

Untersuchung zur Schwingungsminderung an einem Helikopterdeck auf der Umspannstation eines Offshore-Windparks

*Dr.-Ing. Sebastian Katz, Dr.-Ing. Jürgen Engelhardt, Dieter Müller
Wölfel Engineering GmbH + Co. KG, Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co. KG
Max-Planck-Str. 15, 97204 Höchberg, www.woelfel.de*

Zusammenfassung

Das Helikopterdeck der Konverter-Station eines Offshore-Windparks neigt zu starken personeninduzierten Schwingungen.

Zur zuverlässigen Bestimmung von Eigenfrequenzen und Dämpfungsgraden sind am Helikopterdeck der Umspannplattform des Offshore-Windparks Schwingungsmessungen durchgeführt worden. Die Schwingungsanregung erfolgte durch Umweltrauschen (Wind und Wellen), gehende Personen und einen Schwingerreger.

Um das Schwingungsverhalten zu verbessern, werden Maßnahmen zur Ertüchtigung des Helikopterdeckes erarbeitet. Zunächst werden Grenzwerte zulässiger Beschleunigungen für personeninduzierte Schwingungen definiert, die unter den gegebenen Beanspruchungszuständen einzuhalten sind, um Komfortansprüchen für Bauwerke nach VDI-Richtlinie 2038 – Blatt 2 gerecht zu werden. An einem numerischen Simulationsmodell des Helikopterdeckes werden Ertüchtigungsmaßnahmen untersucht. Eine untersuchte Variante – Versteifung des Helikopterdeckes mit zwei Streben, bei gleichzeitiger Integration von Dämpfungselementen in die Streben – lässt eine deutliche Reduktion der Schwingungen (teilweise auf weniger als 1/10 der Ausgangsamplituden) erwarten und wird zur Ausführung empfohlen. Für die Integration der Dämpfungselemente in die Streben wird ein Konstruktionsvorschlag erarbeitet, der als Grundlage für die technische Umsetzung dient.

Obwohl sich die Berechnungen dieses Berichts auf die Untersuchung personeninduzierter Schwingungen beschränken, werden sich auch die Schwingungen infolge anderer Anregungsarten (Wind, Hubschrauber) bei Umsetzung der vorgeschlagenen Variante mit zusätzlichen Dämpfungsgliedern durch die erhöhte Strukturdämpfung im unteren Frequenzbereich deutlich reduzieren.

Keywords: Personeninduzierte Schwingungen, numerische Simulation, Schwingungsminderung, messtechnische Modellvalidierung, drahtlose Messtechnik, elektrodynamischer Schwingungserreger

1. Aufgabenstellung

Das Helikopterdeck eines Offshore-Windparks (Abb. 1) neigt zu starken personeninduzierten Schwingungen. Durch gehende Personen kommt es zu einer starken Schwingungsanregung des Helikopterdeckes in mindestens einer Eigenfrequenz, was die Gebrauchstauglichkeit stark einschränkt und die Freigabe für den Flugbetrieb verhindert.

Um Ertüchtigungsmaßnahmen gezielt auslegen zu können, werden die vorhandenen Eigenfrequenzen und Dämpfungsgrade des Decks durch Schwingungsmessungen experimentell bestimmt und mittels numerischer Simulation Reduktionsmaßnahmen abgeleitet.

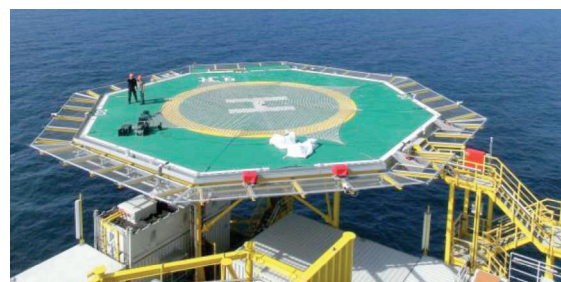


Abb. 1: Helikopterdeck der Umspannplattform

2. Messdurchführung

Zur Datenaufzeichnung der Schwingungen werden ein drahtloses Messsystem (vgl. Abb. 2) mit vier triaxialen Geophonen zur Erfassung der Schwingungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Zur Beurteilung werden die Schwingungsgeschwindig-

keiten in Schwingbeschleunigungen umgerechnet.

