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

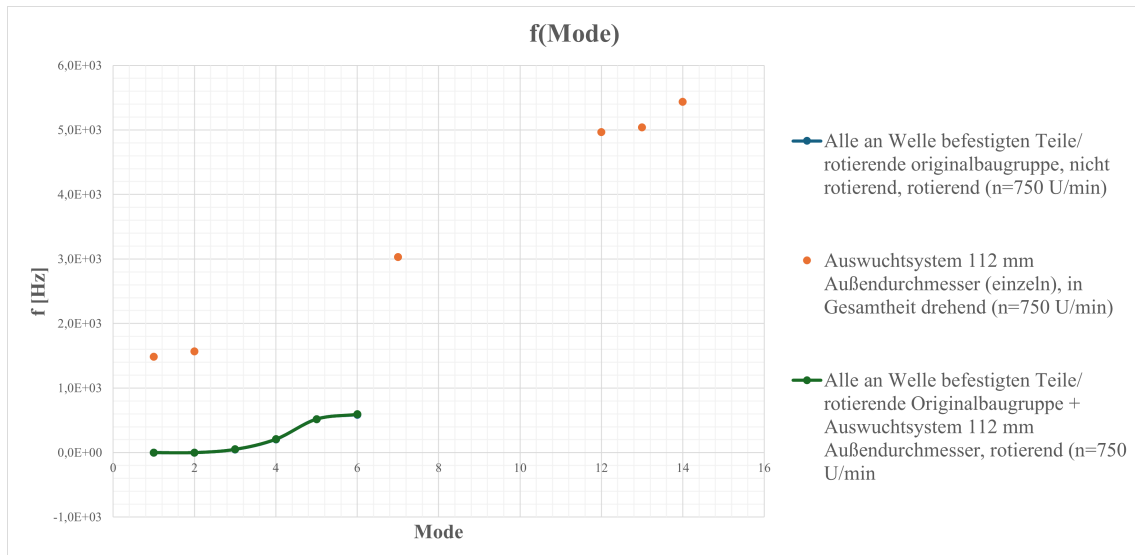


Abb. A.53: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, rotierender Zustand $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

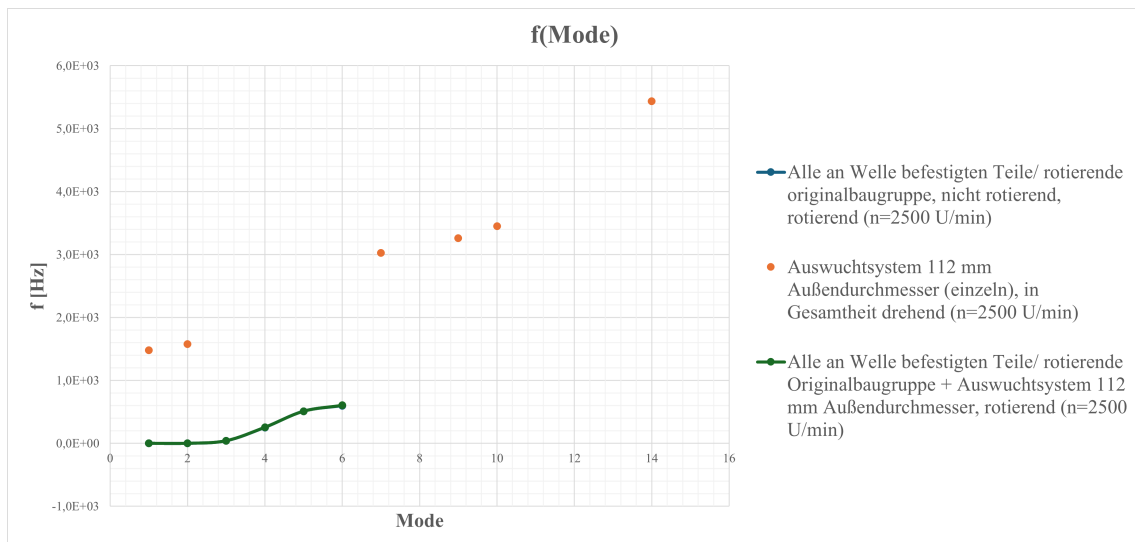


Abb. A.54: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 2 und Kombination 2, rotierender Zustand $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

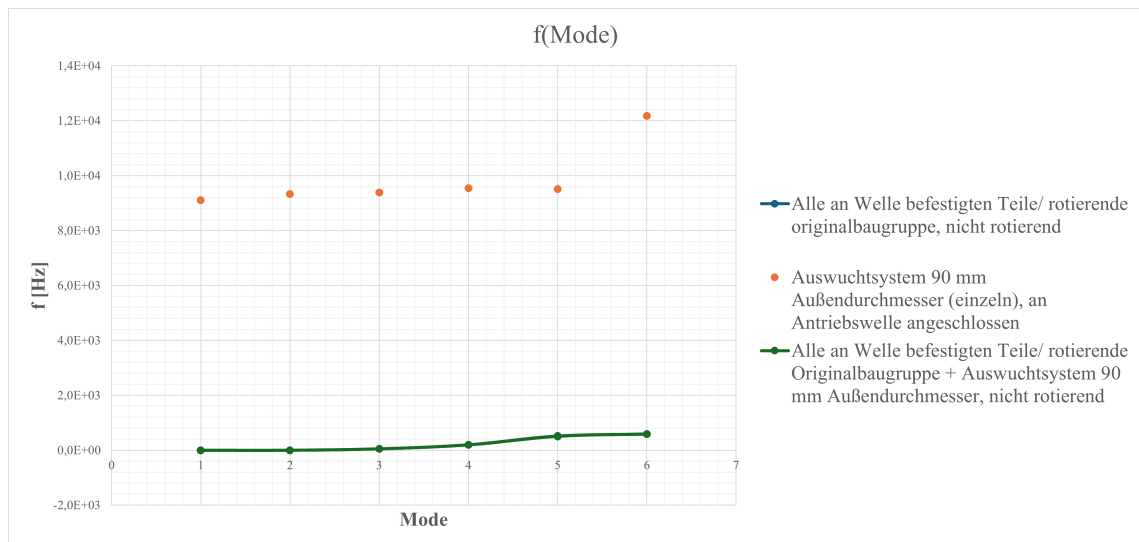


Abb. A.55: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, nicht rotierender Zustand aus Kap. 5.1.3

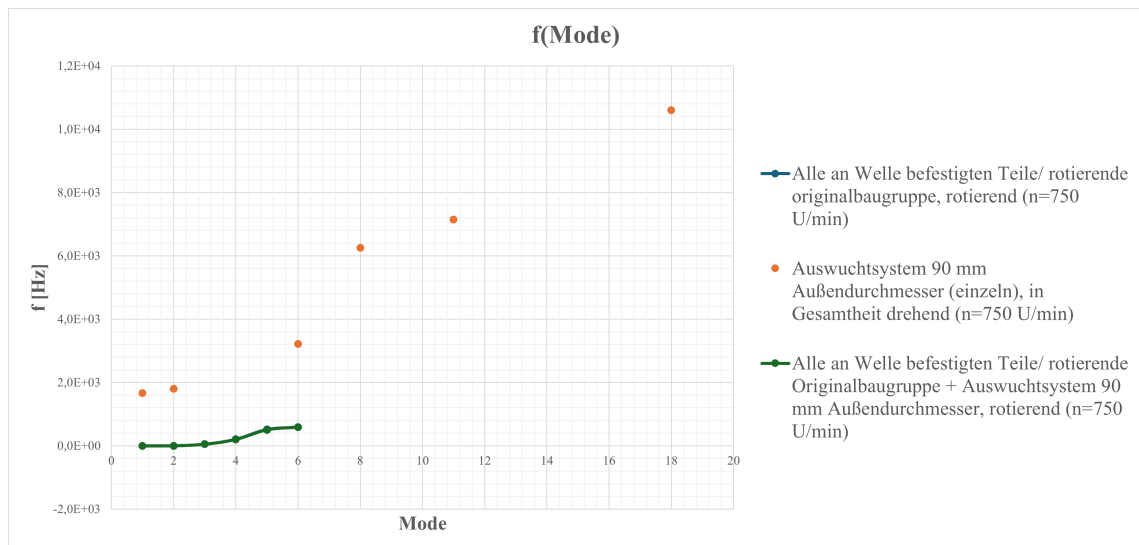


Abb. A.56: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, rotierender Zustand $750 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

