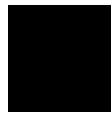


kassel  
university



press

**Zur Identifikation von instationären Luftkräften  
unter Berücksichtigung nichtlinearer aeroelastischer Effekte**

Harald Decker

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) im Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Gesamthochschule Kassel

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Thiele

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Link

Tag der mündlichen Prüfung

28. Juli 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Decker, Harald**

Zur Identifikation von instationären Luftkräften unter Berücksichtigung nichtlinearer aeroelastischer Effekte / Harald Decker. - Kassel : kassel univ. press, 2000. - 165 S. : Ill.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2000

ISBN 3-933146-45-3

© 2000, kassel university press GmbH, Kassel

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

Umschlaggestaltung: 5 Büro für Gestaltung, Kassel

Druck und Verarbeitung: Zentraldruckerei der Universität Gesamthochschule Kassel

Printed in Germany

---

# Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Stahlbau des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Universität Gesamthochschule Kassel.

Gefördert wurde sie durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die das Graduiertenkolleg „Identifikation von Material- und Systemeigenschaften“, an dem ich teilgenommen habe, finanziell getragen hat.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frieder Thiele für die Anregung zu dem Thema und seine wissenschaftliche Betreuung. Die mir gewährten Gestaltungsfreiräume und die hervorragenden Arbeitsbedingungen waren die Grundlagen für die erfolgreiche Anfertigung meiner Arbeit.

Mein Dank geht ebenso an Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Link für die Übernahme des Zweitgutachtens und die damit verbundenen Mühen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haupt, dem Sprecher des Graduiertenkollegs, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Burkhard Schulz-Jander danke ich für die Bereitschaft in der Promotionskommission mitzuwirken.

Ein weiterer Dank geht an die Mitglieder des Graduiertenkollegs, die in den gemeinsamen Treffen und Diskussionsrunden einen interessanten und fruchtenden Einblick in verwandte Themen ermöglichten und somit auch zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Und zu guter Letzt bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen im Fachgebiet Stahlbau, die jeder auf seine Weise mein Schaffen gefördert haben und insbesondere für ein geeignetes Klima während der vielen Arbeitsstunden gesorgt haben.

Kassel, im August 2000

Harald Decker



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Größenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	7
1.2 Einordnung in die Forschung . . . . .	8
1.2.1 Entwicklung der Analyseverfahren nach linearer Theorie . . . . .	8
1.2.2 Nichtlineare aeroelastische Effekte . . . . .	11
1.3 Vorgehensweise . . . . .	12
<b>2 Theoretischer Teil</b>	<b>13</b>
2.1 Gleichungen für das mathematische Modell . . . . .	13
2.1.1 Bewegungsgleichung . . . . .	13
2.1.2 Spezielle analytisch ermittelbare Luftkräfte . . . . .	16
2.1.3 Ansätze für die Luftkraftkoeffizienten . . . . .	21
2.1.3.1 Ansätze in Anlehnung an die quasistationäre Theorie . . . . .	21
2.1.3.2 Luftkräfte als Strömungs-Oszillator . . . . .	22
2.2 Lösung der Bewegungsgleichung . . . . .	23
2.2.1 Lineare Differentialgleichung . . . . .	23
2.2.2 Nichtlineare Differentialgleichung . . . . .	27
2.2.2.1 Analytische Näherungslösung . . . . .	28
2.2.2.2 Numerische Lösung . . . . .	30
2.3 Identifikation von Luftkräften im Zeitbereich . . . . .	31
2.3.1 Aufbereitung der Meßdaten . . . . .	31
2.3.2 Koordinatentransformation . . . . .	32
2.3.3 Integration und Differentiation der Zeitverläufe . . . . .	32
2.3.4 Parameterschätzung . . . . .	37
2.3.5 Identifikationsgleichung für die Versuche ohne Anströmung . . . . .	39
2.3.6 Identifikationsgleichung für die Versuche mit Anströmung . . . . .	40
2.3.6.1 Lineare und nichtlineare Ansätze . . . . .	40
2.3.6.2 Strömungs-Oszillator-Modell . . . . .	41
2.3.7 Identifikation am simulierten nichtlinearen System . . . . .	42
2.3.8 Identifikation am simulierten Strömungs-Oszillator-Modell . . . . .	46
<b>3 Experimenteller Teil</b>	<b>48</b>
3.1 Allgemeines . . . . .	48
3.2 Windkanal . . . . .	48
3.3 Querschnittsmodelle . . . . .	49
3.3.1 Geometrische Eigenschaften . . . . .	49
3.3.2 Elastische Eigenschaften . . . . .	51

