4 Science Challenge, 25. Wettbewerb

Aufgabe 1: SFB 1463 – Offshore-Megastrukturen
Strukturüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen

Hintergrund

Deutschland und viele weitere Länder haben sich im Pariser Klimaabkommen im Jahr 2015 gemeinsam dazu verpflichtet, die Erderwärmung auf deutlich unter 2° C zu begrenzen, um den Meeresspiegelanstieg und alle weiteren nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels einzuschränken. Insbesondere die Energiewende, also die Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen anstatt aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, ist ein wichtiger Bestandteil dieses Vorhabens. Solche regenerativen Quellen sind momentan hauptsächlich Solarenergie (Photovoltaik) und Windenergie. Insbesondere in der Offshore-Windenergie hat Deutschland eine Vorreiterrolle inne und hat schon vor mehr als 10 Jahren begonnen, Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee zu errichten. Gegenüber Windenergieanlagen auf dem Land haben die Offshore-Anlagen den Vorteil, dass auf dem Meer ein größeres Platzangebot vorhanden ist und der Wind stärker und kontinuierlicher weht. Aufgrund dessen werden Offshore-Windenergieanlagen immer größer, was Ingenieur*innen aller Fachrichtungen vor wachsende Herausforderungen stellt. Im Sonderforschungsbereich 1463 „Offshore-Megastrukturen" werden solche Mega-Offshore-Windenergieanlagen der Zukunft von einem interdisziplinären Team aus verschiedenen Ingenieursdisziplinen (Bauingenieurwesen, Maschinenbau etc.) gemeinsam erforscht.

Abbildung 1: Offshore-Windpark (Quelle: pixabay.com)

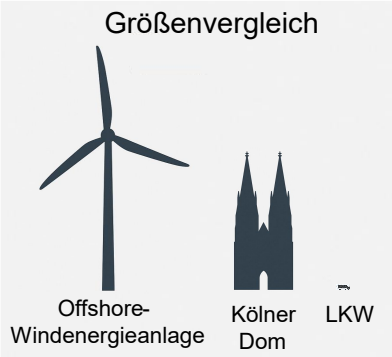

Abbildung 2: Größenvergleich

Mit der Aufgabe können wir euch nur einen kleinen Teil der Ingenieurleistungen zeigen, die für den Betrieb einer Offshore-Windenergieanlage benötigt werden. Wenn ihr Spaß an der Aufgabe hattet und mehr über Offshore-Windenergieanlagen wissen möchtet, findet ihr auf der Homepage des Sonderforschungsbereichs (sfb1463.uni-hannover.de) weitere Informationen zur aktuellen Forschung an Offshore-Windenergieanlagen und auf der Homepage der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie (fbg.uni-hannover.de) weiterführende Informationen für die Studiengänge der Fakultät.

Bei Windenergieanlagen muss darauf geachtet werden, dass diese nicht beschädigt oder gar zerstört werden, weil ein Versagen der Windenergieanlage katastrophale Folgen für Menschen und Umwelt haben kann. In dieser Aufgabenstellung soll es um die Strukturüberwachung von Windenergieanlagen gehen. Hierbei ist die Idee, die Anlagen mit Hilfe von Sensoren, welche die Schwingungen der Anlage erkennen, dauerhaft zu überwachen.

Aufgabe 1: (6 Punkte)

a) Die Gefahr für solch große Windenergieanlagen wird deutlich, wenn man an vergangene Resonanzkatastrophen denkt (Tacoma-Narrows-Brücke).
Recherchiert zum Thema Schwingungen und beantwortet die folgenden Fragen:
   - Was sind Eigenfrequenzen?
   - Welche modalen Größen gibt es außerdem noch? (Gebt zwei weitere an.)
   - Welche modalen Größen werden besonders häufig für die Strukturüberwachung von Bauwerken und Windenergieanlagen verwendet?

b) Wie können modale Größen berechnet werden und wie können sie aus einer Schwingungsmessung bestimmt werden?

Die Eigenfrequenz (f) einer Struktur lässt sich ganz allgemein über das Verhältnis aus der Masse (m) und der Steifigkeit (k) einer Struktur mit folgender Formel berechnen:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

In Tabelle 1 sind unterschiedliche Materialwerte für verschiedene Strukturen gegeben.

Tabelle 1: Steifigkeitswerte zur Eigenfrequenzberechnung

Material	Steifigkeit in N/m bzw. kg/s^2
Holz	500
Gummi	100
Stahl	50000
Aluminium	30000
Beton	10000

Aufgabe 2: (7 Punkte)

a) Berechnet die Eigenfrequenzen für die Strukturen aus den unterschiedlichen Materialien jeweils mit einer Masse von $m = 5kg$ und den Steifigkeiten aus Tabelle 1.

b) Welche Zusammenhänge lassen sich aus dem Material und der Eigenfrequenz erkennen?

c) Überlegt euch ein Beispiel, an dem man dies anschaulich beweisen kann.