Durchgeführt werden Messungen mit drei verschiedenen Anregungsmechanismen:

1. Anregung durch einen Schwingerreger (Wölfel BD.5) bei:
 - i. horizontaler Krafteinleitung
 - ii. vertikaler Krafteinleitung
2. Anregung durch sog. Umweltrauschen, vornehmlich durch Wind und Wellen
3. Anregung durch das Gehen und Laufen von Personen.



Abb. 2: Geophon mit MEDA-RedSens-Modul zur drahtlosen Signalübermittlung

Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung folgender Parameter:

- a. Eigenfrequenzen des Helikopterdeckes
- b. Dämpfungsgrade von maßgebenden Eigenmoden
- c. Schwingungsniveaus unter verschiedenen Anregungsszenarien.

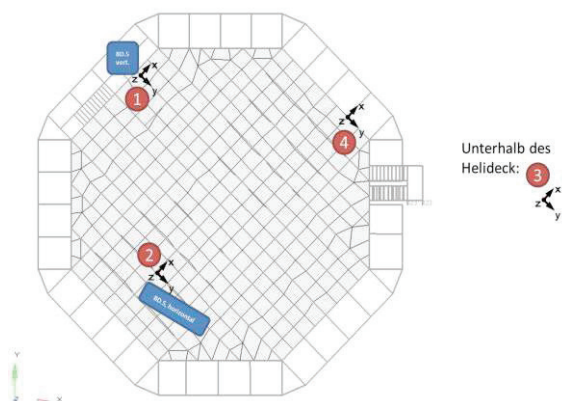


Abb. 3: Sensorpositionen auf dem Helikopterdeck der Umspannplattform



Abb. 4: Setup mit Schwingerreger BD.5 in vertikaler Position

3. Messergebnisse

Tab. 1 zeigt die ermittelten Eigenfrequenzen und Dämpfungsgrade.

Tab. 1: Ermittelte Eigenfrequenzen und Dämpfungsgrade mit Bezug auf die kritische Dämpfung

Mode Nr.	Eigenfrequenz	Dämpfung bei vertikaler Anregung	Dämpfung bei horizontaler Anregung
1	0.86 Hz	-	0.87%
2	1.02 Hz	-	-
3	1.54 Hz	0.39%	0.38% bis 0.48%
4	1.92 Hz	1.11%	1.38%
5	2.21 Hz	0.77%	0.92%
6	5.67 Hz	1.21%	-

Die ersten fünf Eigenfrequenzen sind bereits in der Messung mit Anregung durch sog. Umweltrauschen zu erkennen. Das Beschleunigungsspektrum ist für Messpunkt (MP) 1 in Abb. 5 dargestellt.

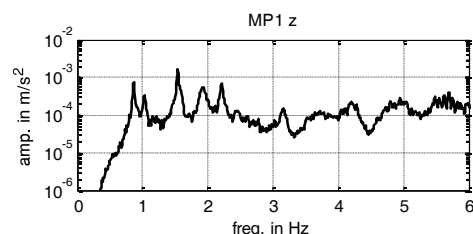


Abb. 5: Beschleunigungsspektren aus Anregung durch Umweltrauschen für MP 1 in vertikaler Richtung

Die Moden 1 und 2 sind globale Schwingungen der Umspannplattform. Erst die höheren Ei-

genmoden sind dem Helikopterdeck zuzuordnen.

