

Karl-Heinz Hapel

**Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter
Offshore-Konstruktionen**

Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften

Fundamentals and Advances in the Engineering Sciences

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Wilfried B. Krätzig, Ruhruniversität Bochum
Prof. Dr.-Ing. em. Theodor Lehmann, Ruhruniversität Bochum
Prof. Dr.-Ing. Oskar Mahrenholtz, TU Hamburg

Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch,
von Michael Jischa

Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse,
von Hans G. Natke

Mechanik der Flächentragwerke,
von Yavuz Basar und Wilfried B. Krätzig

Introductory Orbit Dynamics,
von Fred P. J. Rimrott

**Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter
Offshore-Konstruktionen,**
von Karl-Heinz Hapel

Manuskripte oder Buchentwürfe werden gerne im Herausgeberkreis beraten
und werden erbeten unter der Adresse der Herausgeber
oder an den Vieweg Verlag, Faulbrunnenstr. 13, D-6200 Wiesbaden.

Karl-Heinz Hapel

Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Offshore-Konstruktionen

Mit 245 Bildern und 20 Tabellen



Prof. Dr.-Ing. K.-H. Hapel
Institut für Schiffs- und Meerestechnik
Fachbereich 12 Verkehrswesen
Technische Universität Berlin
Salzufer 17 / 19
D-1000 Berlin 10

Alle Rechte vorbehalten.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1990

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH,
Braunschweig 1990

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1990



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN 978-3-528-06368-9

ISBN 978-3-663-14124-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-14124-2

Vorwort

Noahs Arche war als Dreidecker von vielleicht 140 Meter Länge, 23 Meter Breite und 14 Meter Höhe nach dem Vorstellungsvermögen der alten Israeliten mosaischer Zeit ein gewaltiges, aus eigener Anschauung nicht bekanntes Wasserfahrzeug, auch wenn man weniger an ein Schiff als vielmehr an ein auf einem Floß ruhendes Haus denken muß. Der theoretische Nachweis dafür, daß Noahs Großversuch zum Überleben von Mensch und Tier in einer weltweiten, die höchsten Erhebungen übersteigenden Flut überhaupt gelingen konnte, daß die Arche also jedenfalls schwimmfähig gewesen sein mußte, konnte - wie so häufig in Wissenschafts- und Technikgeschichte - erst später, nämlich etwa 1000 Jahre danach, geführt werden. Der bedeutendste antike Mathematiker und Physiker, der Grieche Archimedes (287-212 v. Chr.), entdeckte der Überlieferung nach mit dem bekannten Ausruf "Heureka" (ich hab's gefunden) das nach ihm benannte Prinzip, nach dem ein Schwimmkörper nicht schwerer sein darf als die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge.

Archimedes war auch der erste Wissenschaftler, der im Rahmen seiner Bemühungen um die Quadratur des Kreises die Finite-Element-Methode mit Erfolg anwendete. Seine Berechnung der unteren Grenze $3 \frac{10}{71}$ für die Zahl π beruht auf der Einteilung des Kreisinnern in 96 gleiche sektorielle Dreieckselemente. Da er diese Grenze über den Umfang des so einbeschriebenen regelmäßigen Polygons ermittelte, handelt es sich eigentlich um eine Anwendung der Boundary-Element-Methode. Hierbei kann die erzielbare Genauigkeit noch durch die einfache Anschauung abgeschätzt werden. Vorsicht geboten ist jedoch beim kritiklosen Einsatz von Finite-Element-Programmen bei der Strukturanalyse. Ergebnisse solcher Analysen müssen - wie sich in der Praxis häufig zeigt - nicht immer die Wirklichkeit beschreiben, und zwar über eine nicht ausreichende Genauigkeit bis hin zu qualitativ völlig falschen Ergebnissen. Die Einteilung des Kreises in z.B. 44 Randlelemente liefert die Zahl π mit einer Genauigkeit von 0,08 %, wohingegen die Berechnung der Biegespannung einer meerestechnischen Förderleitung von 2200 Meter Länge eingeteilt in dieselbe Anzahl Elemente gleicher Länge leicht Fehler von 20 % und zwar zur unsicheren Seite hin liefern kann. Völlig falsche Ergebnisse sollen in Industriebetrieben auch schon zur Auflösung von Rechenabteilungen, die nur mit Mathematikern und Informatikern ohne ausreichende physikalische Kenntnisse besetzt waren, geführt haben.