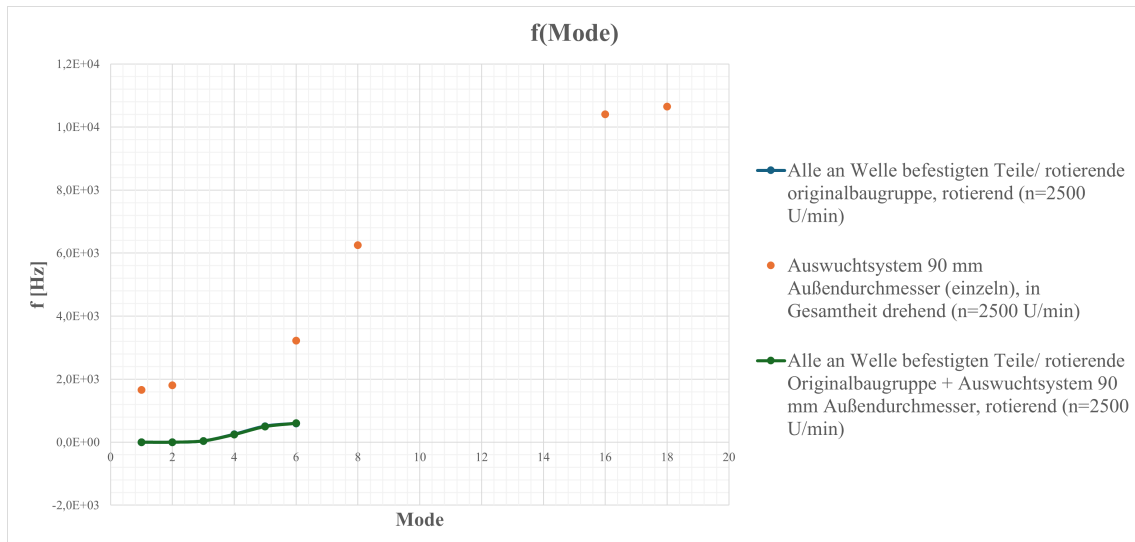


Abb. A.57: Eigenfrequenz-Vergleichsdiagramm zwischen Originalbaugruppe, einzelnen Auswuchtsystem 3 und Kombination 3, rotierender Zustand $2500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ aus Kap. 5.1.3

Auswahlmodus	Umlaufsinn	Stabilität	Anregungsdrehzahl
1,	UNBESTIMMT	STABIL	0,15978 U/min
2,	UNBESTIMMT	INSTABIL	0, U/min
3,	RW	STABIL	2441, U/min
4,	VW	STABIL	0, U/min

Abb. A.58: Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zum Ausgangszustand aus Kap. 5.1.3

Auswahlmodus	Umlaufsinn	Stabilität	Anregungsdrehzahl
1,	UNBESTIMMT	INSTABIL	0, U/min
2,	UNBESTIMMT	STABIL	0,18701 U/min
3,	RW	STABIL	2479, U/min
4,	VW	STABIL	0, U/min

Abb. A.59: Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 1 aus Kap. 5.1.3

Auswahlmodus	Umlaufsinn	Stabilität	Anregungsdrehzahl
1,	UNBESTIMMT	INSTABIL	0, U/min
2,	UNBESTIMMT	INSTABIL	0, U/min
3,	RW	STABIL	2478,4 U/min
4,	VW	STABIL	0, U/min

Abb. A.60: Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 2 aus Kap. 5.1.3

Auswahlmodus	Umlaufsinn	Stabilität	Anregungsdrehzahl
1,	UNBESTIMMT	STABIL	9,4254e-002 U/min
2,	UNBESTIMMT	INSTABIL	0, U/min
3,	RW	STABIL	2473,6 U/min
4,	VW	STABIL	0, U/min

Abb. A.61: Schnittpunkte mit Eigenfrequenzen in Campbell-Diagramm zur Kombination 3 aus Kap. 5.1.3

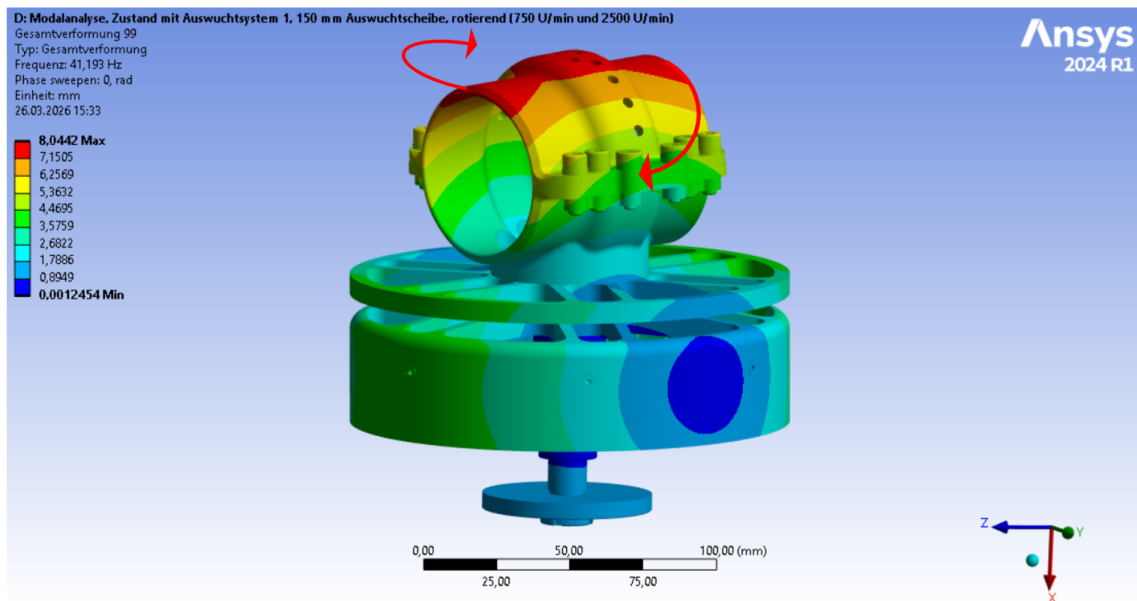


Abb. A.62: Rotation-West bei 3. Eigenfrequenz der Kombination 1 aus Kap. 5.1.3

Tab. A.11: Berechnungstabelle des erlaubten Massenzuwachs aus Kap. 5.1.3

Massenzuwachs auf Motor-Propeller-System bezogen			
Masse des Motor-Propeller-Systems ohne Auswuchtsystem			
Komponentenname	Anzahl d. Komponenten [-]	Einzelmasse [g]	Komponentenmasse [g]
BS-007-082-06-01-06 Gewindeleiste	4	4,7	18,8
NL5-Nord-Lock	12	0,6	6,9
Ganter Passschraube ISO 7379-5-M4-8	4	3,8	15,1
Zylinderschraube ISO 4762 M5x16 10.9	8	4,4	34,9
NL6-Nord-Lock	6	0,8	4,9
Zylinderschraube DIN 6912 M6x12 10.9	6	4,5	27,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Außenschelle	1	96,0	96,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle	1	127,7	127,7
Propeller	2	765,5	1531,0
Hacker QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard	1	2380,0	2380,0
Gesamt			4242,3
Prozentual laut Anforderungsliste erlaubter Massen Anstieg		0,05	212,1
Laut Anforderungsliste erlaubter Massen Anstieg			4454,5

Tab. A.12: Berechnungstabelle des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 1 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3

Masse des Motor-Propeller-Systems mit Auswuchtsystem (150mm)			
Komponentenname	Anzahl d. Komponenten [-]	Einzelmasse [g]	Komponentenmasse [g]
BS-007-082-06-01-06 Gewindeleiste	4	4,7	18,8
NL5-Nord-Lock	12	0,6	6,9
Ganter Passschraube ISO 7379-5-M4-8	4	3,8	15,1
Zylinderschraube ISO 4762 M5x16 10.9	8	4,4	34,9
NL6-Nord-Lock	6	0,8	4,9
Zylinderschraube DIN 6912 M6x12 10.9	6	4,5	27,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Außenschelle	1	96,0	96,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für erste Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
Propeller	2	765,5	1531,0
Erste Version des Auswuchtring	1	122,1	122,1
Hacker QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard	1	2380,0	2380,0
Gesamt			4368,2
Massenanstieg			125,9
Prozentualer Massenanstieg [%]			3,0

Tab. A.13: Berechnungstabelle des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 2 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3

Masse des Motor-Propeller-Systems mit Auswuchtsystem (112 mm)			
Komponentenname	Anzahl d. Komponenten [-]	Einzelmasse [g]	Komponentenmasse [g]
BS-007-082-06-01-06 Gewindeleiste	4	4,7	18,8
NL5-Nord-Lock	12	0,6	6,9
Ganter Passschraube ISO 7379-5-M4-8	4	3,8	15,1
Zylinderschraube ISO 4762 M5x16 10.9	8	4,4	34,9
NL6-Nord-Lock	6	0,8	4,9
Zylinderschraube DIN 6912 M6x12 10.9	6	4,5	27,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Außenschelle	1	96,0	96,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für zweite Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
Propeller	2	765,5	1531,0
Zweite Version des Auswuchtring	1	93,4	93,4
Hacker QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard	1	2380,0	2380,0
Gesamt			4339,6
Massenanstieg			97,2
Prozentualer Massenanstieg [%]			2,3

Tab. A.14: Berechnungstabelle des Massenzuwachs durch Auswuchtsystem 3 bzgl. Motor-Propeller-System aus Kap. 5.1.3

