
Inhaltsverzeichnis

Teil I Allgemeines

1	Einführung	3
2	Allgemeine Gleichungen der Aeroelastik	5
2.1	Allgemeine Gleichungen der statischen Aeroelastik	5
2.2	Allgemeine Gleichungen der dynamischen Aeroelastik	6

Teil II Statische Aeroelastik

3	Operatoren	9
3.1	Statische Strukturoperatoren	9
3.1.1	Starrkörpermodelle	9
3.1.2	Eindimensionale Modelle	10
3.2	Statische aerodynamische Operatoren	11
3.2.1	Tragflächenstreifen in ebener Strömung	11
3.2.2	Tragflächen in dreidimensionaler Strömung – die Streifenannahme	12
3.2.3	Tragflächen in dreidimensionaler Strömung – genauere Theorien	12
4	Statische Aeroelastik des ungepfeilten Flügels	15
4.1	Aeroelastische Divergenz und statische aeroelastische Antwort des elastisch drehbaren, starren Flügels	15
4.1.1	Berechnung des Divergenzstaudrucks	15
4.1.2	Berechnung der statischen Antwort	16
4.2	Aeroelastische Divergenz bei Verwendung eindimensionaler Strukturoperatoren	18
4.2.1	Kontinuierliches Eigenwertproblem	18
4.2.2	Diskretisierung mittels generalisierter Verschiebungskordinaten	18

4.2.3	Halbstarres Modell.	20
4.2.4	Divergenz des homogenen, unverjüngten Rechteckflügels	22
4.3	Statische aeroelastische Antwort	23
4.3.1	Ergänzende Betrachtung zum kontinuierlichen Modell des homogenen, unverjüngten Rechteckflügels	23
4.3.2	Aufstellung der vollständigen aeroelastischen Gleichung.	25
4.3.3	Berechnung der Systemantwort.	26
4.3.4	Vereinfachung des Problems im Falle spannweitig konstanter Eigenschaften	26
4.4	Lösungsbeispiele	27
4.4.1	Beispiel 1 – Gleichmäßig angeströmter Flügel mit unsymmetrischem Profil und ohne konstruktive Verwindung	27
4.4.2	Beispiel 2 – Belastung des Tragflügels durch ein konzentriertes Moment am freien Ende.	31
4.4.3	Beispiel 3 – Symmetrischer Flügel mit linearer Verwindung und verschwindendem Anstellwinkel an der Wurzel	31
4.4.4	Verwendung der Divergenzmoden zur Zerlegung der statischen aeroelastischen Antwort	32
4.5	Aeroelastischer Einfluss auf die Ruderwirksamkeit und Ruderumkehr	34
4.6	Divergenzanalyse im nichtlinearen Fall.	37
4.6.1	Nichtlineare Divergenzanalyse am Starrkörpermodell	38
4.6.2	Nichtlineare Divergenzanalyse am Balkenmodell für nichtlineare Torsion	40
5	Statische Aeroelastik des gepfeilten Flügels	43
5.1	Aeroelastische Biegetorsionskopplung durch Flügelpfeilung	43
5.2	Gleichung für die Stabilitätsanalyse des gepfeilten Flügels konstanter Querschnittseigenschaften	44
5.3	Lösung im Fall unendlich hohen Torsionsdivergenzstaudrucks	46
5.4	Lösung im allgemeinen Fall.	47
5.5	Auswirkung der Pfeilung auf die Querruderwirksamkeit	49

Teil III Dynamische Aeroelastik

6	Kinematik des Biegetorsionsflatterns	53
7	Stationärer aerodynamischer Operator	59
7.1	Induzierter Anstellwinkel, Schlagkomponente	59
7.2	Induzierter Anstellwinkel, Drehkomponente	60

7.3	Quasistationärer Ansatz mit stationärem und induziertem Anstellwinkel	62
7.4	Vollständig nichtstationärer Ansatz	62
7.5	Berechnung der instationären aerodynamischen Kräfte für Balkenmodelle auf Basis der Streifentheorie.	65
8	Grundlagen der Schwingungsdynamik.	67
8.1	Einleitung.	67
8.2	D'Alembert'sches Prinzip	67
8.3	Ungedämpftes System mit einem Freiheitsgrad	68
8.3.1	Strukturdynamische Gleichungen	68
8.3.2	Energiebetrachtung	68
8.3.3	Freie Antwort	69
8.3.4	Antwort auf eine harmonische Anregung	70
8.3.5	Erzwungene Antwort	71
8.4	Gedämpftes System mit einem Freiheitsgrad	72
8.4.1	Energiebetrachtung	72
8.4.2	Strukturdynamische Gleichungen bei viskoser Dämpfung	72
8.4.3	Freie Antwort bei viskoser Dämpfung.	73
8.4.4	Erzwungene Antwort bei viskoser Dämpfung.	75
8.4.5	Strukturdynamische Gleichungen bei hysteretischer Dämpfung	76
8.4.6	Erzwungene Antwort bei hysteretischer Dämpfung	78
8.4.7	Freie Antwort bei hysteretischer Dämpfung	78
9	Strukturdynamik und Modalanalyse	81
9.1	Berücksichtigung der Trägheitskräfte bei mehreren Freiheitsgraden.	81
9.2	Modale Kennwerte des ungedämpften Modells.	82
9.3	Die modale Transformation	84
9.4	Erzwungene Schwingungen des ungedämpften Modells bei monofrequenter Anregung	85
9.5	Gedämpftes Modell	85
9.6	Modale Kennwerte des gedämpften Modells.	86
9.6.1	Proportionale Dämpfung	86
9.6.2	Nichtproportionale, strukturelle Dämpfung.	89
9.7	Das modale Modell	90
10	Schwingungsanalyse im Frequenzbereich	93
10.1	Fourierreihe	93
10.2	Fouriertransformation	95
10.3	Frequenzanalyse eines ungedämpften Einmassenschwingers	96

10.4	Frequenzanalyse eines ungedämpften Struktursystems mit mehreren Freiheitsgraden.	97
10.5	Frequenzanalyse eines viskos gedämpften Einmassenschwingers	98
10.6	Frequenzanalyse eines strukturell gedämpften Einmassenschwingers	98
10.7	Die Diskrete Fouriertransformation.	99
11	Experimentelle Modalanalyse	103
11.1	Unvollständige modale Modelle	103
11.2	Phasentrennungs- und Phasenresonanzverfahren	104
11.2.1	Das Phasenresonanzkriterium	105
11.2.2	Messung der generalisierten Massen im Phaseresonanzverfahren.	107
12	Flattern des Starrkörperflügelmodells	109
12.1	Dynamische Gleichungen des starren, elastisch gelagerten Flügelmodells.	109
12.2	Berechnung der Flattergrenze für das starre Flügelmodell bei stationärem aerodynamischem Operator	110
12.3	Berechnung der Flattergrenze für das starre Flügelmodell bei quasistationärem aerodynamischem Operator.	112
13	Flatterrechnung im praktischen Fall	115
13.1	Modale Formulierung der Flattergleichungen für Auftriebsflächen großer Streckung	115
13.2	Lösung der Flattergleichungen bei quasi-stationärer Aerodynamik: die <i>p</i> -Methode	117
13.3	Lösung der Flattergleichungen bei vollständig instationärer Aerodynamik: die <i>k</i> - und die <i>p-k</i> -Methode	118
Anhänge		121