Die Dämpfungsgrade sind anhand der Ausschwingkurven nach monofrequenter Anregung durch einen Schwingerreger bestimmt. Für die Anregung mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers werden zwei Messpositionen anhand des FE-Modells gewählt, an denen eine gute Anregbarkeit der relevanten Eigenmoden erwartet wird. Abb. 6 und Abb. 7 geben die Übertragungsfunktionen von Anregungskraft zu Schwingbeschleunigungen für die beiden Anregungspositionen wieder.

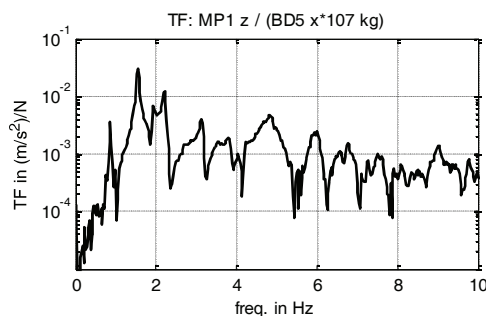


Abb. 6: Amplitudengang der Übertragungsfunktion bei horizontaler Rauschanregung mittels BD.5 im Frequenzbereich 0.5 Hz bis 15 Hz, 350 N(RMS) für MP 1 in vertikaler Richtung

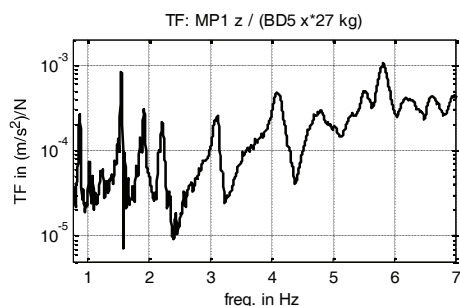


Abb. 7: Amplitudengang der Übertragungsfunktion bei vertikaler Sweepanregung mittels BD.5 im Frequenzbereich 0.5 Hz bis 7 Hz, 200 N(Peak) für MP 1 in vertikaler Richtung

Gut zu erkennen sind die ausgeprägten Resonanzen bei 0.86 Hz, 1.55 Hz und 2.24 Hz. Dies spiegelt auch den subjektiven Eindruck wieder: Insbesondere die Frequenzen 1.55 Hz und 2.24 Hz sind bei Anregung durch den Schwingerreger deutlich spür- und sichtbar. Der geringe Dämpfungsgrad der beiden Schwingungen um 1.55 Hz und um 2.24 Hz lässt zusätzlich darauf schließen, dass das bestehende Problem der hohen Schwingungen beim Gehen durch Personen durch diese beiden Eigenfrequenzen dominiert wird.

Zusätzlich zur Bestimmung von Eigenfrequenzen und Dämpfungsgraden werden auch die Schwingbeschleunigungen infolge gehender Personen erfasst. Die größten Beschleunigungen treten im Fall „Synchrones Gehen von 2 Personen bei einer Schrittfrequenz von 1.54 Hz“ auf und befinden sich im Bereich von 0.25 m/s².

4. Beurteilungs- und Bewertungskonzept auf Basis von VDI 2038

Da bei einer Begehung des Helikopterdecks (nach Offshore-Installation) durch einen Sachverständigen Schwingungen wahrgenommen und (subjektiv) als sehr störend empfunden wurden, behandeln die nachfolgenden Ausführungen ausschließlich personeninduzierte Schwingungen. Das Beurteilungskonzept aus VDI 2038 [1] wird für die Bewertung der Schwingungen zugrunde gelegt.

In VDI 2038 sind Kriterien zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit genannt. Als Orientierung dienen die Anhaltswerten für Brücken, da Brücken bezüglich der Eigenfrequenzlage, der wirkenden Kraftrichtungen (vertikal und horizontal) und der Komfortansprüche prinzipiell gut mit den Gegebenheiten des Helikopterdecks übereinstimmen.

Dynamische Beanspruchungen infolge von startenden bzw. landenden Hubschraubern sind gemäß geltenden Regelwerken bei der statischen Berechnung als zusätzlicher Lastfall quasistatisch (dynamischer Lastfaktor) zu berücksichtigen und werden im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt.