Masse des Motor-Propeller-Systems mit Auswuchtsystem (90 mm)			
Komponentenname	Anzahl d. Komponenten [-]	Einzelmasse [g]	Komponentenmasse [g]
BS-007-082-06-01-06 Gewindeleiste	4	4,7	18,8
NL5-Nord-Lock	12	0,6	6,9
Ganter Passschraube ISO 7379-5-M4-8	4	3,8	15,1
Zylinderschraube ISO 4762 M5x16 10.9	8	4,4	34,9
NL6-Nord-Lock	6	0,8	4,9
Zylinderschraube DIN 6912 M6x12 10.9	6	4,5	27,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Außenschelle	1	96,0	96,0
BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für dritte Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
Propeller	2	765,5	1531,0
Dritte Version des Auswuchtring	1	66,0	66,0
Hacker QSL-T/QST-150-25/45 V2 Standard	1	2380,0	2380,0
Gesamt			4312,2
Massenanstieg			69,8
Prozentualer Massenanstieg [%]			1,646

Tab. A.15: Berechnungstabelle des Massenzuwachs aller Varianten des Auswuchtsystems bzgl. Innenschelle aus Kap. 5.1.3

Massenzuwachs auf ursprüngliche Innenschelle bezogen				
Erstes Auswuchtsystem	BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für erste Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
	Erste Version des Auswuchtring	1	122,1	122,1
	Summe			253,6
	Massenanstieg			125,9
	Prozentualer Massenanstieg [%]			98,6
Zweites Auswuchtsystem	BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für zweite Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
	Zweite Version des Auswuchtring	1	93,4	93,4
	Summe			225,0
	Massenanstieg			97,2
	Prozentualer Massenanstieg [%]			76,1
Drittes Auswuchtsystem	BS-007-082-06-01-06 Nabe V11 Innenschelle (angepasst für dritte Version des Auswuchtring)	1	131,5	131,5
	Dritte Version des Auswuchtring	1	66,0	66,0
	Summe			197,6
	Massenanstieg			69,8
	Prozentualer Massenanstieg [%]			54,7

A.3 Ergänzungen zu Abschnitt 5.3

Details von "Schwerpunkt beider Propellerblätter" ▾ ▴ □ ×	
[-] Zuweisung	
Zuweisungsmethode	Komponente
Komponente	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Koordinatensystem	Globales Koordinatensystem
☐ X-Koordinate	54,783 mm
☐ Y-Koordinate	135,57 mm
☐ Z-Koordinate	-4,5277e-003 mm
Position	Zum Ändern klicken
[-] Definition	
Unterdrückt	Nein
Verhalten	Verformbar
Algorithmus	MPC-Verfahren
Relaxationsmethode	Nein
Pinball-Bereich	Alle
Freiheitsgrad-Auswahl	Programmgesteuert
APDL-Name des Pilotknotens	

Abb. A.63: Einstellungen des externen Punktes „Schwerpunkt der Propellerblätter“ aus Kap. 5.3

Details von "Netz" ▾ ▴ □ ×	
[-] Anzeige	
Anzeigestil	Geometrieinstellungen verwen...
[-] Standardeinstellungen	
Physikvoreinstellung	Mechanik
Elementansatzfunktion	Programmgesteuert
☐ Elementgröße	2, mm
[-] Elementgröße	
Adaptive Größe verwenden	Ja
Auflösung	4
Netz-Defeaturing	Ja
☐ Defeaturing-Größe	Standardeinstellung
Übergang	Schnell
Spannwinkel	Grob
Globale Netzgröße bezogen auf	Baugruppe
Begrenzungsrahmen-Diagonale	266,99 mm
Mittlerer Flächeninhalt	37,113 mm²
Minimale Kantenlänge	1,4142e-002 mm
[-] Qualität	
Netzqualität überprüfen	Ja, Fehler
Fehlergrenzen	Mechanik - Aggressiv
☐ Ziel der Elementqualität	Standardeinstellung (5,e-002)
Glätten	Mittel
Netzqualität	Keine
[-] Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Automatische Prismenschichten verwenden	Keine
Option zur Erzeugung der Prismenschichten	Weicher Übergang
☐ Übergangsverhältnis	0,272
☐ Max. Anzahl der Schichten	5
☐ Wachstumsrate	1,2
Algorithmus für die Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	Pre
Prismenschicht-Element-Typ	Keile
Erweiterte Optionen anzeigen	Nein
[-] Erweitert	
Anzahl CPUs für paralleles Vernetzen von Bauteilen	Programmgesteuert
Elemente mit geraden Kanten	Nein
Starrkörperverhalten	Dimensionsmäßig reduziert
Dreiecks-Oberflächenvernetzer	Programmgesteuert
Topologieprüfung	Ja
Pinch-Toleranz	Definieren Sie
Pinch beim Aktualisieren erstellen	Nein
[-] Statistik	
☐ Knoten	845888
☐ Elemente	493010
Detaillierte Statistiken anzeigen	Nein

Abb. A.64: Netzeinstellungen der Harmonischen Analysen aus Kap. 5.3

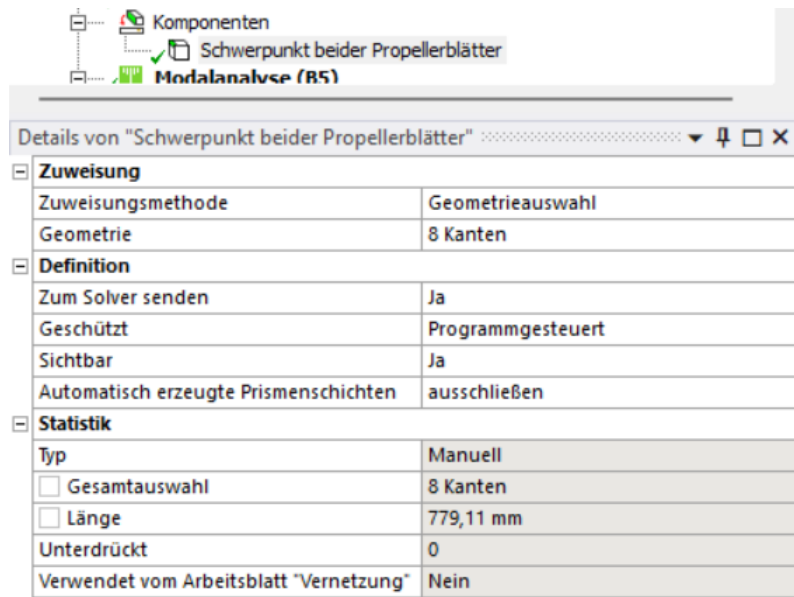


Abb. A.65: Einstellungen der mit der externen Punkt „Schwerpunkt der Propellerblätter“ verbundenen Komponente aus Kap. 5.3

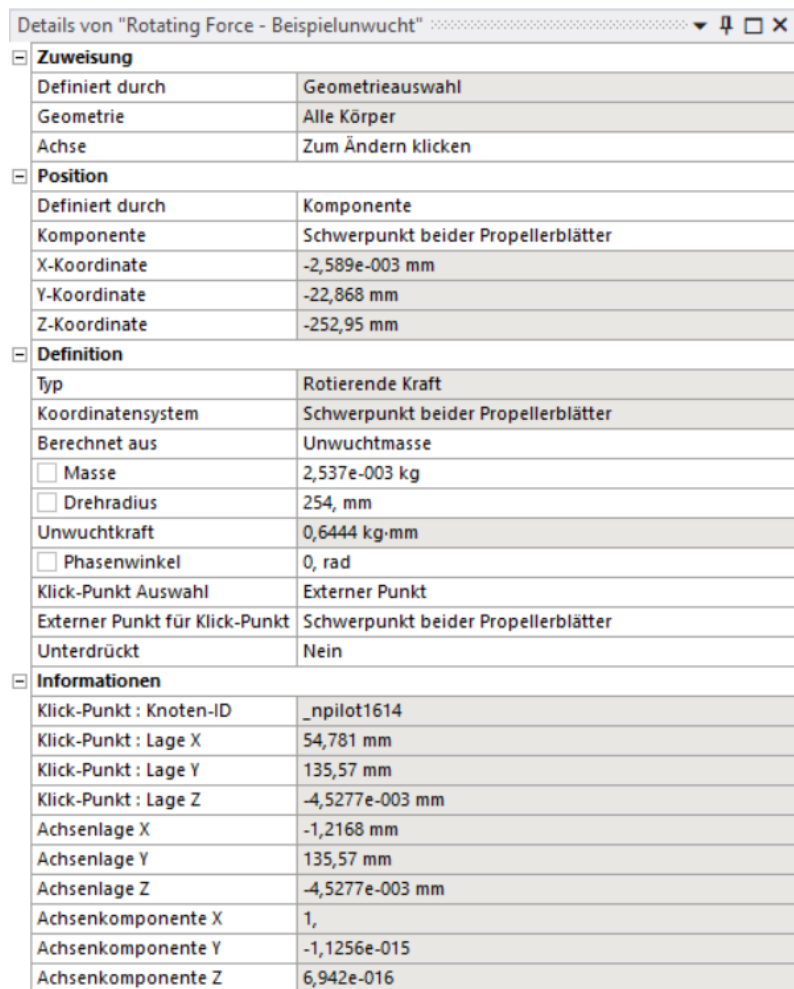


Abb. A.66: Einstellungen der rotierenden Kraft für die große Unwucht aus Kap. 5.3

