



# Das Flatterverhalten beim Fliegen in großen Höhen

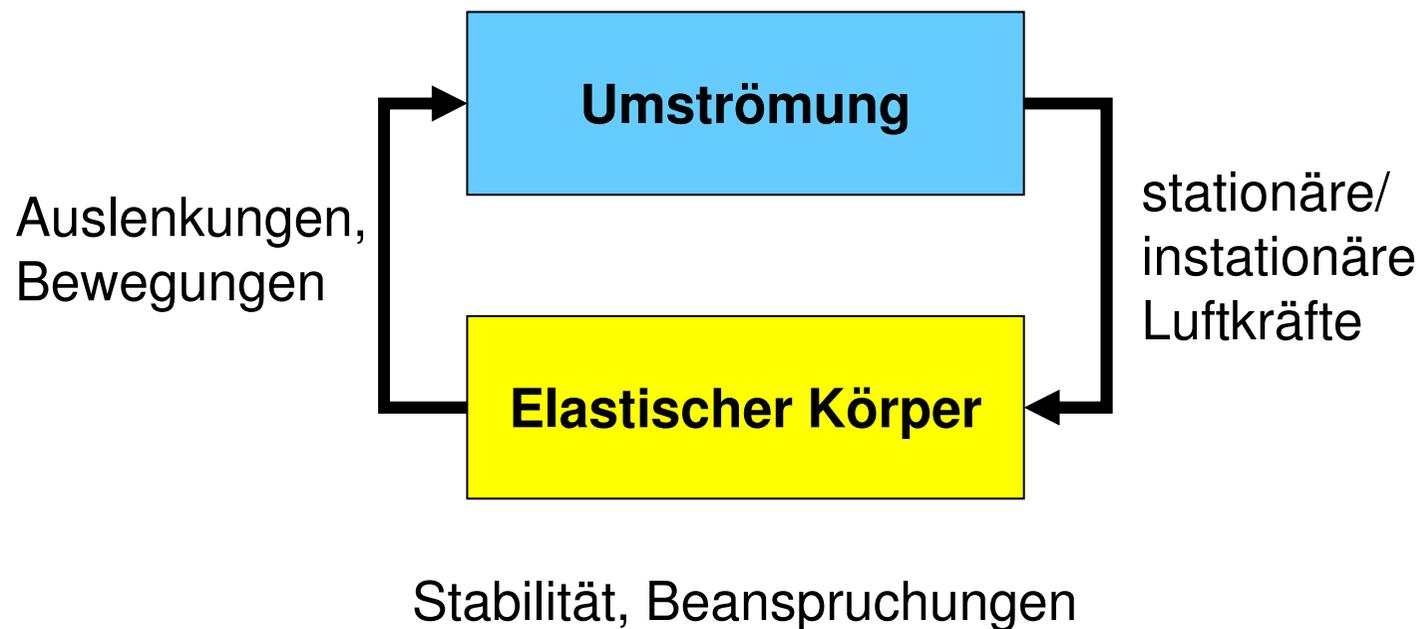
Jan Schwochow  
DLR Institut für Aeroelastik  
Göttingen, den 06.03.2010