Wie deutlich zu erkennen ist, ist die Eigenfrequenz abhängig von der Struktur. Daher ist die generelle Idee der Strukturüberwachung mit modalen Größen, dass sich die modalen Größen (z. B. die Eigenfrequenzen) einer Struktur verändern, wenn sich die Struktur verändert (z. B. durch einen Schaden). Ein Schaden kann hierbei zum Beispiel Materialermüdung, Rost, Risse, gelöste Schraubenverbindungen und vieles mehr sein. All diese Schäden führen zu einer Steifigkeitsreduzierung an einer bestimmten Stelle der Struktur.

Im Folgenden wollen wir ein Beispiel eines Zweimassenschwingers betrachten. Dies ist ein fiktives Beispiel mit zwei Massen, die mit einer Feder verbunden sind und mit einer weiteren Feder mit dem Boden fest verbunden sind (siehe Abbildung 3). Dieses Beispiel ist natürlich nicht mit einer Windenergieanlage vergleichbar, es wird aber in der Forschung oft verwendet, um neue Methoden das erste Mal zu testen.

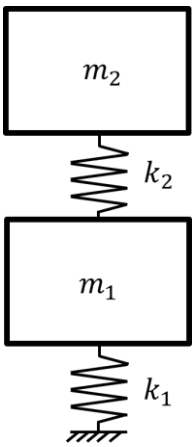

Abbildung 3: Skizze des Zweimassenschwingers

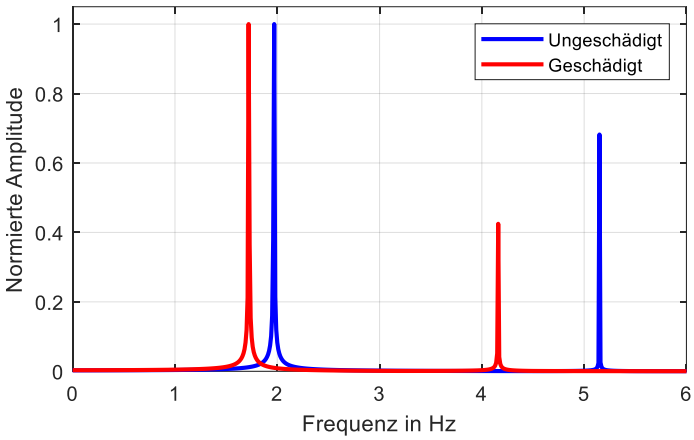

Abbildung 4: Frequenzspektren des geschädigten und ungeschädigten Zweimassenschwingers

Aus Messungen können die Eigenfrequenzen über das Frequenzspektrum bestimmt werden. In Abbildung 4 sind zwei Frequenzspektren zu sehen, in blau von einem ungeschädigten Zweimassenschwinger und in rot von einem geschädigten Zweimassenschwinger. Die Spitzen der Kurven zeigen, wo sich jeweils die erste und zweite Eigenfrequenz befindet.

Aufgabe 3: (5 Punkte)

Bestimmt jeweils die Änderung der ersten und zweiten Eigenfrequenz ($\Delta M_1, \Delta M_2$) aus der Abbildung.

Aus der Abbildung lässt sich bereits erkennen, dass die Struktur beschädigt wurde, weil sich die Eigenfrequenz verändert hat. Um jetzt herauszufinden, wo der Schaden ist (welche Feder) und wie groß der Schaden ist (Steifigkeitsreduzierung), verwenden wir eine vereinfachte Form von Modellanpassung. Hierfür berechnen wir die Eigenfrequenzen des Zweimassenschwingers für unterschiedliche Szenarien und vergleichen diese Ergebnisse mit unseren Ergebnissen aus der Messung (Aufgabe 3). Genauer gesagt betrachten wir, um wie viel sich die beiden Eigenfrequenzen jeweils geändert haben. Die beiden ersten Eigenfrequenzen ($f_{1,2}$) lassen sich über folgende Formel berechnen:

$$f_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{2\pi}$$

Die Kreisfrequenz ($\omega_{1,2}^2$) lässt sich mithilfe folgender Formel berechnen:

$$m_1 m_2 \omega^4 - \big(m_1 k_2 + m_2(k_1 + k_2)\big)\omega^2 + k_1 k_2 = 0$$

Um die Änderung der Frequenz zu berechnen, benötigen wir ebenfalls die berechneten Ergebnisse des ungeschädigten Zweimassenschwingers. Diese Ergebnisse sollten dann sehr ähnlich sein zu den blauen Spitzen in der Abbildung 4.