4.1. Kraft-Zeitverläufe aufgrund personeninduzierter dynamischer Belastungen

Nach [2] erzeugen Gehen, Laufen, Springen etc. von Personen periodische Belastungen, die im Fall schwingungsanfälliger Gebäudeteile, insbesondere bei Resonanz mit Bauteileigenfrequenzen, zu erheblichen Schwingungen führen können. Hierbei sind die Schrittfrequenzen beim Gehen im Bereich von 1.6 Hz bis 2.4 Hz, beim Laufen im Bereich von 3.5 Hz bis 4.0 Hz. Durch Gehen und Laufen werden sowohl horizontal als auch vertikal wirkende Lasten erzeugt. Die Grundfrequenz bei vertikaler Belastung entspricht der Schrittfrequenz, die bei horizontaler Belastung der halben Schrittfrequenz. Oberhalb der vierfachen Grundfrequenz ist in der Regel nicht mit spürbaren Erschütterungen zu rechnen.

Die Kräfte, die durch gehende Personen erzeugt werden können durch Superposition von harmonischen Schwingungen abgebildet wer-

den. Empfohlene Bereiche für Anregungsfrequenzen und Last-Koeffizienten sind in [2] zu finden. Aus Abb. 8 ist exemplarisch der vertikale Kraft-Zeit-Verlauf eines Einzelschrittes beim Gehen einer Person zu entnehmen (eigene Berechnungen auf Basis der Angaben in [3]).

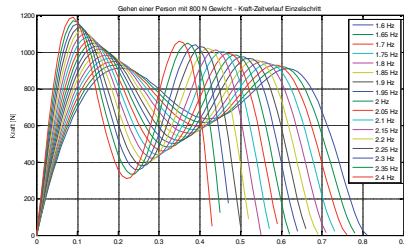


Abb. 8: Kraft-Zeit-Verlauf eines Einzelschrittes beim Gehen einer Person mit 80 kg Körpergewicht

Bei der numerischen Simulation werden die Anregungsfrequenzen so gewählt, dass die Struktur immer in Resonanz angeregt wird (ungünstig wirkend). Aufgrund von mehreren Eigenfrequenzen im kritischen Bereich zwischen ca. 0,8 Hz und 7,2 Hz erfolgt die Berechnung für jede Eigenfrequenz einzeln. Die ungünstigsten Ergebnisse werden dann für die nachfolgende Beurteilung herangezogen.

4.2. Beurteilungskonzept

Das Beurteilungskonzept in [1] unterscheidet Bauwerks- und Bauteiltypen. Helikopterdecks sind darin nicht aufgeführt. Aufgrund der Krafteinwirkungsrichtungen (horizontal und vertikal) sowie der prinzipiellen Komfortanforderungen wird empfohlen, das Helikopterdeck entsprechend den Anforderungen für Brücken zu bewerten.

Weiterhin sieht die VDI 2038 sogenannte Bedeutungskategorien für verschiedene Komfortanforderungen vor. Nach eingehender Erläuterung und Diskussion wurde sich auf die zwischen Bedeutungskategorie I (vergleichbar mit Brücken in ländlichen Gebieten mit geringer Nutzung) vereinbart.

Auf dieser Basis kann die Beurteilung von auftretenden Schwingungen vorgenommen werden. Bei

- quasiständigen Bemessungssituationen ist hoher Komfort, bei
- häufigen Bemessungssituationen mittlerer Komfort und bei
- seltenen Bemessungssituationen niedriger Komfort sicherzustellen.

Die für Brücken in [1] aufgeführten Bemessungssituationen erscheinen für das zu untersuchende Helikopterdeck nicht zutreffend. Deswegen sind in Abstimmung mit dem Betreiber zur Nutzung des Helikopterdecks folgende Bemessungssituationen projektspezifisch vereinbart worden:

- quasiständig: synchrones Gehen von 2 Personen über das Deck
- häufig: synchrones Gehen von 4 Personen über das Deck
- selten: mutwillige Schwingungsanregung durch Hüpfen etc. wird nicht beurteilt, da bei bestimmungsgemäßer Nutzung nicht Anregung nicht auftritt und die Plattform nicht öffentlich ist.