# Überblick

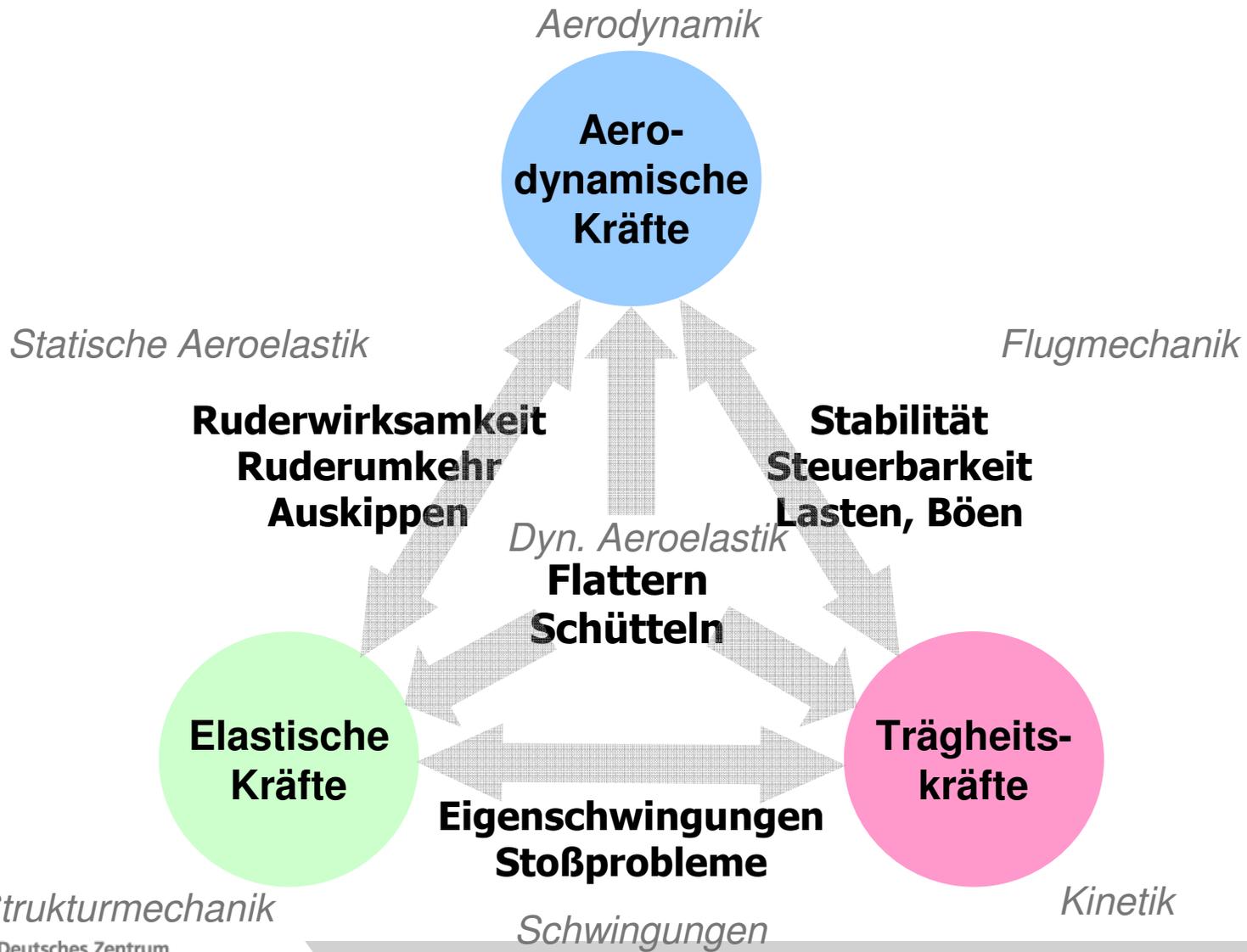
1. Definition der Aeroelastik
2. Was ist Flattern?
3. Nachweis der Flattersicherheit
  - Standschwingungsversuch
  - Flutterrechnung
4. Einfluss der Flughöhe
5. Einfluss von Rudermassen und Restmomente
6. Was ist zu beachten?
7. Zusammenfassung und Empfehlungen

# Definition der Aeroelastik

- Die Aeroelastik untersucht die Wechselwirkung zwischen einem elastischen Körper und seiner Umströmung  
Flugzustand, Steuerausschläge  
Geometrie



# Das aeroelastische Kräfte Dreieck



# Flatterschwingungen DG-300 / 17 m Spannweite

- Standschwingungsversuch und Flatterrechnung (DLR Institut für Aeroelastik, Göttingen)
- Flugversuche (DLR Flugbereitschaft Braunschweig)
  - Überhöhte Zuladung von Wasserballast (>130 kg)
  - Geschwindigkeitsbereich 140 bis 150 km/h
  - Frequenz ca. 5 Hz
  - Amplitudenbegrenzte Schwingung
  - Kopplung der ersten antisymmetrischen Flügelbiegung mit Querruderbewegung