Details von "Rotating Force - Beispielunwucht"	
Zuweisung	
Definiert durch	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
Achse	Zum Ändern klicken
Position	
Definiert durch	Komponente
Komponente	Schwerpunkt beider Propellerblätter
X-Koordinate	-2,589e-003 mm
Y-Koordinate	-22,868 mm
Z-Koordinate	-252,95 mm
Definition	
Typ	Rotierende Kraft
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Berechnet aus	Unwuchtmasse
☐ Masse	1,5354e-007 kg
☐ Drehradius	254, mm
Unwuchtkraft	3,9e-005 kg-mm
☐ Phasenwinkel	0, rad
Klick-Punkt Auswahl	Externer Punkt
Externer Punkt für Klick-Punkt	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Unterdrückt	Nein
Informationen	
Klick-Punkt : Knoten-ID	_npilot1614
Klick-Punkt : Lage X	54,781 mm
Klick-Punkt : Lage Y	135,57 mm
Klick-Punkt : Lage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenlage X	-1,2168 mm
Achsenlage Y	135,57 mm
Achsenlage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenkomponente X	1,
Achsenkomponente Y	-1,1256e-015
Achsenkomponente Z	6,942e-016

Abb. A.67: Einstellungen der rotierenden Kraft für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3

Details von "Mitte Unwuchtscheibe"	
Zuweisung	
Zuweisungsmethode	Komponente
Komponente	Mitte Unwuchtscheibe
Koordinatensystem	Globales Koordinatensystem
☐ X-Koordinate	13,214 mm
☐ Y-Koordinate	135,57 mm
☐ Z-Koordinate	-4,5277e-003 mm
Position	Zum Ändern klicken
Definition	
Unterdrückt	Nein
Verhalten	Verformbar
Algorithmus	MPC-Verfahren
Relaxationsmethode	Nein
Pinball-Bereich	Alle
Freiheitsgrad-Auswahl	Programmgesteuert
APDL-Name des Pilotknotens	

Abb. A.68: Einstellungen des externen Punktes im Zentrum des Auswuchtringes aus Kap. 5.3

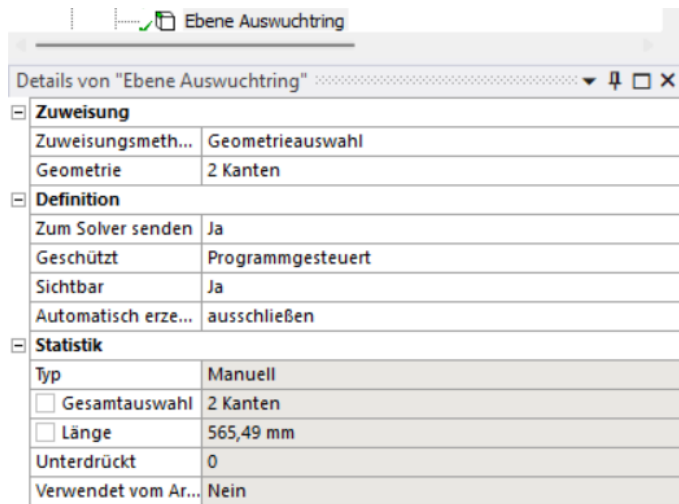


Abb. A.69: Einstellungen der mit dem externen Punkt „Ebene Auswuchtring“ angebundene Komponente aus Kap. 5.3

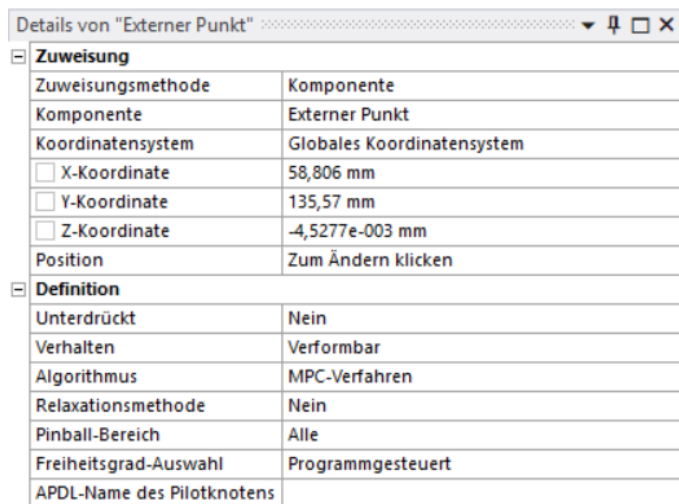


Abb. A.70: Einstellungen des externen Punktes leicht über dem Schwerpunkt der Propellerblätter aus Kap. 5.3

Anbindung der Unwuchtmasse

Details von "Anbindung der Unwuchtmasse" ▾ 🔍 □ ×

Zuweisung	
Zuweisungsmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	8 Kanten
Definition	
Zum Solver senden	Ja
Geschützt	Programmgesteuert
Sichtbar	Ja
Automatisch erzeugte Prismenschichten	ausschließen
Statistik	
Typ	Manuell
☐ Gesamtauswahl	8 Kanten
☐ Länge	304,33 mm
Unterdrückt	0
Verwendet vom Arbeitsblatt "Vernetzung"	Nein

Abb. A.71: Einstellungen der mit dem externen Punkt „Anbindung der Unwuchtmasse“ angebundene Komponente aus Kap. 5.3

Details von "Analyseeinstellungen" ▾ 🔍 □ ✕

Schrittsteuerung	
Mehrere Schritte	Nein
Optionen	
Frequenzabstand	Linear
☐ Min. Wert des Bereichs	0, Hz
☐ Max. Wert des Bereichs	50, Hz
☐ Lösungsintervalle	25
Benutzerdefinierte Frequenzen	Aus
Lösungsmethode	Harmonisch mit vollen Matrizen
Rotordynamik-Einstellungen	
Coriolis Effekt	Ein, Stationäres Bezugssystem
Erweitert	
Kontaktunterteilung (DMP)	Programmgesteuert
Ausgabesteuerungen	
Spannung berechnen	Ja
Back Stress	Nein
Dehnung berechnen	Ja
Kontakt Daten	Ja
Knotenkräfte	Nein
Volumen und Energie	Ja
Euler-Winkel	Ja
Reaktionskräfte berechnen	Ja
SMISC-NMISC	Nein
Kompression der Ergebnisdatei	Programmgesteuert
Dämpfungssteuerungen	
☐ Konstanter Verlustfaktor	0,
Beta-Dämpfung definiert durch	Direkte Eingabe
☐ Beta-Dämpfungswert	0,
☐ Alpha-Dämpfungswert	0,
Analysedatenverwaltung	
Solver-Dateienverzeichnis	C:\Users\rabi_jo\Desktop\Fertige ...
Zukünftige Analyse	Keine
Temporäres Verzeichnis der Solverdateien	
Ansys-Datenbasis speichern	Nein
Kontaktübersicht	Programmgesteuert
Nicht benötigte Dateien löschen	Ja
Solver-Einheiten	Aktives System
Solver-Maßeinheitensystem	Nmm

Abb. A.72: Analyseeinstellungen der harmonischen Analyse aus Kap. 5.3

Details von "Rotating Force - Beispielunwucht 2"	
Zuweisung	
Definiert durch	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
Achse	Zum Ändern klicken
Position	
Definiert durch	Komponente
Komponente	Mitte Unwuchtscheibe
X-Koordinate	-41,569 mm
Y-Koordinate	-12,933 mm
Z-Koordinate	-43,085 mm
Definition	
Typ	Rotierende Kraft
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Berechnet aus	Unwuchtmasse
☐ Masse	1,432e-002 kg
☐ Drehradius	45, mm
Unwuchtkraft	0,6444 kg-mm
☐ Phasenwinkel	3,1416 rad
Klick-Punkt Auswahl	Externer Punkt
Externer Punkt für Klick-Punkt	Mitte Unwuchtscheibe
Unterdrückt	Nein
Informationen	
Klick-Punkt : Knoten-ID	_npilot4309
Klick-Punkt : Lage X	13,214 mm
Klick-Punkt : Lage Y	135,57 mm
Klick-Punkt : Lage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenlage X	-1,2168 mm
Achsenlage Y	135,57 mm
Achsenlage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenkomponente X	1,
Achsenkomponente Y	-1,1256e-015
Achsenkomponente Z	6,942e-016

Abb. A.73: Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Auswuchtringes für die große Unwucht aus Kap. 5.3

Details von "Rotating Force - Beispielunwucht 2"	
Zuweisung	
Definiert durch	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
Achse	Zum Ändern klicken
Position	
Definiert durch	Komponente
Komponente	Externer Punkt
X-Koordinate	4,0231 mm
Y-Koordinate	-3,6531 mm
Z-Koordinate	-44,835 mm
Definition	
Typ	Rotierende Kraft
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Berechnet aus	Unwuchtmasse
☐ Masse	1,432e-002 kg
☐ Drehradius	45, mm
Unwuchtkraft	0,6444 kg·mm
☐ Phasenwinkel	3,1416 rad
Klick-Punkt Auswahl	Externer Punkt
Externer Punkt für Klick-Punkt	Externer Punkt
Unterdrückt	Nein
Informationen	
Klick-Punkt : Knoten-ID	_npilot4351
Klick-Punkt : Lage X	58,806 mm
Klick-Punkt : Lage Y	135,57 mm
Klick-Punkt : Lage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenlage X	-1,2168 mm
Achsenlage Y	135,57 mm
Achsenlage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenkomponente X	1,
Achsenkomponente Y	-1,1256e-015
Achsenkomponente Z	6,942e-016