Da die Struktur linear elastisch modelliert wird, ergeben sich für die häufige Bemessungssituation doppelt so große Amplituden wie für die quasiständige Bemessungssituation. Da auch die zulässigen Beschleunigungsamplituden doppelt so groß sind, ist die Einhaltung von $0,5 \text{ m/s}^2$ vertikal und $0,15 \text{ m/s}^2$ horizontal beim synchronen Gehen von 2 Personen maßgebend.

5. Numerische Simulation

5.1 FE-Modell / Untersuchte Varianten

Zur Bewertung der Ertüchtigungsmaßnahmen des Helikopterdecks werden numerische Simulationen an einem Balkenmodell durchgeführt, siehe Abb. 9 links. Hierzu wird das Modell durch geeignete Definition der Einspannbedingungen an die in messtechnisch ermittelten Eigenfrequenzen angepasst.

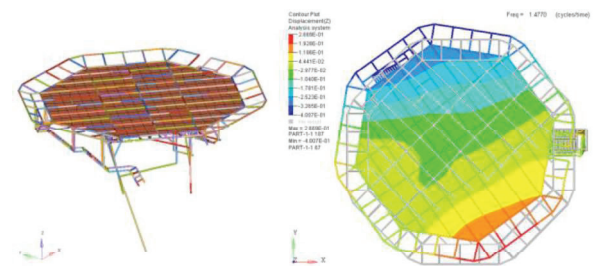


Abb. 9: links: FE-Modell des Helikopterdecks, rechts: Erste für Gehen relevante Eigenform

Abb. 9 rechts zeigt exemplarisch die erste für Gehen relevante Eigenform des Simulationsmodells bei 1,48 Hz. Dargestellt ist das deformierte und das undeformierte (grau) Modell; die Farbschattierung zeigt die Deformation in

z-Richtung an. Es ist eine deutliche Kopplung der Schwingungsform in horizontaler (x, y) und vertikaler (z) Richtung erkennbar. Dies bedeutet, dass durch eine Anregung in vertikaler Richtung auch eine Schwingung in horizontaler Richtung auftritt.

Zur (vergleichenden) Untersuchung verschiedener Ertüchtigungsmaßnahmen wird das experimentell abgegliche Ausgangsmodell wie folgt modifiziert:

- Variante 1: Ausgangszustand ohne Streben
- Variante 2: System versteift mit 3 Streben (a, b, c) ohne Dämpfung
- Variante 3: System versteift mit 3 Streben (a, b, c), mit Dämpfern in den Streben
- Variante 4: System versteift mit 2 Streben (a, c), mit Dämpfern in den Streben

a, b und c beschreiben verschiedene Positionen für Verstrebungen, die einem Vorschlag des Betreibers entstammen. Die geometrische Anordnung bleibt unverändert.

5.2 Modellierungen der personeninduzierten Anregung im FE-Modell

Um quantifizierbare Ergebnisse in der Simulation zu erhalten, verfolgt die Modellierung der Schwingungsanregung das Ziel eine möglichst realitätsnahe Abbildung zu gewährleisten. Hierzu werden im Modell Anregungspfade definiert, entlang derer eine Anregung durch Gehen simuliert werden kann, siehe Abb. 10. Zur Ermittlung der Anregungspfade werden die Schwingungsformen der relevanten Eigenfrequenzen betrachtet und die Pfade werden entlang der größten Deformationen in vertikaler Richtung definiert.