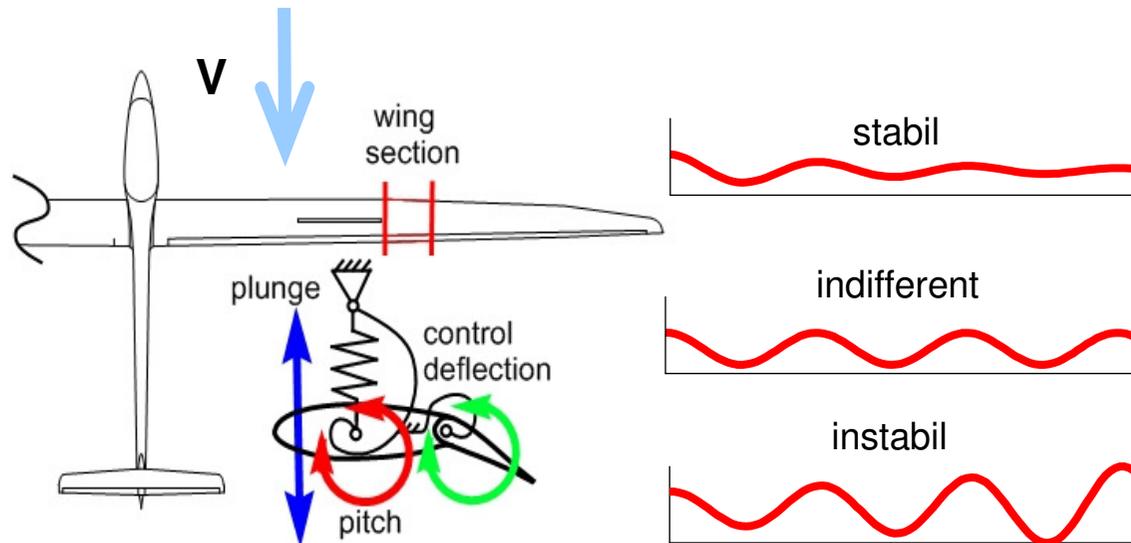


# Zielsetzungen der Flutteranalyse

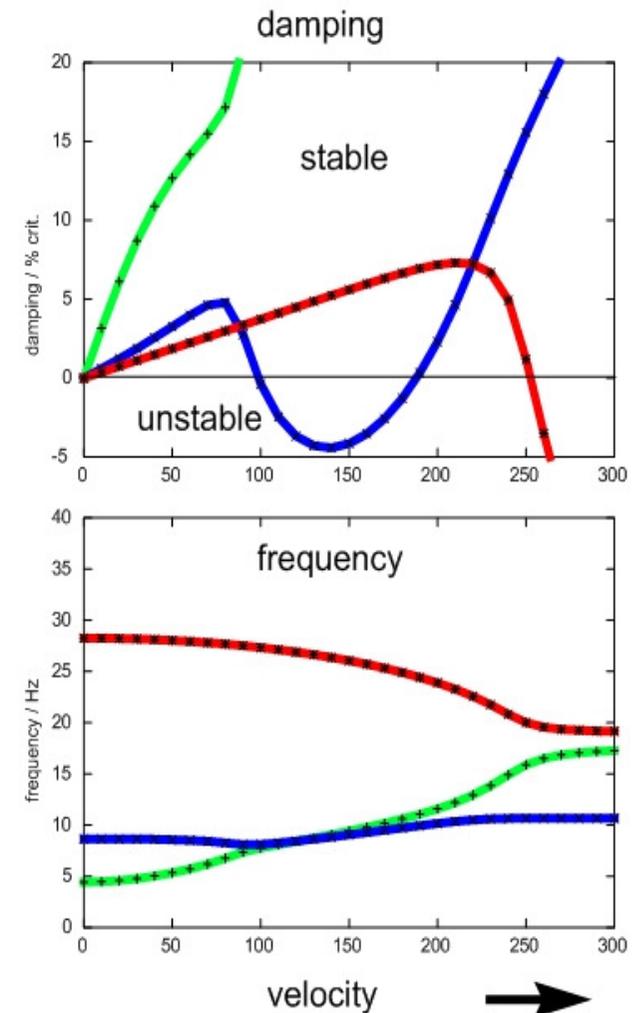
- Nachweis der aeroelastischen Stabilität im zugelassenen Flugbereich
  1. Suche nach der niedrigsten Flattergeschwindigkeit für die Nominalkonfiguration des Flugzeugs bei gegebenen Flugzustandsparametern,
  2. Änderung der Flattergeschwindigkeit, wenn ein Flugzustandsparameter oder Systemparameter variiert wird,
  3. Gezielte Suche nach einem Satz von Parametern, um eine vorgegebene Flattergeschwindigkeit nicht zu unterschreiten.
- Vorschläge für Modifikationen, um die Stabilität des Flugzeugs im Betriebsbereich zu gewährleisten