Damit wird natürlich nicht die Finite-Element-Methode diskreditiert. Dem Anwender fertiger Programme sind jedoch häufig die physikalischen Grenzen der Methode für die verschiedenen Anwendungsfälle unbekannt. Es ist deshalb unerläßlich, in schwierigen Fällen sämtliche zur Verfügung stehenden Methoden, numerische, analytische und experimentelle, zur gegenseitigen Absicherung der Ergebnisse einzusetzen. Gerade die analytischen Methoden erlauben es dem jungen, noch unerfahrenen Ingenieur lediglich unter Einsatz seines PC oder gar nur mit

einem Taschenrechner bewaffnet, wenigstens eine grobe Überschlagsrechnung durchzuführen. Analytische Methoden besitzen darüber hinaus den großen Vorteil, daß mit ihnen auf relativ schnelle Weise Parameterstudien durchgeführt werden können. Durch die dabei zu Tage tretenden mathematischen Gesetzmäßigkeiten gewinnt man hier leichter als bei numerischen Methoden einen tiefen Einblick in das Grundsätzliche mechanischer Abläufe in Abhängigkeit von Konstruktions- oder Umweltdaten.

Damit ist eine Zielsetzung des vorliegenden Lehrbuchs genannt. Es entstand aus den Vorlesungen "Festigkeit meeres technischer Konstruktionen", die an der Technischen Universität Berlin in den Studienrichtungen "Schiffs- und Meerestechnik" und "Technomathematik" verankert sind. Es wendet sich an Studenten auch anderer ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen mit dem Kenntnisstand etwa nach einem abgeschlossenen Grundstudium und an angehende Ingenieure, die mit Entwurf, Auslegung und Bemessung von Tragwerken befaßt sind. Es werden grundlegende physikalische Vorgänge und prinzipielle analytische Lösungsmethoden vorgestellt, die bei der dynamischen Analyse von Offshore-Konstruktionen - jedoch nicht nur dort - eine Rolle spielen. Die dafür notwendigen Grundlagen mechanischer Schwingungen, von Zufallsprozessen und von Zufallsschwingungen linearer Systeme werden ausführlich vorangestellt. Mittels der Modalanalyse werden meeres technische Konstruktionen unter der Wirkung von Meereswellen, von Meeresströmungen und von Wind unter besonderer Berücksichtigung des Zufallscharakters der Belastungen und deren Auswirkung auf die Lebensdauer der Konstruktionen behandelt. Der Leser findet viele ergänzende Beispielrechnungen und zu den meisten Kapiteln Übungsaufgaben, die der eigenen Lernkontrolle dienen sollen. Das Buch sieht sich als Einführung in den umrissenen Problemkreis und soll aus sich selbst heraus ohne weitere Hilfen verständlich sein.