Abb. A.74: Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Unwucht für die große Unwucht Kap. 5.3

Details von "Rotating Force - Beispielunwucht 2"	
Zuweisung	
Definiert durch	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
Achse	Zum Ändern klicken
Position	
Definiert durch	Komponente
Komponente	Ebene Auswuchtring
X-Koordinate	-41,569 mm
Y-Koordinate	-12,933 mm
Z-Koordinate	-43,085 mm
Definition	
Typ	Rotierende Kraft
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Berechnet aus	Unwuchtmasse
☐ Masse	8,7e-007 kg
☐ Drehradius	45, mm
Unwuchtkraft	3,915e-005 kg-mm
☐ Phasenwinkel	3,1416 rad
Klick-Punkt Auswahl	Externer Punkt
Externer Punkt für Klick-Punkt	Ebene Auswuchtring
Unterdrückt	Nein
Informationen	
Klick-Punkt : Knoten-ID	_npilot3981
Klick-Punkt : Lage X	13,214 mm
Klick-Punkt : Lage Y	135,57 mm
Klick-Punkt : Lage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenlage X	-1,2168 mm
Achsenlage Y	135,57 mm
Achsenlage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenkomponente X	1,
Achsenkomponente Y	-1,1256e-015
Achsenkomponente Z	6,942e-016

Abb. A.75: Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Auswuchtringes für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3

Details von "Rotating Force - Beispielunwucht 2"	
Zuweisung	
Definiert durch	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
Achse	Zum Ändern klicken
Position	
Definiert durch	Komponente
Komponente	Anbindung der Unwuchtmasse
X-Koordinate	4,0231 mm
Y-Koordinate	-3,6531 mm
Z-Koordinate	-44,835 mm
Definition	
Typ	Rotierende Kraft
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Berechnet aus	Unwuchtmasse
☐ Masse	8,7e-007 kg
☐ Drehradius	45, mm
Unwuchtkraft	3,915e-005 kg-mm
☐ Phasenwinkel	3,1416 rad
Klick-Punkt Auswahl	Externer Punkt
Externer Punkt für Klick-Punkt	Anbindung der Unwuchtmasse
Unterdrückt	Nein
Informationen	
Klick-Punkt : Knoten-ID	_npilot4009
Klick-Punkt : Lage X	58,806 mm
Klick-Punkt : Lage Y	135,57 mm
Klick-Punkt : Lage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenlage X	-1,2168 mm
Achsenlage Y	135,57 mm
Achsenlage Z	-4,5277e-003 mm
Achsenkomponente X	1,
Achsenkomponente Y	-1,1256e-015
Achsenkomponente Z	6,942e-016

Abb. A.76: Einstellungen des Auswuchtversuchs in der Ebene des Unwucht für die kleine Unwucht aus Kap. 5.3

Details von "Frequenzgang in Y-Achse - Schwerpunkt beider Prop" ▾ 🔍 ✕	
Zuweisung	
Zuweisungsmethode	Externe Punkte
Definition	
Externe Punkte	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Typ	Verschiebungskomponente
Ausrichtung	Y-Achse
Koordinatensystem	Schwerpunkt beider Propellerblätter
Unterdrückt	Nein
Optionen	
Frequenzbereich	Übergeordnetes Tool verwenden
Minimale Frequenz	0, Hz
Maximale Frequenz	50, Hz
Anzeige	Bode
Diagrammanzeigetyp	Log Y
Ergebnisse	
☐ Maximale Amplitude	2,2044e-003 mm
☐ Frequenz	42, Hz
☐ Phasenwinkel	-0,25348 rad
☐ Realteil	2,134e-003 mm
☐ Imaginärteil	-5,5282e-004 mm

Abb. A.77: Frequenzgangeinstellungen bzgl. des Schwerpunktes der Propellerblätter im lokalen Koordinatensystem im Zentrum der Schellen in y-Achse aus Kap. 5.3