3.3.3	Starrkörpereigenschaften . . . . .	51
3.4	Luftkräfte am ruhenden Modell . . . . .	53
3.4.1	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	53
3.4.2	Versuchsauswertung . . . . .	53
3.5	Luftkräfte am schwingenden Modell . . . . .	56
3.5.1	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	56
3.5.2	Erste Analyse der gemessenen Beschleunigungen . . . . .	57
3.5.3	Identifikation von Luftkräften mit linearem Ansatz . . . . .	58
3.5.3.1	Allgemeines . . . . .	58
3.5.3.2	Ergebnisse der einzelnen Modelle . . . . .	61
3.5.3.3	Zusammenfassung der „linearen“ Ergebnisse . . . . .	63
3.5.4	Identifikation von Luftkräften mit nichtlinearen Ansätzen . . . . .	64
3.5.4.1	Parametermatrizen . . . . .	64
3.5.4.2	Ausgewählte Zeit- und Frequenzverläufe . . . . .	65
3.5.4.3	Zusammenfassung der „nichtlinearen“ Ergebnisse . . . . .	66
3.5.5	Identifikation von Luftkräften mit Strömungs-Oszillator . . . . .	67
3.5.5.1	Parametermatrizen . . . . .	67
3.5.5.2	Ausgewählte Zeit- und Frequenzverläufe . . . . .	67
3.5.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	67
3.5.6	Vergleich aller Luftkraftansätze . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>Schlußfolgerungen und Ausblick</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>75</b>
7.1	Identifikation an simulierten Systemen . . . . .	76
7.1.1	Nichtlineare Bewegungsgleichung . . . . .	76
7.1.2	Bewegungsgleichung mit Strömungs-Oszillator . . . . .	79
7.2	Systemparameter der Querschnittsmodelle . . . . .	82
7.3	Luftkraftkoeffizienten des ruhenden Modells . . . . .	86
7.4	Amplitudenspektren der gemessenen Luftkräfte . . . . .	91
7.5	Instationäre Luftkräfte mit linearem Ansatz . . . . .	102
7.5.1	Identifizierte Parameter . . . . .	102
7.5.2	Identifizierte Eigengrößen . . . . .	114
7.6	Instationäre Luftkräfte, nichtlineare Ansätze . . . . .	134
7.6.1	Identifizierte Parameter . . . . .	134
7.6.2	Zeit- und Frequenzverläufe . . . . .	140
7.7	Instationäre Luftkräfte mit Strömungs-Oszillator . . . . .	149
7.7.1	Identifizierte Parameter . . . . .	149
7.7.2	Zeit- und Frequenzverläufe . . . . .	150
7.8	Spektren von integrierten Zeitverläufen . . . . .	152
7.9	Anwendungsbeispiel . . . . .	154
	<b>Fachschrifttum</b>	<b>156</b>

---

## Größenverzeichnis

---

a) Formelzeichen, lateinische Buchstaben

Symbol	Definition	Bezeichnung	SI-Einheit
$b$	BG <sup>1</sup>	halbe Breite des Modellquerschnittes	m
$c$		Luftkraftkoeffizient	1
$C$		Theodorsenfunktion	1
$d$		Dämpfungsgröße	kg/s o. kg m <sup>2</sup> /s
$D$	Gl. (2.4)	Lehrsches Dämpfungsmaß	1
$e$	Abb. 2.6	halber Abstand zwischen Freiheitsgraden	m
$f$		Frequenz	Hz
$F$		Kraft	N
$h$	BG	Verschiebung	m
$k$		Steifigkeit	N/m
$k$	Gl. (2.11)	reduzierte Frequenz	1
$l$	BG	Länge	m
$L$	Gl. (2.61)	Lagrange-Polynome	
$M$		Moment	Nm
$m$	BG	Masse	kg
$N$		Maßstabfaktor	1
$P$	Abs. 2.65	Polynom	
$q$		generalisierte Koordinate	
$r$	Gl. (2.4)	Trägheitsparameter	1
$T$	Gl. (3.1)	Turbulenzgrad	1
$t$	BG	Zeit	s
$u, U$		Geschwindigkeit	m/s
$w$	Gl. (2.63)	Integrationsgewichte	1
$x$	BG	Länge	m
$y$	BG	Länge	m
$z$	BG	Länge	m