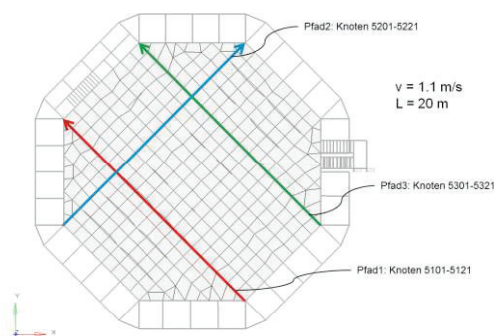


Abb. 10: Anregungspfade im Modell

Für die Schwingungsanregung durch Gehen wird unter Annahme einer Gehgeschwindigkeit von 1.1 m/s, der nach [2] ermittelte Last-Zeit-Verlauf so auf die einzelnen Knoten der Pfade verteilt, dass sich in Summe über alle Knoten wiederum derselbe Last-Zeit-Verlauf ergibt. Abb. 11 zeigt dies exemplarisch an einer Sinus-Schwingung.

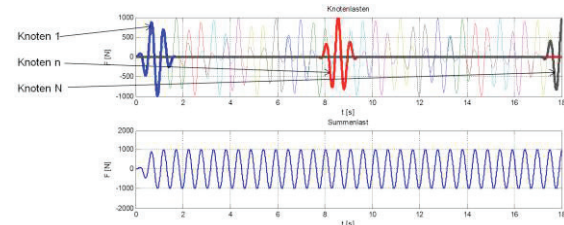


Abb. 11: oben: Last-Zeit-Verlauf an den einzelnen Knoten eines Pfades, unten: Summenlast über alle Knoten eines Pfades

5.3 Auswahl geeigneter Strukturdämpfer

Zur Verminderung der personeninduzierten Schwingungen des Helikopterdecks werden Dämpfungselemente im Kraftfluss der zusätzlichen Versteifungsstreben angebracht, hierzu werden Elastomerdämpfer gemäß Abb. 12 links gewählt. Für die Simulation gilt es nun aus den gewählten Dämpfungselementen die Kenngrößen Steifigkeit und Dämpfung für das FE-Modell abzuleiten. Hierzu wird ein Elastomerdämpfer mit den entsprechenden geometrischen Abmaßen als FE-Volumenmodell abgebildet, siehe Abb. 12 rechts. Die Steifigkeit des Bauteils wird aus Einheitsbelastungszuständen in axialer- und radialer Richtung ermittelt. Der Elastizitätsmodul wird hierbei aus der Shore-Härte (40) abgeleitet. Die Dämpfung wird unter Annahme visco-elastischen Materialverhaltens bei einem Verlustwinkel des Elastomers von 10° berechnet.

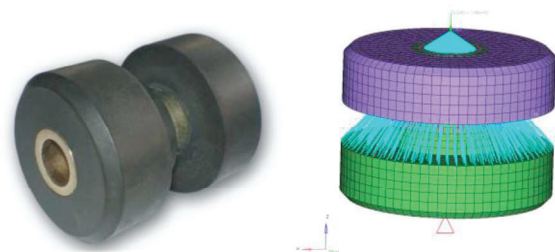


Abb. 12: links: Elastomer-Dämpfer, rechts: FE-Modell des Dämpfers

5.4. Berechnungsschritte

Für die in Abschnitt 5.1 dargestellten Modellvarianten werden zunächst die Eigenfrequenzen der Struktur berechnet. Darauf folgt für jede Eigenfrequenz, die sich im für Gehen relevanten Frequenzbereich befindet, eine Simulation im Zeitbereich. Die Anregung erfolgt entlang dem in 8 gezeigten Pfad, der in der jeweiligen Eigenfrequenz zu den größten Schwingungsamplituden führt. Simuliert wird Gehen mit 2 und 4 Personen, wobei die Gehfrequenz so gewählt wird, dass unter Berücksichtigung des Frequenzbereichs für Gehen, die erste oder zweite Harmonische mit der jeweiligen Eigenfrequenz der Struktur zusammenfällt.