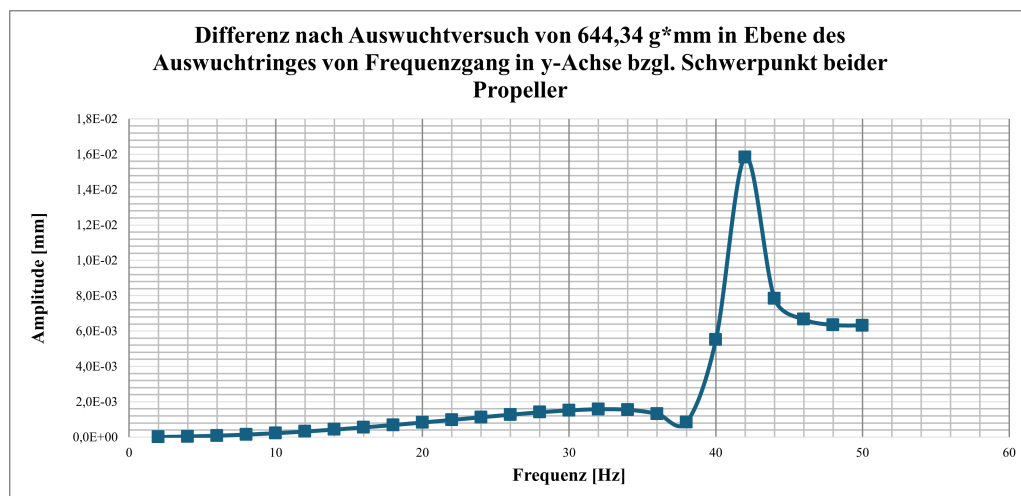


Abb. A.78: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3

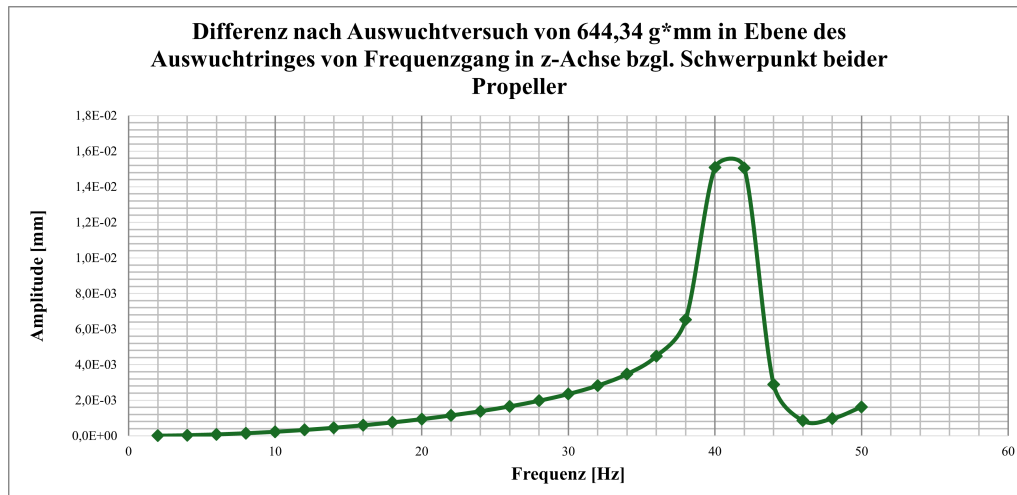


Abb. A.79: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3

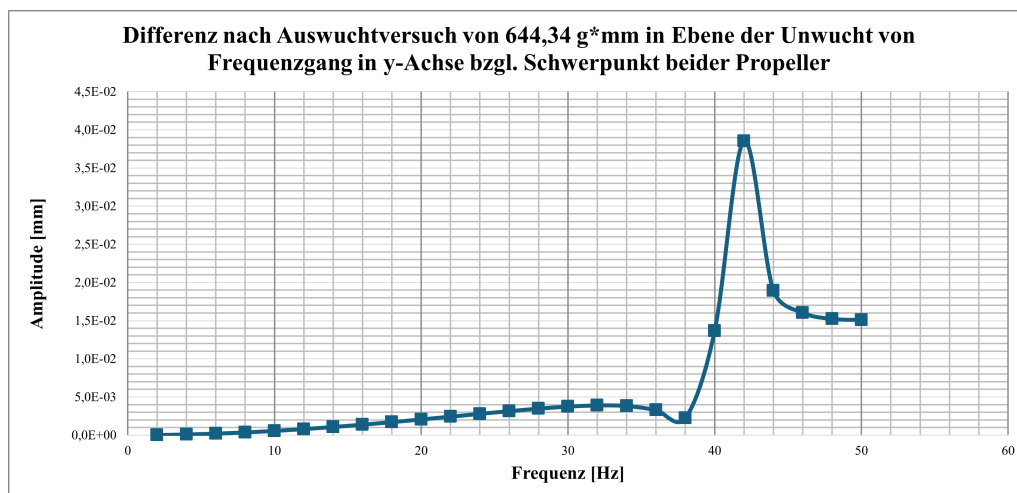


Abb. A.80: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3

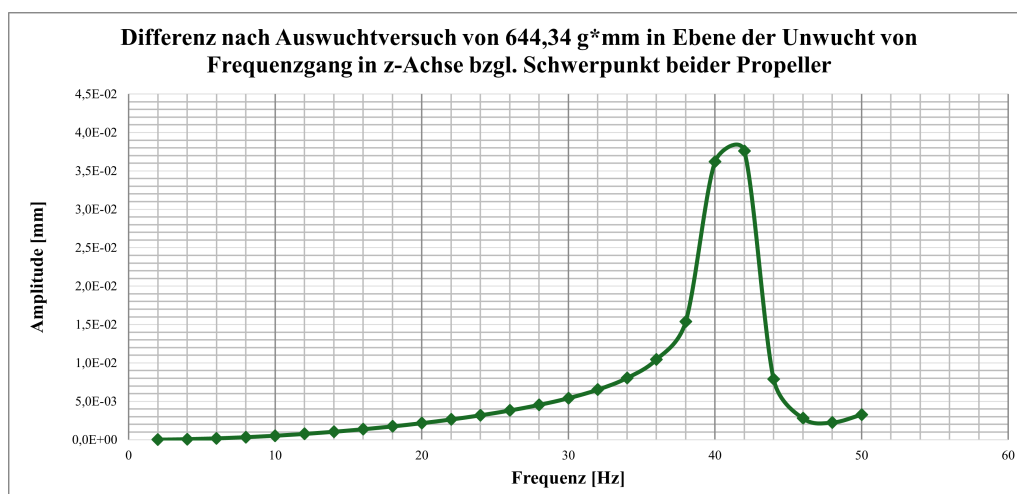


Abb. A.81: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, große Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3

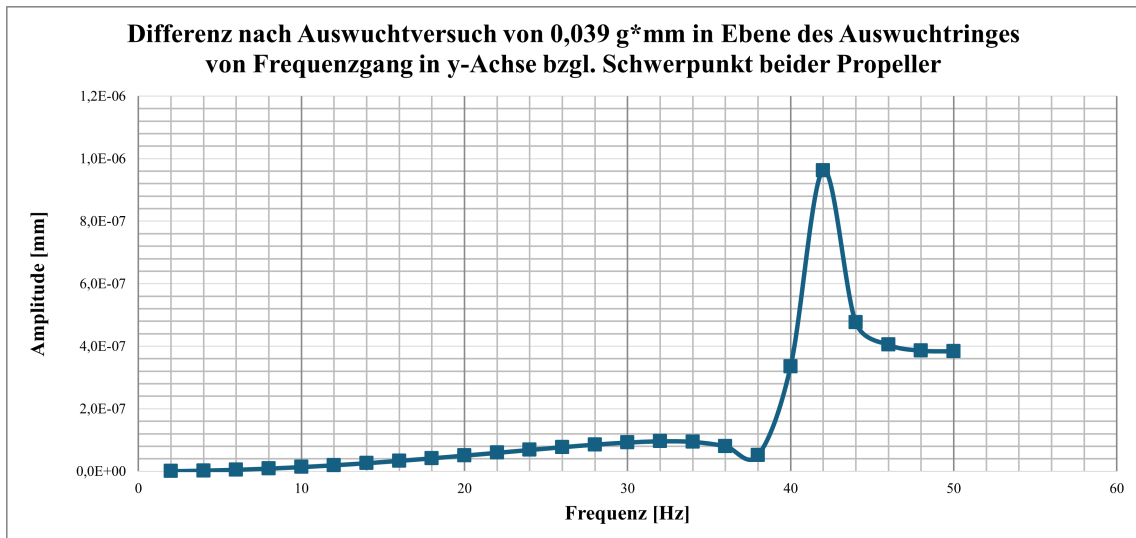


Abb. A.82: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3

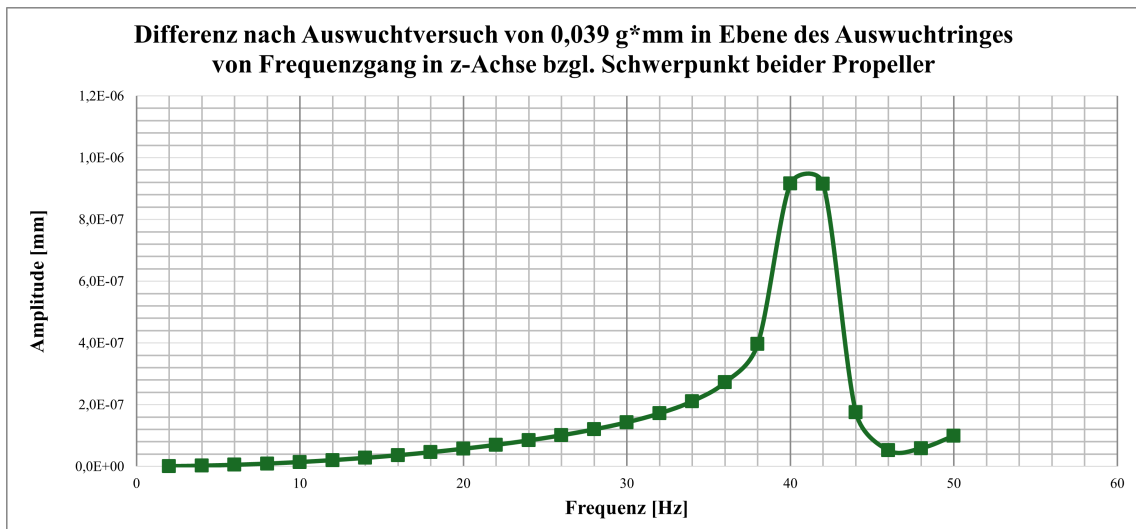


Abb. A.83: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Auswuchtring-Ebene aus Kap. 5.3

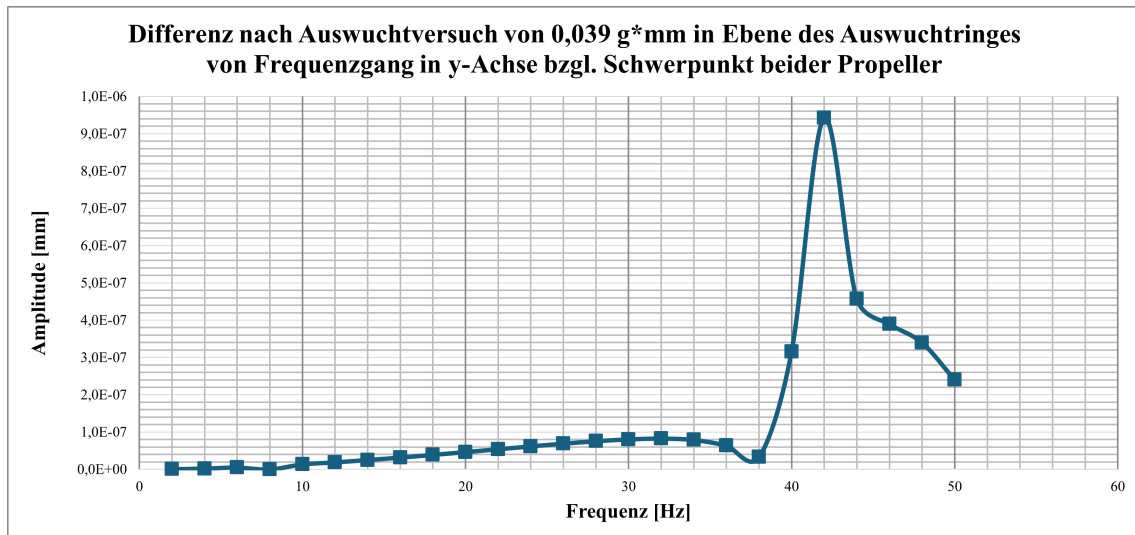


Abb. A.84: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in y-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3