---

<sup>1</sup>BG = Basisgröße

## b) Formelzeichen, griechische Buchstaben

Symbol	Definition	Bezeichnung	SI-Einheit
$\alpha$		Drehung	rad
$\beta$		Winkel	rad
$\varepsilon$	Gl. (2.4)	Frequenzverhältnis	1
$\delta$		Dämpfungsmaß	1
$\eta$	$h/b$	bezogene Verschiebung	1
$\gamma$		Winkel	rad
$\lambda$		Eigenwert	
$\mu$	Gl. (2.4)	Massenparameter	1
$\varphi$		relative Feuchte, Phasenwinkel	
$\sigma$		Standardabweichung	1
$\tau$	$t \omega_h$	dimensionslose Zeit	1
$\varrho$	$m/V$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\Theta$		Massenträgheitsmoment	kg m <sup>2</sup>
$\omega$	$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz	1/s

## c) Dimensionslose Kennzahlen

Symbol	Definition	Bezeichnung	SI-Einheit
$Re$		<i>Reynolds-Zahl</i>	1
$St$		<i>Strouhahl-Zahl</i>	1

## d) Matrizen und Vektoren

Symbol	Definition	Bezeichnung	SI-Einheit
$\underline{A}$		Systemmatrix	1
$\underline{B}$		Systemmatrix	1
$\underline{D}$		Dämpfungsmatrix	1
$\underline{E}$		Parametermatrix	1
$\underline{F}$		Parametermatrix	1
$\underline{K}$		Steifigkeitsmatrix	1
$\underline{M}$		Massenmatrix	1
$\underline{N}$		Parametermatrix	1
$\underline{P}$	Gl. (2.5)	Systemparametermatrix	1
$\underline{T}$	Gl. (2.41)	Transformationsmatrix	1
$\underline{u}$		Vektor von Bewegungsgrößen	1
$\underline{W}$		Parametermatrix	1
$\underline{x}$		Vektor von Bewegungsgrößen	1
$\underline{Z}$		Signalmatrix	1
$\underline{\Phi}$	Gl. (2.57)	Transformationsmatrix	1
$\underline{\Psi}$	Gl. (2.58)	Transformationsmatrix	1



## e) Indizes tiefgestellt

$\alpha$	Drehung
$A$	Auftrieb
$c$	Strömungs-Oszillator-Modell
$eff$	effektive
$G$	Geometrie
$h$	Verschiebung
$h\alpha$	$h\alpha$ -System
$i$	Laufvariable
$j$	Laufvariable
$K$	auf körperfestes Koordinatensystem bezogen
$L$	Luftkräfte
$M$	Moment, Modell
$mA$	mit Anströmung
$oA$	ohne Anströmung
$R$	auf raumfestes Koordinatensystem bezogen
$S$	auf strömungsfestes Koordinatensystem bezogen
$SL$	System und Luftkräfte
$Th$	Theodorsen-Funktion
$U$	Geschwindigkeit
$W$	Widerstand
$zz$	$zz$ -System
$\infty$	ungestörte Strömung

## f) Indizes hochgestellt

$\Im$	Realteil
$\Re$	Imaginärteil
$T$	Transposition
$\cdot$	$d/dt$
$'$	$d/d\tau$

## g) Akzente

$\sim$	dimensionslose / bezogene Größe
$\hat{\phantom{x}}$	Amplitude, modale Größe



---

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Problemstellung

Die Schwingungsanalyse eines Bauwerkes gewinnt bei immer schlanker werdender Bauweise zunehmend an Bedeutung. Bei weitgespannten Brücken ist aufgrund ihrer dynamischen Eigenschaften diese Analyse ein wichtiger Bestandteil während der Planung. Zur Gewährleistung der Gebrauchs- und Standsicherheit müssen die Auswirkungen der Schwingungen untersucht und gegebenenfalls Veränderungen des Bauwerks vorgenommen werden. Betrachtet werden dabei alle schwingungsanfällige Bauteile wie die Pylone, die Seile und das Brückendeck, wobei auch die Wirkungen der Bauteile untereinander berücksichtigt werden.

Diese Schwingungen können durch Verkehrslasten, durch Erdbeben oder durch Windkräfte verursacht werden. Bei den winderregten Schwingungen können mindestens drei physikalische Anregungsmechanismen unterschieden werden: böenerregte, wirbelerregte und selbsterregte Schwingungen.