- **Wellenflüge können bei Flughöhen und Geschwindigkeiten am Rand des als sicher nachgewiesenen Flugbereichs stattfinden.**
- **Der Pilot muss mit den Grenzen seines Flugzeugs vertraut sein!**

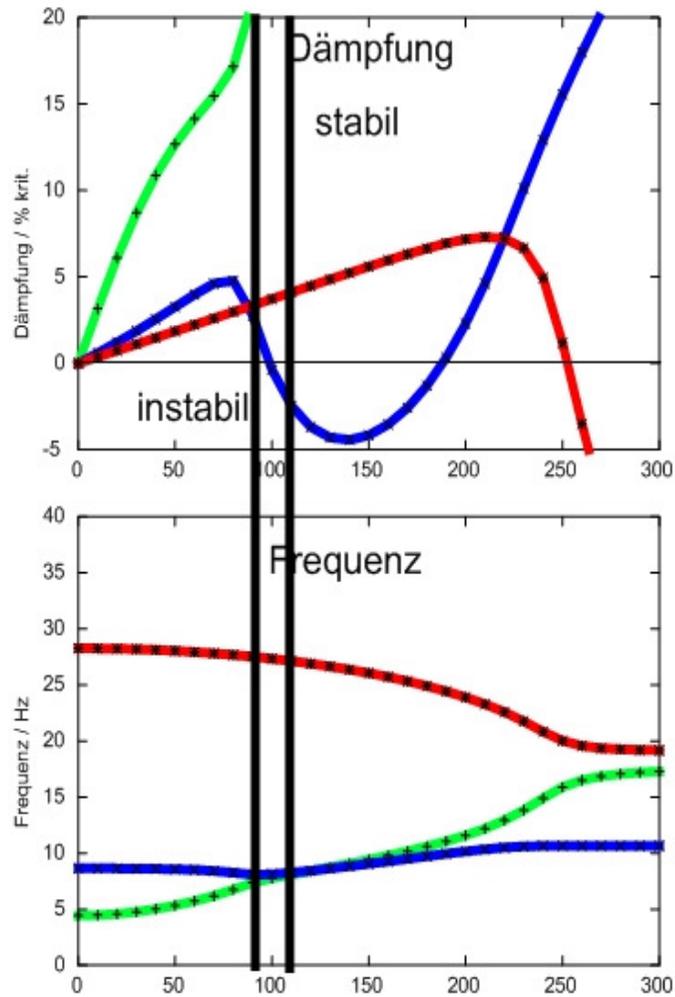
# Flattern eines Tragflügelsegments



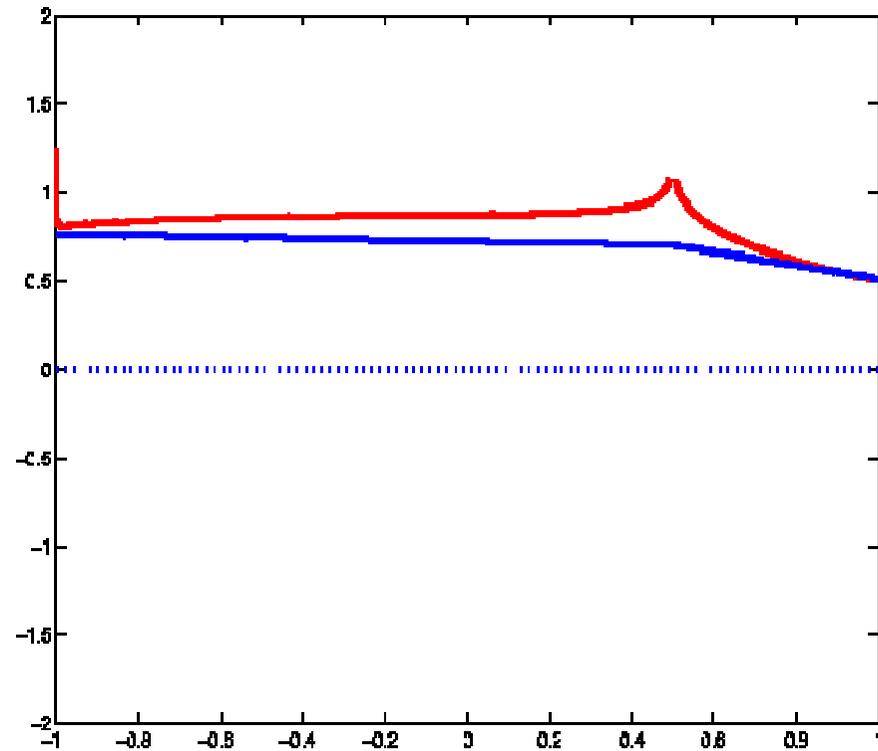
- Änderung der Frequenz mit steigendem Staudruck
  - Schlagbewegung konstant
  - Anstellwinkeldrehung abfallend
  - Ruderdrehung ansteigend
- Frequenznachbarschaften können auftreten
- Anfachende Schwingung bei einer bestimmten *kritischen Geschwindigkeit*