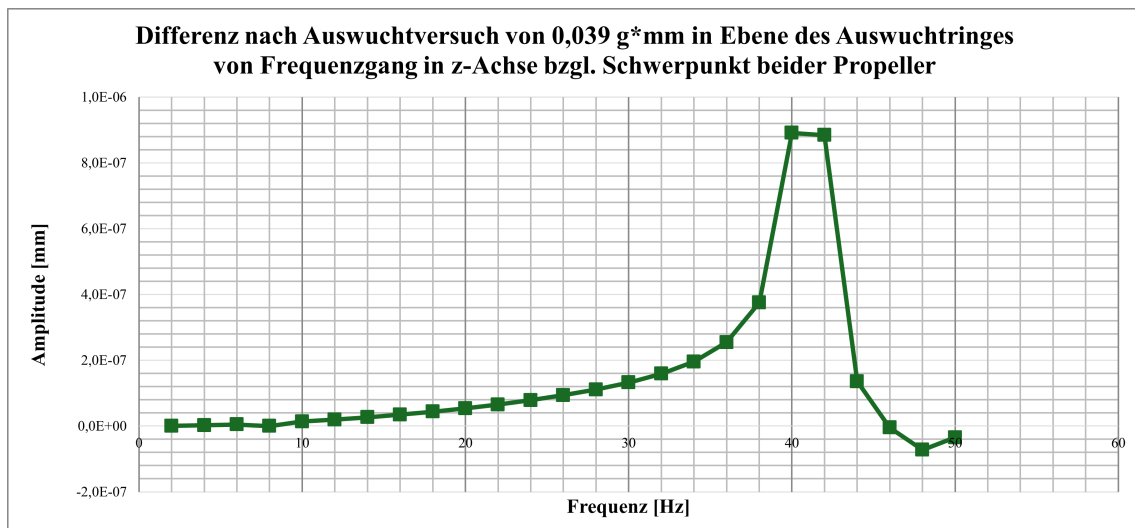


Abb. A.85: Frequenzgangdifferenz der Amplitude in z-Achse, kleine Unwucht nach Auswuchtversuch in Unwucht-Ebene aus Kap. 5.3

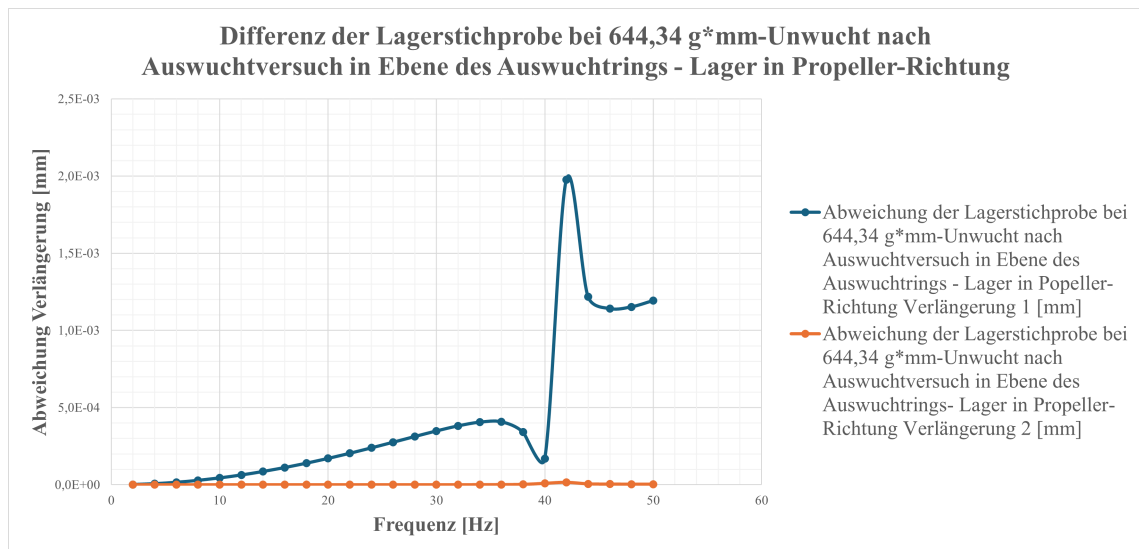


Abb. A.86: Lagerstichprobendifferenz große Unwucht - Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3

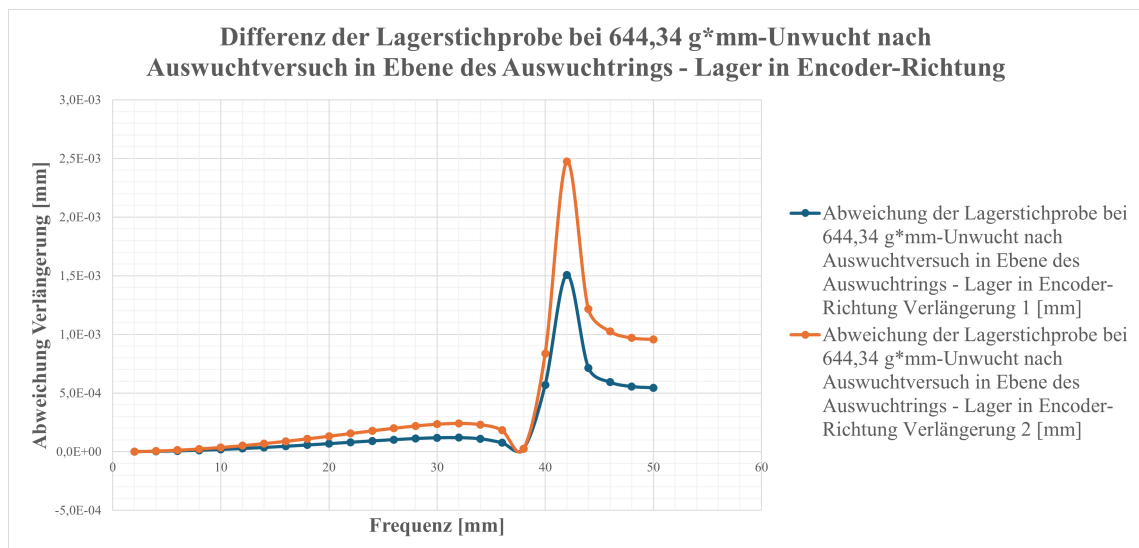


Abb. A.87: Lagerstichprobendifferenz große Unwucht - Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Encoderrichtung aus Kap. 5.3

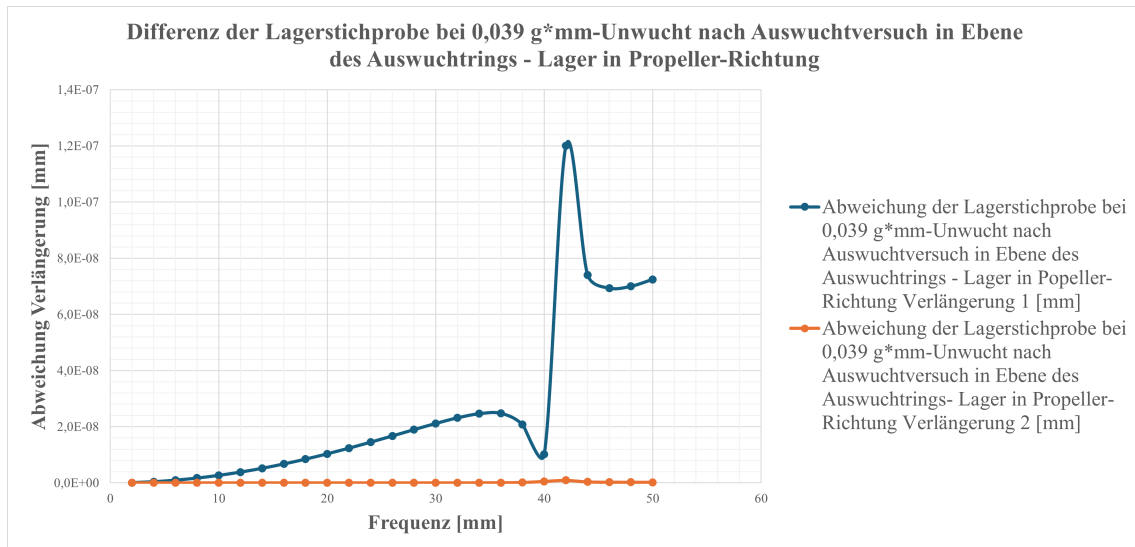


Abb. A.88: Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3

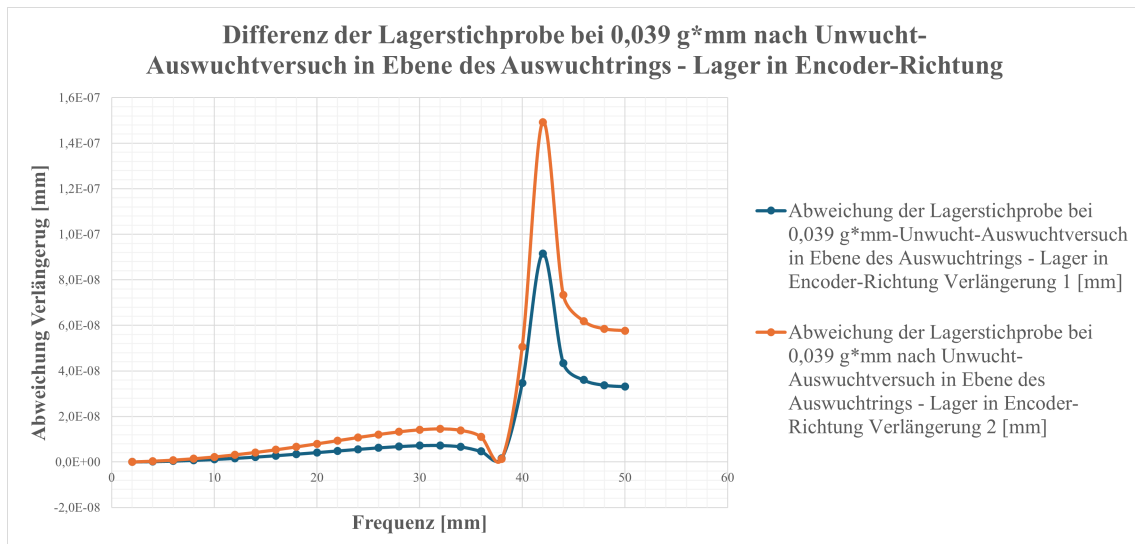


Abb. A.89: Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene des Auswuchtrings, Lager in Encoderrichtung aus Kap. 5.3