Desweiteren können in Einzelfällen Regen-Wind-induzierte Schwingungen und Schwingungen aufgrund von Interferenzwirkungen von Bauteilen auftreten.

Böenerregte Schwingungen entstehen dadurch, daß das Frequenzspektrum des Windes Frequenzen enthält, die mit Eigenfrequenzen der Struktur übereinstimmen. Dagegen treten wirbelerregte Schwingungen auch bei turbulenzfreier konstanter Anströmung auf, wobei die Schwingungsanregung der umströmten Struktur in der Frequenz der ablösenden Wirbel erfolgt. Stimmt diese Frequenz mit einer Eigenfrequenz der Struktur überein (Resonanzfall), können die Schwingungen sehr groß werden. Die Größe der Schwingungsamplituden hängt von den aerodynamischen Eigenschaften des Körpers und von den Dämpfungseigenschaften der Struktur ab.

Diese beiden Anregungsarten führen rechnerisch auf inhomogene Differentialgleichungen und stellen ein dynamisch-aeroelastisches Antwortproblem dar, wie zum Beispiel in *Ruscheweyh* [Rus82], *Simiu* und *Scanlan* [Sim96], *Socket* [Soc84] und *Petersen* [Pet96] nachgelesen werden kann.

Im allgemeinen beeinträchtigen wirbel- und böeninduzierte Schwingungen eher die Gebrauchsfähigkeit des Bauwerks oder die Dauerfestigkeit einzelner Teile als die Standsicherheit des gesamten Bauwerks.

Die Luftkräfte bei selbsterregten Schwingungen, die hier im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen, haben die Eigenschaft, daß sie von der Bewegung der Struktur abhängen. Die für die Schwingungen notwendige Energie wird der Strömungsenergie des umgebenden Fluids im Takte der elastischen Eigenschwingungen entnommen. Die mathematische Formulierung führt auf eine homogene Differentialgleichung und bei linearer Betrachtung auf ein Stabilitätsproblem. Das Ergebnis der Lösung des Stabilitätsproblems ist die kritische Windgeschwindigkeit, ab der die Schwingungen anfachen.

Selbsterregte Schwingungen können in einer Bewegungsform, zum Beispiel an Pylonen als Biegegalloping, in Erscheinung treten oder in zwei miteinander gekoppelten Bewegungsformen als „Flattern“ des Brückendecks. Für die Analyse von selbsterregten Schwingungen ist in jedem Fall die Kenntnis der Kräfte notwendig, die durch die Anströmung am umströmten Körper entstehen. Nur für einige Sonderfälle sind diese Kräfte analytisch bestimmbar, siehe Abschnitt 2.1.2.

In den übrigen Fällen kann zur Analyse der Schwingungen ein halbempirisches Verfahren angewendet werden. Basierend auf ein Rechenmodell werden in Windkanalversuchen Parameter zur Beschreibung der Luftkräfte identifiziert. Dabei ist die Frage zu beantworten, welche mathematische Formulierung die wirklich entstehenden Luftkräfte am besten beschreibt. Dies bedeutet, daß eine geeignete Struktur des Rechenmodells gefunden werden muß. Insbesondere kann es notwendig sein, nichtlineare Terme in die Ansätze einzuführen, um das aerodynamische Verhalten besser beschreiben zu können.

In dieser Arbeit werden verschiedene Ansätze für die Beschreibung von instationären bewegungsinduzierten Luftkräften an beliebigen Querschnitten vorgestellt und miteinander verglichen. Nichtlinearitäten der Luftkräfte werden durch gezieltes Einführen nichtlinearer Terme in den Ansätzen erfaßt. Es werden sowohl im Rechenmodell als auch im Experiment gekoppelte Biege- und Torsionsschwingungen betrachtet. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe von Experimenten und einer eingehenden Bearbeitung der Meßwerte auch nichtlineare instationäre Luftkräfte mit einem Zeitbereichsverfahren identifiziert werden können.

Der Vergleich der Luftkraftansätze und die Beurteilung der Güte erfolgt anschließend im Zeit- und Frequenzbereich.