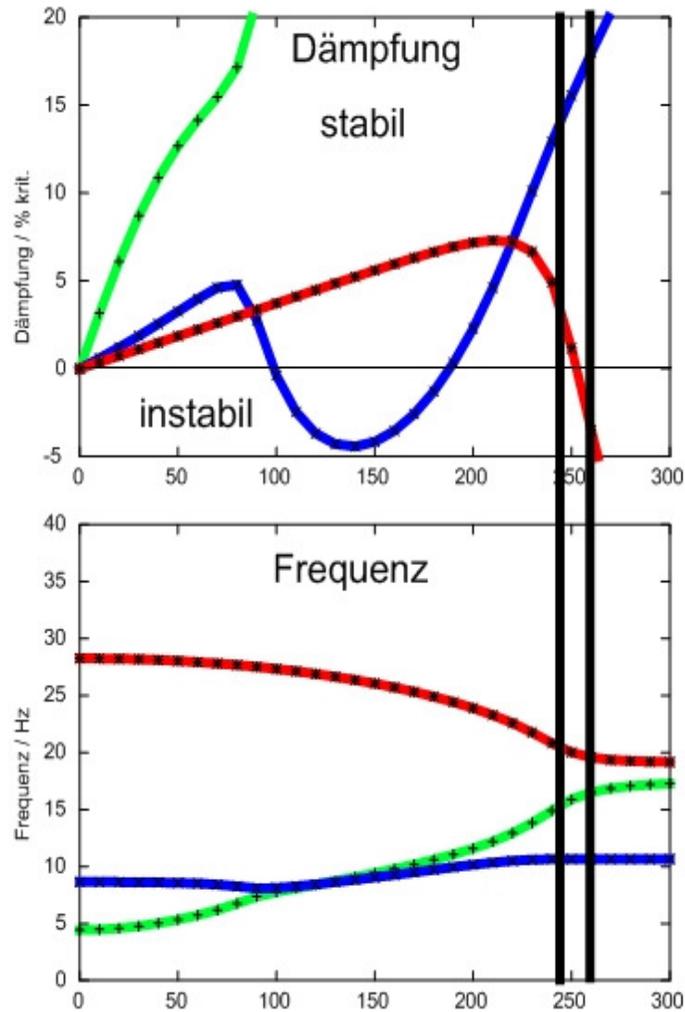
# 1. Flutterbewegung



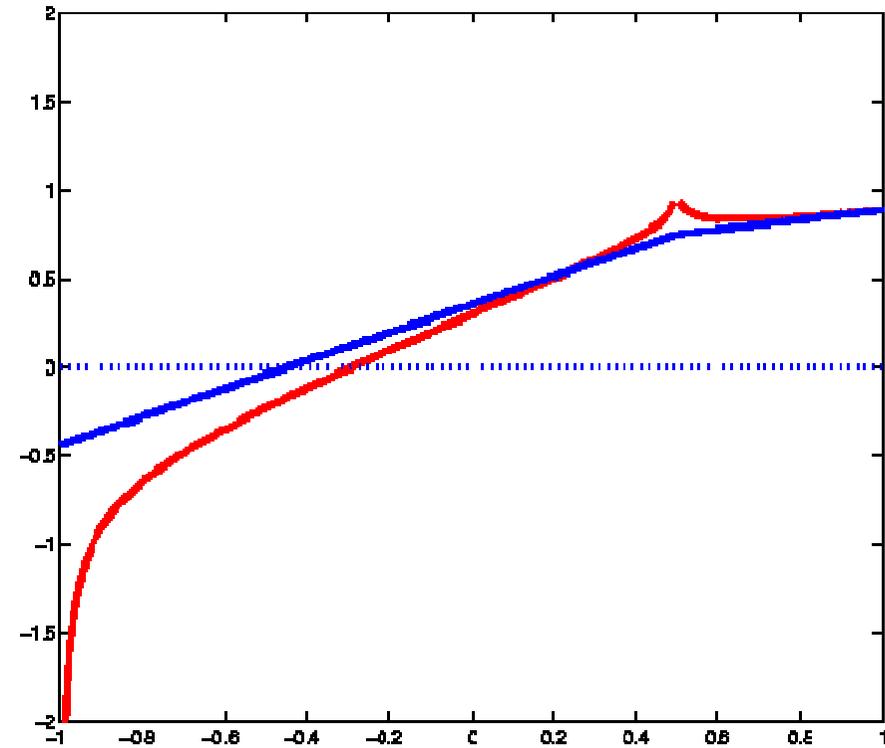
$$\omega^* = 0.52$$



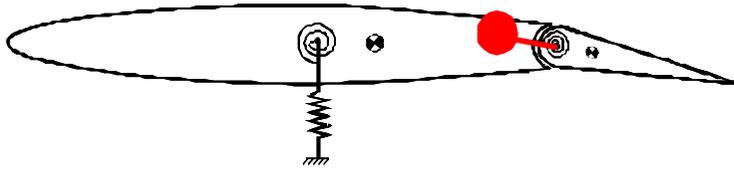
## 2. Flutterbewegung



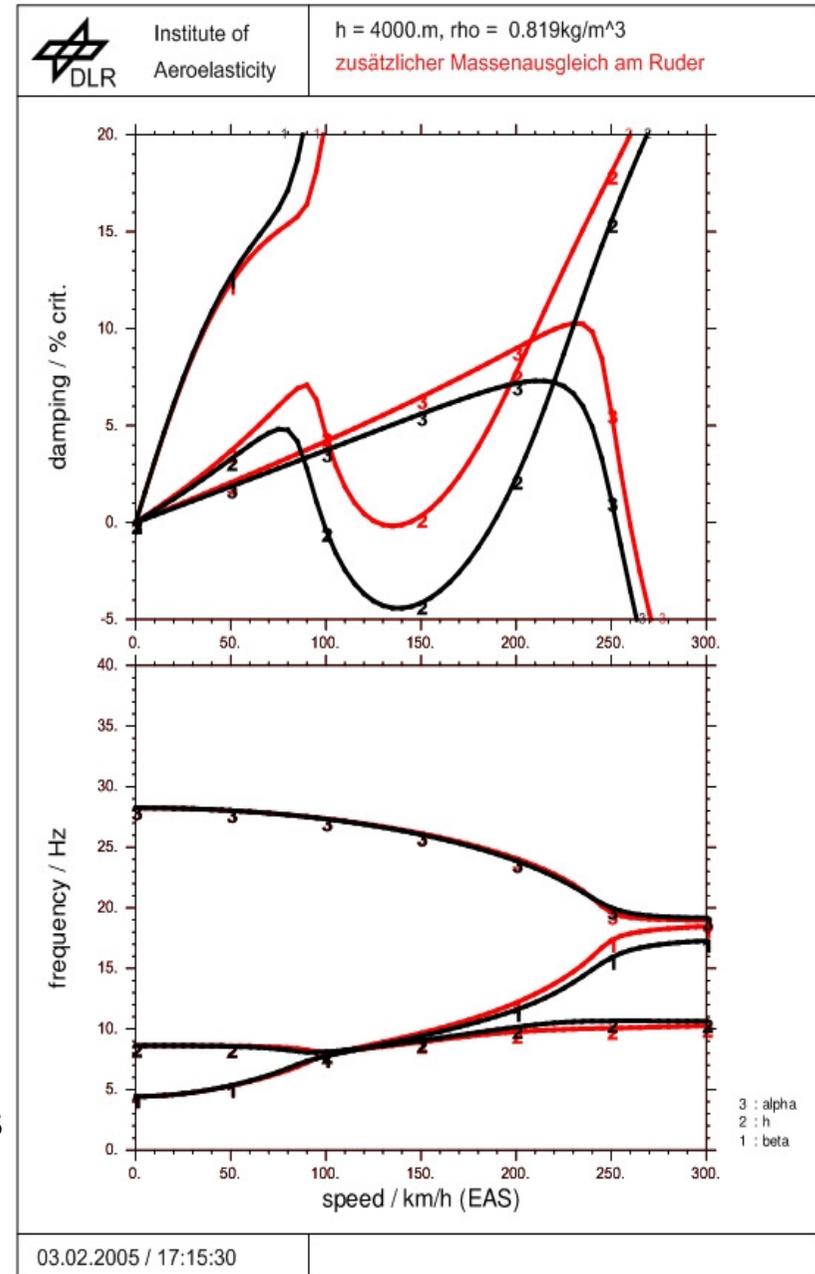
$$\omega^* = 0.47$$



# Einfluss von Massenausgleich

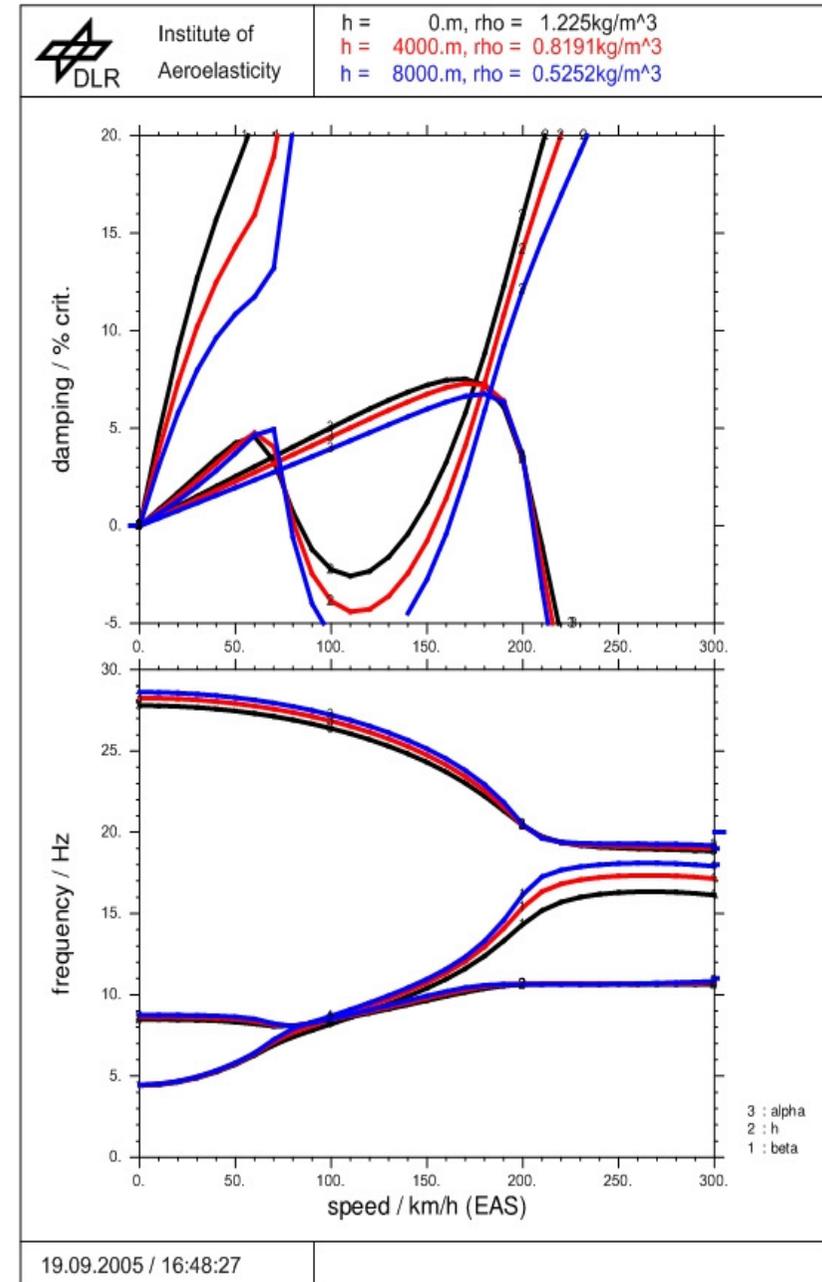


- Massenausgleich vor der Ruderachse:
  - Ruderschwerpunkt wird in die Drehachse verschoben.