Um nun den Schaden zu lokalisieren (welche Feder) und zu quantifizieren (wie viel % Steifigkeitsreduzierung), müssen unterschiedliche Szenarien berechnet werden. Normalerweise werden hierfür Optimierungsverfahren verwendet. In diesem Beispiel werden folgende Szenarien vorgegeben.

Tabelle 2: Szenarien für die Modellanpassung

Szenario	$k_1 in\ N/m$	$k_2\ in\ N/m$
Ungeschädigt	400	400
1	400	300
2	400	200
3	400	100
4	300	400
5	200	400
6	100	400

$$\Delta S_1 = f_{ungeschädigt,1} - f_{Szenario_1...6,1}$$
$$\Delta S_2 = f_{ungeschädigt,2} - f_{Szenario_1...6,2}$$

$$d = |\Delta S_1 - \Delta M_1| + |\Delta S_2 - \Delta M_2|$$

Aufgabe 4: (12 Punkte)

a) Berechnet die Eigenfrequenzen für die entsprechenden Szenarien mit den Werten aus Tabelle 2 und mit den Massen $m_1 = m_2 = 1kg$. Stellt hierfür zunächst die obere Formel nach ω^2 um. Berechnet anschließend mit der Formel für d, wie gut die sechs verschiedenen Szenarien zu der Messung passen. Kleine d-Werte bedeuten größere Übereinstimmung. Tipp: Für die mehrfache Berechnung einer Formel mit unterschiedlichen Werten sind programmierbare Taschenrechner, Tabellenprogramme wie Excel oder Programmiersprachen wie Python und Matlab sehr hilfreich, um den Arbeitsaufwand zu reduzieren.

b) Jetzt, wo wir unterschiedliche Szenarien berechnet haben, könnt ihr aus den Einstellungen der Szenarien $(\boldsymbol{k_1}, \boldsymbol{k_2})$ und den entsprechenden d-Werten erkennen, wie der Zweimassenschwinger in Abbildung 4 (rot) geschädigt worden sein musste. Welche Feder wurde um wie viel Prozent geschädigt? Anmerkung: Der d-Wert kann theoretisch gleich null sein. In der Realität ist dies aber meist nicht möglich aufgrund von Modellfehlern. In unserem Beispiel ist das wegen der Ungenauigkeit beim Ablesen der gemessenen Eigenfrequenz aus dem Diagramm auch nicht zwingend möglich.

Viel Erfolg bei der ersten Aufgabe!

Allgemeine Hinweise
Einsendeschluss: Sonntag, 02. November 2025, 19:59 Uhr

Die Abgabe der Lösungen erfolgt über Stud.IP: https://studip.uni-hannover.de

Das zulässige Dateiformat für die zusammengeschriebene Lösung (mit eingebetteten Bildern) ist PDF.
Gebt auf der ersten Seite eurer PDF-Datei euren Teamnamen, die Namen der einzelnen Teammitglieder sowie deren Schulen an. Benennt eure Datei nach folgendem Schema: „Teamname_Aufgabe1".

Es ist ausreichend, wenn eine*r von euch die PDF-Datei stellvertretend für das gesamte Team hochlädt.
Das Hochladen der Datei funktioniert wie folgt:

Loggt euch mit den bei eurer Anmeldung zur 4 Science Challenge verwendeten Zugangsdaten auf der Stud.IP-Seite ein (bitte nutzt dazu den „Login ohne WebSSO").
Geht dann auf „Meine Veranstaltungen" und auf die 4 Science Challenge 2025/2026.
Geht dann oben auf „Dateien" und auf den Ordner „Upload Aufgabe 1". Dort könnt ihr entweder über „Dokument hinzufügen" oder über „Dateien hochladen" eure PDF-Datei hochladen.

Wenn ihr die Datei hochgeladen habt, öffnet sich ein Fenster, in dem u. a. nach Lizenzinformationen gefragt wird. Dieses braucht ihr nicht weiter zu beachten und könnt einfach auf „Speichern" klicken.

Aus Datenschutzgründen ist der Upload-Ordner so konfiguriert, dass ihr zwar Dateien hochladen, den Inhalt des Ordners aber nicht sehen könnt. ***Bitte achtet darauf, dass ihr eure PDF-Datei wirklich innerhalb des Ordners „Upload Aufgabe 1" hochladet und nicht außerhalb davon – andernfalls können die anderen Teams eure Lösung sehen!***

Die Teilnahmebedingungen und weitere Informationen findet ihr unter www.uni-hannover.de/4sciencechallenge

Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.