## 1.2 Einordnung in die Forschung

### 1.2.1 Entwicklung der Analyseverfahren nach linearer Theorie

Das Phänomen von windinduzierten, selbsterregten Biege- und Torsionsschwingungen linienförmiger Strukturen ist schon einige Zeit bekannt. Im Zusammenhang mit der Entwicklung von Tragflügeln ist diese Schwingungserscheinung eingehend analytisch und experimentell untersucht worden, siehe zum Beispiel *Küssner* [Kü40a], *Theodorsen* [The35] und *Försching* [Fö74]. Dabei können, da ein Tragflügel stromlinienförmig ist, die Luftkräfte mit Hilfe der Potentialgleichung - jedoch nicht ohne einigen Aufwand und einschränkenden Annahmen - exakt ermittelt werden, siehe auch Abschnitt 2.1.2. Mit diesen komplexen, linearen Luftkräften kann die Bewegung eines harmonisch schwingenden Tragflügels beschrieben werden, und die kritische Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden, ab der diese Schwingungen anfachen. Die Lösung des komplexen Eigenwertproblems ist keine leichte Aufgabe, da die Parameter von dem Eigenwert abhängen. Sie hat einige Wissenschaftler - jeweils unter anderen Gesichtspunkten - beschäftigt, wie zum Beispiel *Sherman* [She45], *Landahl* [Lan64], *Natke* [Nat75] und *Starossek* [Sta92].

Eine Übertragung der Tragflügeltheorie auf die Schwingungen des Brückendecks wurde zuerst von *Bleich* [Ble49] vorgenommen. Er fügte in die Gleichungen für die Luftkräfte zusätzliche Terme ein, deren Parameter aus Windkanalversuchen gewonnen wurden und die Diskrepanz zwischen einem stromlinienförmigen Tragflügel und einem Brückenprofil verringern sollten.

Die rechnerische Ermittlung der kritischen Windgeschwindigkeit für selbsterregte Schwingungen bei Brückenquerschnitten wurde in der Folgezeit mit den Luftkräften nach der Potentialtheorie durchgeführt und jedesmal kritisch kommentiert, da den Anwendern bewußt war, daß die Übertragung auf Brückenquerschnitte umso zweifelhafter ist, je mehr der Querschnitt von dem eines stromlinienförmigen Profils abweicht, siehe zum Beispiel *Selberg* [Sel61], *Frandsen* [Fra65], *Sakata* [Sak71], *Thiele* [Thi76] und *Koger* [Kog83].

Wenn Windkanalexperimente vorlagen, wurden diese mit den theoretischen Ergebnissen verglichen. In systematischer Weise wurde dieser Vergleich von *Klöppel* und *Thiele* [Klo67] nach einer von *Klöppel* und *Weber* [Klo63] aufgestellten Arbeitshypothese vorgenommen. Es wurde für jedes Modell sowohl die kritische Windgeschwindigkeit im Experiment beobachtet, als auch mit Hilfe der Luftkräfte nach der Potentialtheorie berechnet. Der Quotient dieser Werte wird als Formfaktor bezeichnet, der nur von dem Querschnitt und dem Verhältnis der Bewegungsfrequenzen abhängen soll. Ziel war es, einen Katalog zu erstellen, der dem Brückenbauer in der Vorplanung eine Einschätzung der Schwingungsgefährdung ermöglicht.

Zu dieser Zeit hat sich die Technik der Windkanalversuche stetig weiterentwickelt.

Grundsätzlich kann bei der experimentellen Analyse von winderregten Schwingungen des Brückendecks zwischen den „Vollmodellversuchen“ und den Versuchen mit „Teilmodellen“ unterschieden werden.

In den Vollmodellversuchen wird die gesamte Brücke geometrisch und dynamisch modelliert, indem die Steifigkeits-, Massen- und Dämpfungseigenschaften mit Federelementen und einzelnen Massen nachgebildet werden. Zusätzlich können wesentliche Umgebungsmerkmale, die Grenzschicht und die Turbulenz des natürlichen Windes nachgeahmt werden. Diese Versuche sind sowohl sehr zeitaufwendig als auch kostenintensiv, und die Untersuchung von Querschnittsvarianten ist ebenso aufwendig. Bei extremen Umgebungen, wenn nicht zu vernachlässigende Einflüsse der Umgebung - zum Beispiel ein benachbarter Berg oder Tallage - zu erwarten sind, oder bei der Planung von Brücken mit bisher nicht gebauten Spannweiten, werden solche Windkanalexperimente dennoch durchgeführt, einige Beispiele sind von *Larsen* [Lar92] veröffentlicht.