  - Einfluss der Massenkopplung zwischen Schlag- und Ruderdrehschwingung wird reduziert.
  - Bei ausreichender Dimensionierung des Ausgleichs tritt keine Instabilität auf.



# Einfluss der Luftdichte

- Größere Flughöhe / geringere Luftdichte verursacht stärkeren Dämpfungseinbruch
- Schwingungsformen können mit zunehmender Flughöhe instabil werden.

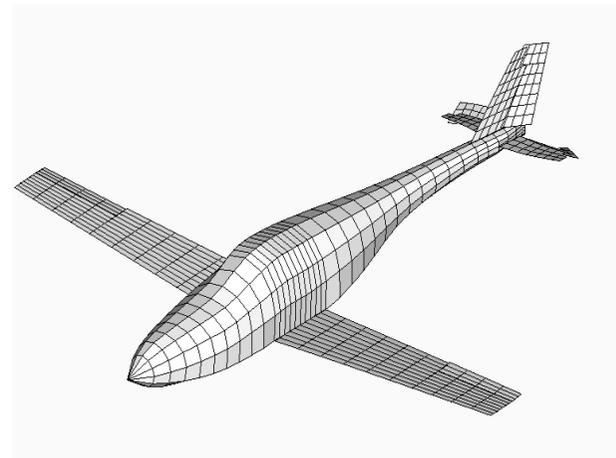