Die Literaturliste dieses Buches nennt nur solche Titel, auf die bei der Abfassung des Textes mittelbar oder unmittelbar zurückgegriffen worden ist. Einen einigermaßen vollständigen Überblick über ein Teilgebiet kann man nur gewinnen, wenn man die bei den zitierten Arbeiten erwähnten Literaturstellen weiterverfolgt. Das im deutschsprachigen Raum derzeit wichtigste Werk ist das Buch "Meeres technische Konstruktionen" der Kollegen Clauss, Lehmann und Østergaard [10]. Es wird mit seinem Festigkeitsteil, in dem der Leser auch eine Darstellung der Finite-Element-Methode findet, als Ergänzung empfohlen. Als englischsprachige, allerdings knappere Einführung gut geeignet sind die beiden Bücher "Dynamic Analysis of Offshore Structures" von Brebbia und Walker [5] und "Probabilistic Theory of Ship Dynamics" von Price und Bishop [66], letzteres jedenfalls mit seinem allgemeinen Teil über die statistischen Grundlagen, über Wellen und Seegänge. Wer zunächst nur an Zufallsschwingungen und ausführlicher an Fourier-Analyse interessiert ist, sollte zu dem Buch "Random Vibrations and Spectral Analysis" von Newland [58] greifen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Schwingungsmechanische Grundlagen	
1.1 Linearer Einmassenschwinger	6
1.1.1 Freie ungedämpfte Schwingung	9
1.1.2 Freie gedämpfte Schwingung	10
1.1.3 Erzwungene gedämpfte Schwingung. Übertragungsfunktion	12
1.2 Nichtlinearer Einmassenschwinger	16
1.2.1 Erzwungene Schwingung bei nichtlinearer Dämpfung	16
1.2.2 Erzwungene Schwingung in selbsterregten Systemen	22
1.3 Linearer Zweimassenschwinger	27
1.3.1 Freie ungedämpfte Schwingung. Eigenschwingungsanalyse	27
1.3.2 Erzwungene gedämpfte Schwingung	31
1.4 Lineares System mit mehreren Freiheitsgraden	35
1.4.1 Eigenschwingungsanalyse am Balken	35
1.4.2 Näherungsberechnung von Knicklasten und Eigenfrequenzen nach der Energiemethode	41
1.4.3 Erzwungene gedämpfte Bewegung des Balkens. Modalanalyse	48
1.4.4 Werkstoffdämpfung	54
1.4.5 Hydrodynamische Dämpfung	57
Übungsaufgaben zu Kapitel 1	60
2 Zufallsprozesse	
2.1 Wahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeitsverteilung und -dichte	62
2.2 Mittelwerte, statistische Erwartung	65
2.3 Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen	68
2.3.1 Die Gleichverteilung	68
2.3.2 Die Normalverteilung	68
2.3.3 Die Rayleigh-Verteilung	70
2.3.4 Die Gumbel-Verteilung	72
2.3.5 Die Weibull-Verteilung	73
2.4 Zweidimensionale Wahrscheinlichkeit, Kovarianz	74
2.5 Lineare Regression	79
2.6 Die charakteristische Funktion	80
2.7 Bedingte Wahrscheinlichkeit	82
2.8 Transformation von Wahrscheinlichkeitsdichten	84
2.9 Der zentrale Grenzwertsatz	89
2.10 Ensemble-Mittelung	90
2.11 Autokorrelationsfunktion	92

2.12 Kreuzkorrelationsfunktion	98
2.13 Fourier-Analyse	101
2.13.1 Fourier-Reihe	101
2.13.2 Fourier-Integral	104
2.13.3 Der Faltungssatz	110
2.13.4 Mehrdimensionale Fourier-Transformation	113
2.14 Spektraldichte	113
2.15 Kreuzspektraldichte	120
2.16 Momente des Spektrums	124
2.17 Breitbandprozeß	126
2.18 Schmalbandprozeß	127
2.19 Zufallsfeldprozeß	129
2.20 Niveaureisungen und Maximalwertverteilungen	135
2.20.1 Anzahl der Niveaureisungen	135
2.20.2 Maximalwertverteilung schmalbandiger Zufallsprozesse	138
2.20.3 Niveauüberschreitende Maxima von Zufallsprozessen beliebiger Bandbreite	140
2.20.4 Maximalwertverteilung von Zufallsprozessen beliebiger Bandbreite	143
2.20.5 Die $1/n$ -höchsten Maximalwerte	147
2.20.6 Erwarteter Maximalwert	151
2.20.7 Rückkehrperiode eines Maximalereignisses	155
Übungsaufgaben zu Kapitel 2	158

3 Zufallsschwingungen linearer Systeme

3.1 Eingangs-Ausgangs-Beschreibung	160
3.2 Impuls- und Sprungeingang	160
3.3 Impulsantwort, Übertragungsfunktion und Systemantwort	163
3.4 Impulsantwort und Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers	166
3.5 Residuensatz	167
3.5.1 Laurentreihe und Residuen	167
3.5.2 Residuensatz und Integralberechnung	168
3.6 Eingangs-Ausgangs-Beziehungen für Zufallsprozesse	169
3.7 Eingangs-Ausgangs-Beziehungen für Zufallsprozesse mit zwei Eingängen	177
3.8 Impulsantwort und Übertragungsfunktion eines Kontinuums	180
3.9 Eingangs-Ausgangs-Beziehungen für ein Kontinuum unter Zufallsbelastung	183
3.10 Nichtlinearer Einmassenschwinger unter Zufallsbelastung	189
Übungsaufgaben zu Kapitel 3	191