Experimente mit Teilmodellen sind dagegen deutlich wirtschaftlicher und ermöglichen einfacher die Untersuchung von unterschiedlichen Varianten bezüglich der Querschnittsform und der dynamischen Eigenschaften.

Ein Teilmodell besteht aus einem möglichst starr ausgeführten Abschnitt des zu untersuchenden Brückendecks im Modellmaßstab mit konstantem Querschnitt. Um eine zweidimensionale Strömung auch an den Rändern zu gewährleisten, werden entweder an das Modell Endscheiben oder am Windkanal Strömungsleitwände angebracht. Die Art der Lagerung des Modells hängt von der Versuchsdurchführung ab.

In den ersten Versuchen mit Teilmodellen wurden die dynamischen Eigenschaften durch die Lagerung des Modells an Federn modelliert und das Verhalten des Modells bei schrittweiser Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit beobachtet. In mehreren Versuchsreihen wurde die Dämpfung variiert und deren Einfluß auf die Schwingungen studiert, siehe *Barbre* [Bar58], *Klöppel* [Klo63], [Klo67], [Klo75], *Koger* [Kog83], *Wardlaw* [War83], *Bienkiewicz* [Bie87].

Neben diesen nichtparametrischen Windkanalversuchen sind Teilmodellversuche entwickelt worden, die eine Identifizierung von Luftkraftparametern eines Rechenmodells der Luft-

kräfte zum Ziel haben. Dieses Rechenmodell für die Luftkräfte wird meistens in Anlehnung an die Luftkräfte nach der Potentialtheorie für die ebene Platte formuliert, siehe auch Abschnitt 2.1.3. Eine Beschreibung der existierenden Meßmethoden und ein Vergleich ist von *Starossek* [Sta92] durchgeführt worden. Zwei dieser Techniken und die hier verwendete werden kurz dargestellt.

Eine Methode ist das direkte Messen von Luftkräften. Das umströmte Modell wird harmonisch bewegt, so daß es Vertikalschwingungen oder Drehschwingungen durchführt. Die Reaktionskräfte (Auftrieb und Moment) werden anhand von kalibrierten Meßelementen gemessen, wobei die Trägheitskräfte des Modells entweder durch entsprechende Ausgleichsmassen oder mit Hilfe von Beschleunigungsmessungen kompensiert werden. Die Anregung erfolgt schrittweise mit verschiedenen Frequenzen. Anwender dieser Methode sind zum Beispiel *Ukeguchi* [Uke66], *Sakata* [Sak71], *Oltmann* [Olt81] und *Falco* [Fal92].

Ein häufig angewendetes und versuchstechnisch weniger aufwendiges Verfahren ist die Methode der freien Schwingungen. Das Modell wird an Federn, mit denen in Verbindung mit der Modellmasse die Eigenfrequenzen des Systems festgelegt werden, aufgehängt, gezielt ausgelenkt und losgelassen.

Für die Versuchsdurchführung und -auswertung von Ausschwingversuchen gibt es verschiedene Varianten. Eine wurde von *Scanlan* in [Sca69] und [Sca71] vorgestellt, wobei vor allem die Notation der Luftkraftformulierung im Schrifttum eine weite Verbreitung fand. Vom Aufbau ist seine Formulierung der hier für den linearen Ansatz aufgestellten ähnlich, siehe Abschnitt 2.1.3. In getrennten Versuchen wird die Vertikal- und Drehbewegung des Modells durch eine entsprechende Anfangsauslenkung angeregt. Durch Ermittlung der Bewegungsfrequenzen und der Abklingkoeffizienten der Bewegung werden zunächst die Hauptdiagonalelemente der Luftkraftparameter bestimmt. Die Nebendiagonalelemente werden aus zusätzlichen Versuchen mit gekoppelten Schwingungsbewegungen des umströmten Modells ermittelt, wobei die bisher identifizierten Hauptdiagonalelemente benötigt werden.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen und ausgewerteten Windkanalversuche basieren ebenfalls auf Ausschwingversuchen. Die Versuchsdurchführung und Verarbeitung der Meßwerte unterscheidet sich jedoch deutlich von der Versuchstechnik nach *Scanlan*. Die Bewegung des Modells erfolgt in den beiden Freiheitsgraden - Drehung und Vertikalbewegung - immer gleichzeitig. Während des Versuchs werden die Beschleunigungen an den Freiheitsgraden gemessen. Die Parameter werden anschließend nach einer eingehenden Bearbeitung im Zeitbereich identifiziert. In Kapitel 3 ist eine detaillierte Beschreibung des Vorganges enthalten. Das angewandte Verfahren stellt bezüglich des Auswertalgorithmus eine Weiterentwicklung der von *Lwambuka* [Lwa88], *Tawakoli* [Taw96] und *Waitz* [Wai97] mitgeteilten Identifikationsverfahren dar. Der wesentliche Unterschied zu diesen Arbeiten liegt in den verwendeten Ansätze für die instationären Luftkräfte, die in dieser nichtlinearen Formulierung zum ersten Mal hier aufgestellt und geprüft werden.