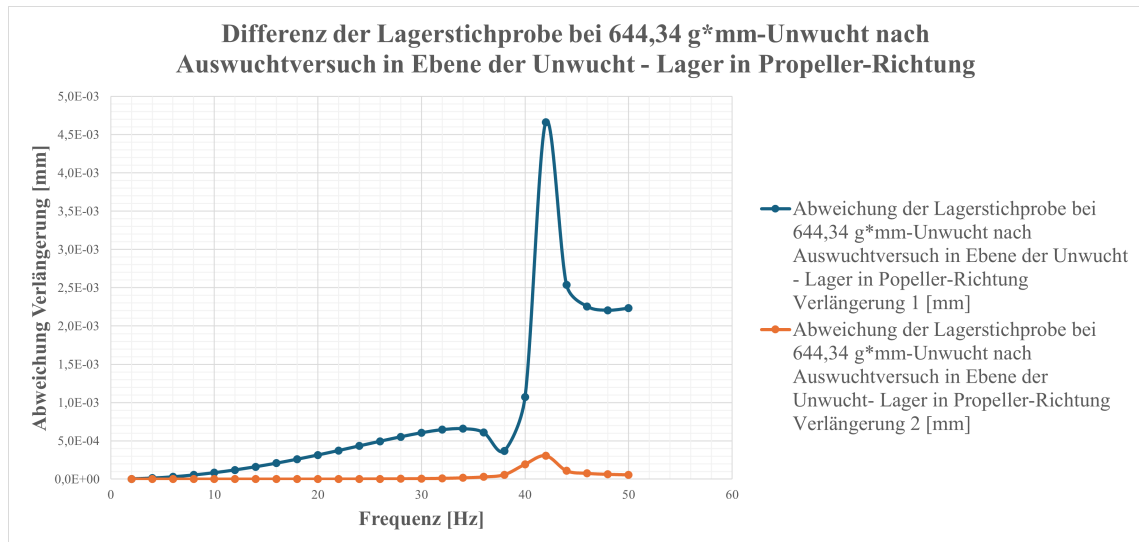


Abb. A.90: Lagerstichprobendifferenz große Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene der Unwucht, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3

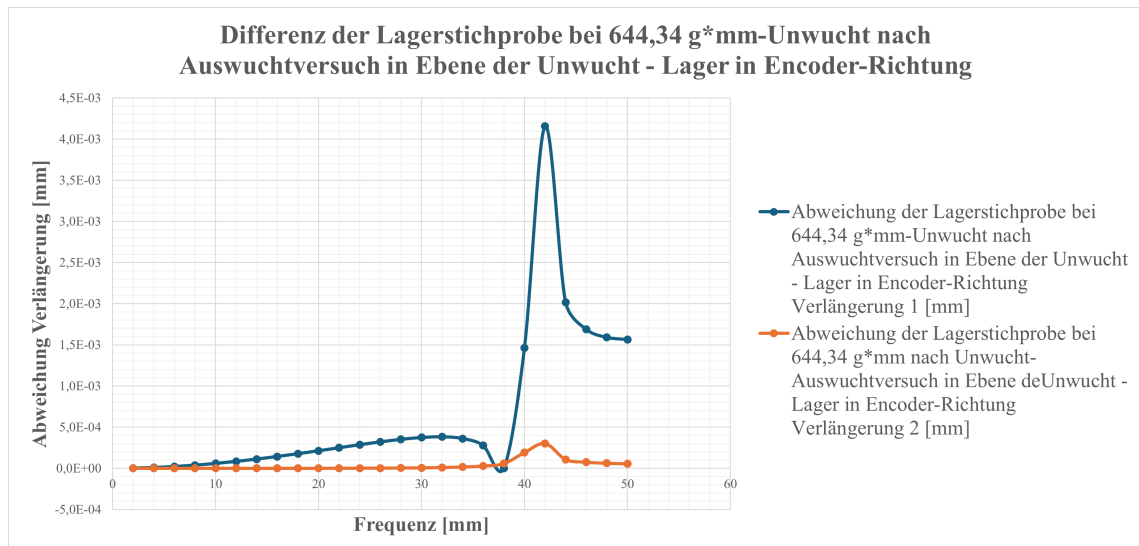


Abb. A.91: Lagerstichprobendifferenz große Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene der Unwucht, Lager in Encoder-Richtung aus Kap. 5.3

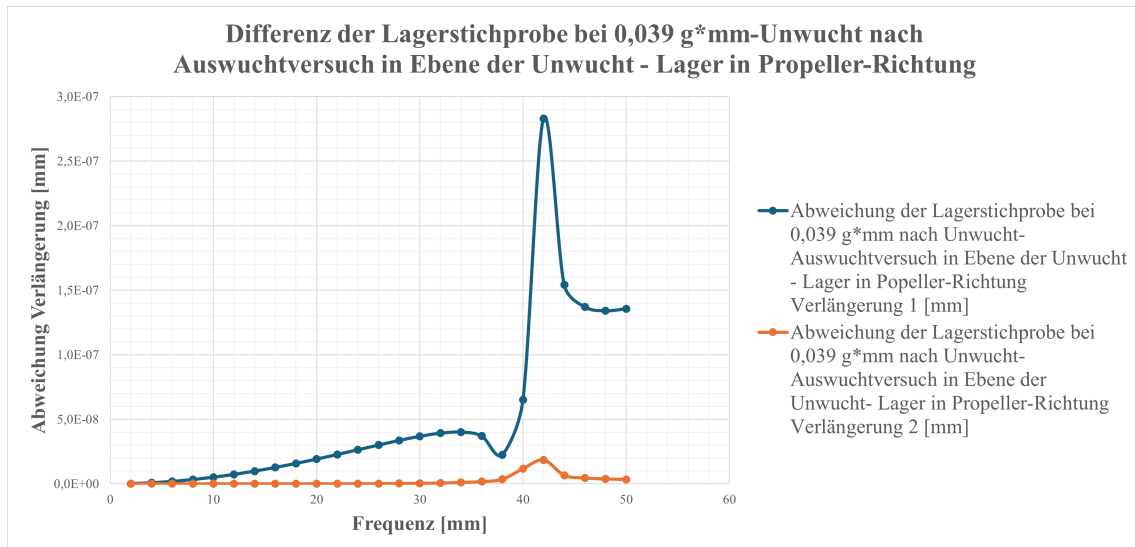


Abb. A.92: Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene der Unwucht, Lager in Propellerrichtung aus Kap. 5.3

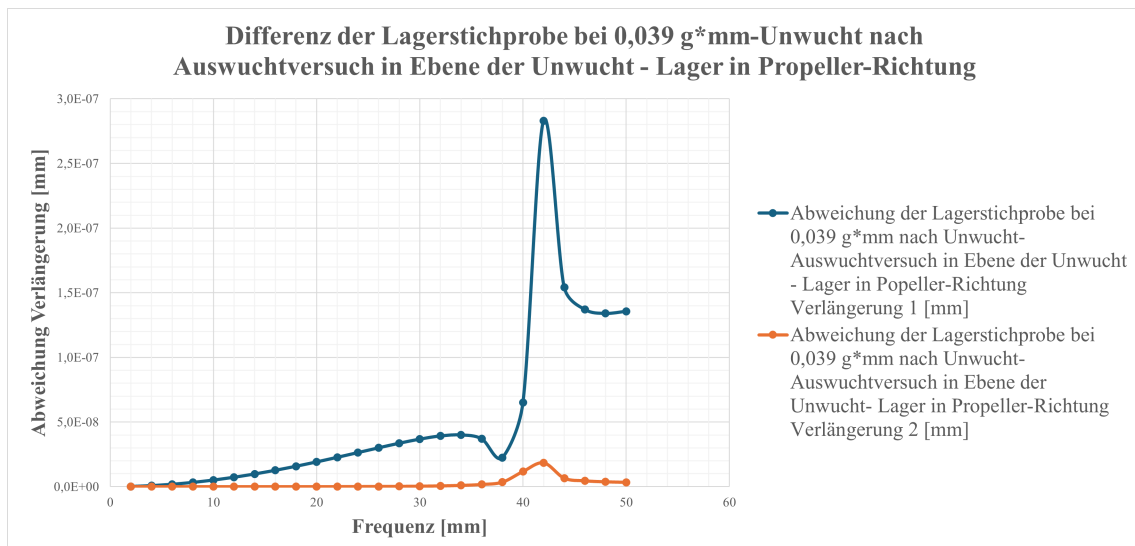


Abb. A.93: Lagerstichprobendifferenz kleine Unwucht- Auswuchtversuch in Ebene der Unwucht, Lager in Enderrichtung aus Kap. 5.3