4 Meerestechnische Konstruktionen unter Wellenbelastung

4.1 Meereswellen und Seegang	194
4.1.1 Lineare Wellentheorie	194
4.1.2 Wellenenergie	198

4.1.3 Unregelmäßiger Seegang	200
4.1.4 Wellenenergiespektrum	205
4.1.5 Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm	210
4.1.6 Wellenhöhen-perioden-Zuordnung	215
4.1.7 Wellenhöhen-Windgeschwindigkeiten-Zuordnung	220
4.2 Lastannahmen	221
4.2.1 Morison-Formel	221
4.2.2 Wellenkraft auf einen vertikalen starren Pfahl	225
4.2.3 Linearisierung der Widerstandskraft beim Entwurfswellenkonzept	228
4.2.4 Linearisierung der Widerstandskraft in der stochastischen Analyse	230
4.2.5 Hydrostatische Kraft auf einen gebogenen Pfahl	231
4.3 Schwingungsanalyse nach dem Entwurfswellenkonzept	234
4.3.1 Bewegungsgleichung	234
4.3.2 Schwingungsanalyse der einfachen Pfahl-Plattform-Konstruktion	237
4.3.3 Einfluß des Beinabstandes	242
4.4 Schwingungsanalyse nach dem stochastischen Konzept	249
4.4.1 Schwingungsanalyse der einfachen Pfahl-Plattform-Konstruktion	249
4.4.2 Einfluß des Beinabstandes	255
Übungsaufgaben zu Kapitel 4	259

5 Meerestechnische Konstruktionen unter Windbelastung

5.1 Eigenschaften des natürlichen Windes	260
5.1.1 Frequenzbereiche des Windes	260
5.1.2 Höhenprofil des Windes	261
5.1.3 Statistische Verteilung der maximalen Windgeschwindigkeiten	262
5.1.4 Rückkehrperiode einer R-Jahreswindgeschwindigkeit	264
5.1.5 Spektraldichte des turbulenten Geschwindigkeitsanteils	264
5.2 Lastannahmen	265
5.2.1 Aerodynamische Übertragungsfunktion	266
5.2.2 Windkraft	268
5.3 Schwingungsanalyse für stochastische Windbelastung	271
5.4 Schwingungsanalyse für eine deterministische Einzelbö	275

6 Meerestechnische Konstruktionen unter der Wirkung von Meeresströmungen

6.1 Gezeitenströmungen	282
6.2 Windinduzierte Strömungen	283
6.3 Permanente Strömungen und seismische Fluten	283

7 Wirbelinduzierte Schwingungen meerestechnischer Konstruktionen

7.1 Die Kármánsche Wirbelstraße	284
7.2 Strömungskräfte	287
7.3 Wirbelinduzierte Querschwingungen kleiner Amplitude	288
7.4 Strömungszillator	290

8 Selbsterregte Schwingungen meeres technischer Konstruktionen	
8.1 Strömungskräfte	296
8.2 Kritische Anströmgeschwindigkeit	298
8.3 Grenzyklus	299
9 Lebensdaueranalyse meeres technischer Konstruktionen	
9.1 Grundbegriffe der Schwingfestigkeit	306
9.2 Dauer- und Zeitfestigkeit	307
9.3 Betriebsfestigkeit	313
9.4 Deterministische Lebensdaueranalyse	314
9.5 Schädigung durch eine Zufallsbeanspruchung	319
9.6 Stochastische Lebensdaueranalyse	321
10 Meerestechnische Rohrleitungen	
10.1 Bewegungsgleichung des Drilling-Risers	324
10.2 Die Besselsche Differentialgleichung	327
10.2.1 Lösung nach der Methode der unbestimmten Koeffizienten	328
10.2.2 Die inhomogene Besselsche Differentialgleichung	330
10.2.3 Asymptotisches Verhalten von Bessel- und Lommel-Funktion	331
10.2.4 Die modifizierte Bessel- und Lommel-Funktion	332
10.3 Riserstatik	334
10.3.1 Zug-Biegung des Risers nach der Theorie 2. Ordnung	335
10.4 Riserdynamik	341
10.4.1 Linearisierung des Strömungswiderstandes	343
10.4.2 Transformation der linearisierten Bewegungsgleichung	343
10.4.3 Die freien ungedämpften Schwingungen	346
10.4.4 Die resonanzerregten gedämpften Schwingungen	348
10.4.5 Oberschwingungen als Korrektur der linearisierten Analyse	358
10.4.6 Stochastische Schwingungsanalyse	361
Übungsaufgaben zu Kapitel 10	365
Lösungen der Übungsaufgaben	366
Literatur	368
Tabelle bestimmter Integrale	373
Sachwort- und Namenverzeichnis	374