Andere Zeitbereichsverfahren zur Parameteridentifikation von Luftkräften werden zum Beispiel von *Xie Jiming* [Xie88] und *Sarkar* [Sar92] vorgestellt.

## 1.2.2 Nichtlineare aeroelastische Effekte

Nach der linearen Theorie können keine stationären Schwingungsamplituden ermittelt werden, sondern ausschließlich ein Stabilitätspunkt. Bei stromlinienförmigen Körpern sind für kleine Anstellwinkel auch keine stationären Amplituden zu erwarten, in diesem Falle ist die Anwendung einer linearen Theorie die geeignete Wahl.

Angeströmte Widerstandskörper besitzen grundsätzlich andere aerodynamische Eigenschaften, die sich unter anderem in einem nichtlinearen Verlauf der „stationären“ Luftkräfte in Abhängigkeit des Anströmwinkels widerspiegeln, siehe Kapitel 3.

Unter bestimmten Bedingungen können solche umströmten Strukturen zu windinduzierten selbsterregten reinen Biegeschwingungen angeregt werden. Deren Analyse erfolgt bei kleiner reduzierter Frequenz mit quasistationären Ansätzen, siehe Abschnitt 2.1.2. Dabei ist die Berücksichtigung nichtlinearer Effekte verhältnismäßig einfach, da nur eine Differentialgleichung mit konstanten Parametern gelöst werden muß, was zum Beispiel *Parkinson* [Par64], *Försching* [Fö71] und [Fö73] beschrieben haben.

Eine der ersten Arbeiten, in denen nichtlineare aerodynamisch erregte Biege- und Torsionsschwingungen behandelt werden, stammt von *Böhm* [Bö69]. Er verwendet aus statischen Windkanalversuchen ermittelte Luftkraftkoeffizienten zur Formulierung eines Luftkraftansatzes. Die Instationarität wird rechnerisch durch Einführung einer Laufzeit erfaßt, womit berücksichtigt werden soll, daß eine Störung der Strömung an der Kante des Profils sich während der Körperbewegung innerhalb einer bestimmten Zeit über die Breite des Querschnittes ausdehnt. In den genannten Experimenten wurden gekrümmte Modelle getestet, um instationäre Vorgänge zu simulieren, was auf einen Vorschlag von *Steinmann* [Ste54] zurückgeht. Dieses Verfahren ist nicht verifiziert und hat sich nicht durchgesetzt.

*Hortmanns* [Hor97] hat nichtlineare aeroelastische Effekte nicht nur für reine Biegeschwingungen sondern auch für reine Torsionsschwingungen experimentell durch direktes Messen der Luftkräfte untersucht. Die rechnerische Berücksichtigung der Nichtlinearitäten erfolgt durch Anpassung von identifizierten Luftkraftdämpfungsparametern durch nichtlineare Funktionen. Gekoppelte Schwingungen werden jedoch nicht betrachtet. Ein Grund liegt in der Versuchsmethode. Es ist deutlich schwieriger mit der Methode der geführten Bewegung gleichzeitig Vertikal- und Drehschwingungen zu erzeugen. Außerdem ist bei den von *Hortmanns* [Hor97] verwendeten Rechenansätzen die Größe der Amplituden von Bedeutung, was eine amplitudenabhängige Auswertung der Koppelterme erschwert.