Die Strukturdämpfung in den Stahlbauteilen wird für alle Simulationen zu 0.5% gesetzt. Simuliert werden jeweils 18 s Zeitdauer. Zur Bewertung des Schwingungsverhaltens wird das Beschleunigungsmaximum in horizontaler und vertikaler Richtung aus allen Knoten entlang des Erregungspfades herangezogen. Abb. 13 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Simulation für die erste relevante Eigenfrequenz von Variante 1.

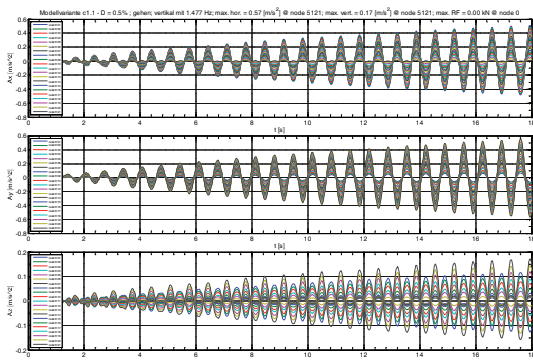


Abb. 13: Ergebnisse der Zeitsimulation für Variante 1 „Gehen mit 2 Personen“

5.5 Ergebnisse

Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der Zeitbereichssimulationen der oben beschriebenen Varianten. Die blau dargestellten Felder zeigen die für die Simulation herangezogene Grundfrequenz des Gehens. Die vier letzten Spalten zeigen die maximal auftretenden Beschleunigungsamplituden für 2 und 4 Personen, jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung. Nach dem gewählten Bewertungskonzept ist für 2 Personen ein hoher Komfort, für vier Personen ein mittlerer Komfort anzustreben.

Für Variante 1 liegen die Beschleunigungen in horizontaler Richtung deutlich außerhalb des Bereichs mittleren Komforts. In vertikaler Richtung sind die auftretenden Beschleunigungs-

werte unkritisch, dies gilt für alle vier betrachteten Varianten.

Bei Variante 2 (reine Versteifungsmaßnahme) werden die Schwinggeschwindigkeiten für hohen Komfort (2 Personen) bzw. mittleren Komfort (4 Personen) gegenüber den Vorgaben um ca. 50 % überschritten. Eine reine Versteifungsmaßnahme hält die angestrebten Komfortkriterien somit nicht ein.

Für Variante 3 und 4 sind die auftretenden Beschleunigungen durchweg im Bereich hohen Komforts, somit wird zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens des Helikopterdeckes die Umsetzung von Variante 4 (2 Streben mit je 6 Elastomerdämpfern) empfohlen, bei der die vereinbarungsgemäß einzuhaltenden Komfortkriterien um ca. das 2.5...3-fache unterschritten werden.

In Realität werden die sich einstellenden Amplituden von den individuellen Kraft-Zeit-Verläufen der gehenden Personen sowie den tatsächlichen Dämpfungsgraden abhängig sein. Verglichen mit dem Ausgangszustand werden sich insbesondere die horizontalen Amplituden deutlich reduzieren (nach 4 teilweise auf 1/10 der Ausgangsamplituden).

Tab. 2: Zusammengefasste Ergebnisse der Variantensimulationen

		Eigenfrequenz f [Hz]	Grundfrequenz Gehen (Vielfache der Eigenfrequenz)						Elastomer- Puffer je Strebe	Gehen mit 1.3 m/s			
			Horizontal			Vertikal				2 Personen D=0.5%		4 Personen D=0.5%	
			1x1	2x2	3x3	1x1	2x2	3x3		max. Besch. [m/s²]	max. Besch. [m/s²]	horizontal	vertikal
			horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal		horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Variante 1	3 Streifen	1	1,477	2,95	1,477	0,739	0,492	1	0,37	0,37	0,34	0,34	
		2	2,613	5,23	2,613	1,307	0,871	3	0,21	0,23	0,42	0,45	
		3	2,780	5,56	2,780	1,390	0,927	2	0,06	0,03	0,12	0,06	
Variante 2 3 Streifen	3	1	2,632	5,26	2,632	1,316	0,877	1	0,22	0,31	0,45	0,7	
		2	3,206	6,41	3,206	1,603	1,009	2	0,07	0,06	0,14	0,12	
		3	4,234	8,47	4,234	2,117	1,411	3	0,09	0,21	0,39	0,42	
Variante 3 3 Streifen	3	1	2,298	4,60	2,298	1,149	0,766	1	0,04	0,21	0,08	0,42	
		2	2,973	5,95	2,973	1,487	0,991	2	0,02	0,05	0,05	0,1	
		3	3,662	7,32	3,662	1,831	1,221	3	0,03	0,11	0,06	0,22	
Variante 4 2 Streifen	3	1	2,255	4,51	2,255	1,128	0,752	1	0,05	0,21	0,1	0,43	
		2	2,936	5,87	2,936	1,468	0,979	2	0,03	0,06	0,05	0,12	
		3	3,221	6,44	3,221	1,611	1,074	3	0,04	0,09	0,07	0,17	
Hoher Komfort		Mittlerer Komfort		simulierte Grundfrequenz für Gehen (ca. 1.6 Hz 2.4 Hz)									
$a_{H,K} \leq 0,15 \text{ m/s}^2$		$0,15 \text{ m/s}^2 \leq a_{M,K} \leq 0,3 \text{ m/s}^2$											
$a_{H,K} \leq 0,5 \text{ m/s}^2$		$0,5 \text{ m/s}^2 \leq a_{M,K} \leq 1,0 \text{ m/s}^2$											

5.6 Alternative Lösungen

Die vorgeschlagene Lösung verfolgte das Ziel der Dämpfungserhöhung der Helikopterdeck-Struktur durch Integration dämpfenden Materials.

Eine hierzu alternative Lösung, die ebenfalls die Dämpfung des Helikopterdeckes erhöht, stellt die Verwendung von passiven gedämpften Tilgern dar. Solch ein Tilger besteht aus einer Reaktionsmasse, die über Feder- und Dämpferelemente an die Struktur angekoppelt wird. Das Feder-Masse-System wird hierbei auf die Eigenfrequenzen des Helikopterdeckes abgestimmt. Durch eine derartige Maßnahme ist es möglich die Dämpfung von Stahlstrukturen signifikant zu erhöhen. Im Hinblick auf den engen Zeithorizont der umzusetzenden Maß-

nahme, erscheint die Realisierung der im vorangegangenen Abschnitt empfohlenen Maßnahme aus Termingründen geeigneter.

6. Konstruktive Umsetzung

Für die konstruktive Umsetzung der Dämpfungseinheiten wurden Elastomerpuffer vom Typ STH 124 gewählt. Je Versteifungsstrebe sind sechs Dämpfungselemente gemäß Abb. 14 verbaut. Durch die Anordnung der Dämpfungselemente geht der gesamte Kraftfluss der Strebe über die Dämpfungselemente, sodass bei jeder dynamischen Kraftänderung Deformationen im Elastomer erzeugt werden, wodurch Schwingungsenergie dissipiert wird.

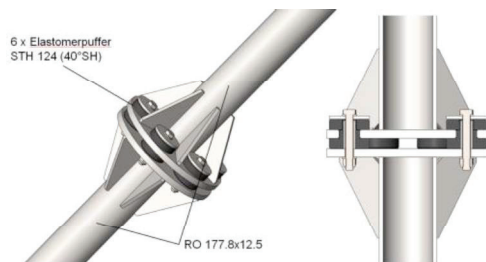


Abb. 14: Elastomerpuffer integriert in Versteifungsstrebe

Literaturnachweis

- [1] VDI 2038 – Blatt 2, VDI-Richtlinie, Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen; Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung
- [2] VDI 2038 – Blatt 1, VDI-Richtlinie, Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen; Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen
- [3] Eva Christiane Butz: *Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen*, Dissertation RWTH Aachen, 2006