*Wienand* [Wie94] hat mit Hilfe von Ausschwingversuchen und nachfolgender Parameteridentifikation im Zeitbereich nichtlineare Schwingungen analysiert. Es werden bei ihm zwei getrennte Versuchsreihen des angeströmten Modells durchgeführt, in denen einmal nur die Vertikalbewegung und einmal nur die Drehbewegung angeregt wird. Dabei wird jeweils die Höhe der Anfangsauslenkung variiert. Die Identifikation wird allerdings immer mit einem linearen Ansatz für die Luftkräfte vorgenommen. Die Parameter, die sich aus den unterschiedlichen Anfangsauslenkungen ergeben, werden anschließend mit nichtlinearen Funktionen angepaßt.

In der vorliegenden Arbeit werden erstmals nichtlineare Ansätze für die instationären Luftkräfte in Anlehnung an die quasistationären Luftkräfte aufgestellt. Die Parameter sind jedoch nicht wie in der quasistationären Theorie konstant, sondern hängen von den Bewegungsgrößen ab, siehe Abschnitt 2.1.3. Die Identifikation der Parameter erfolgt an-

hand von nichtlinearen Identifikationsgleichungen im Zeitbereich. Experimentell werden in Ausschwingversuchen mit unterschiedlichen Modellquerschnitten die Luftkraftinformationen gewonnen, wobei immer gekoppelte Schwingungen angeregt und gemessen werden. Die Höhe der Schwingungsamplituden geht nicht in die Auswertung ein, sie ist implizit in den physikalischen Rechenmodellen enthalten.

### 1.3 Vorgehensweise

Die Analyse von selbsterregten Schwingungen beginnt in Abschnitt 2.1.1 mit der Aufstellung der Bewegungsgleichung für ein System mit den Bewegungsfreiheitsgraden Schlag und Drehung, welche den Modellbewegungen im Experiment entsprechen.

Die wenigen Sonderfälle, in denen die Luftkräfte unter Voraussetzung einiger einschränkenden Annahmen analytisch ermittelt werden können, bieten die Grundlage für die Aufstellung von linearen und nichtlinearen Luftkraftansätzen, welche in Abschnitt 2.1.3 vorgestellt werden. Darunter befindet sich auch ein Strömungs-Oszillator-Modell, das eine alternative Beschreibung der Luftkräfte darstellt.

Die Lösung der Bewegungsgleichung mit den Luftkraftansätzen wird für die lineare und nichtlineare Differentialgleichung in Abschnitt 2.2 beschrieben. Dabei wird speziell auf die Behandlung der Luftkräfte, die sich nach der Potentialtheorie für eine ebene Platte ergeben, siehe Abschnitt 2.1.2, eingegangen. Die Luftkraftparameter dieser Luftkräfte sind im allgemeinen komplex. Damit sie mit den experimentell gefundenen Parametern verglichen werden können, werden sie in reelle Parameter äquivalent umgeformt, wobei ein Verfahren in abgewandelter Form nach *Waitz* [Wai97] zum Einsatz kommt.

In Abschnitt 2.3 wird im einzelnen von der Aufbereitung der experimentellen Daten bis zur Aufstellung der Identifikationsgleichungen für die Luftkraftansätze der Vorgang der Identifikation der Luftkraftparameter erläutert. Dabei wird besonderer Wert auf die Überprüfung der Auswertelgorithmen gelegt. Es wird sowohl das Verfahren zur Bearbeitung der Meßdaten als auch die Parameteridentifikation mit simulierten Daten getestet. Es wird gezeigt, daß die verwendeten Verfahren geeignet sind.

Der zweite Schwerpunkt liegt in der Erlangung von experimentellen Daten aus Windkanalversuchen als Eingangsgrößen für die Identifikation. In Kapitel 3 werden die durchgeführten Versuche und die untersuchten Querschnitte beschrieben.

Die Ergebnisse der Auswertung werden in den Abschnitten 3.4 und 3.5 vorgestellt. Es wird gezeigt, daß die Luftkräfte Nichtlinearitäten enthalten und daß diese mit geeigneten Ansätzen identifiziert werden können. Im Vordergrund steht der Vergleich der verwendeten Luftkraftansätze untereinander und mit denjenigen Werten, die sich nach der Potentialtheorie und nach einer quasistationären Näherung ergeben.

Die Verifikation des am besten geeigneten Rechenmodells wird exemplarisch durch einen Vergleich von Modellvorhersage und Messung im Zeit- und Frequenzbereich vorgenommen.

Die Arbeit schließt nach einer Anwendungsrechnung (Kapitel 4) mit Schlußfolgerungen (Kapitel 5) und der Zusammenfassung (Kapitel 6).