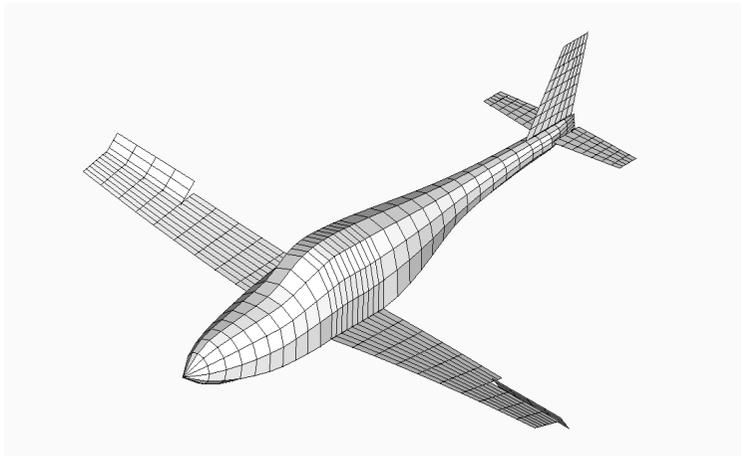


# Mögliche Flutterinstabilitäten

- Flügel-Ruder-Flattern
- Flügel-Ruder-Hilfsruder-Flattern
- Flügel-Rumpf-Flattern

# Flügel-Ruder-Flattern

- Symmetrische und antisymmetrische Kopplung von Flügelbiegung, Flügeltorsion mit Querruder oder Klappen
- Kopplung von Seitenleitwerk und Seitenruder
- Kopplung von Höhenleitwerk und Höhenruder
- Vermeidung durch Massenausgleich (statisch oder dynamisch)
- Kopplung von Torsion und Ruder ist häufig nicht abstellbar



# Flügel-Ruder-Hilfsruder-Flattern

- Hilfsruder bewirkt Ruderdrehung, so dass Luftkraft am Flügel induziert wird.
- Lagerspiel oder unzureichende Aktuatorsteifigkeit führt zum Flattern, wenn das Hilfsruder nicht massenausgeglichen ist

Beispiel: Absturz des  
VfW 614 Prototypen  
durch Flattern  
01.02.1972

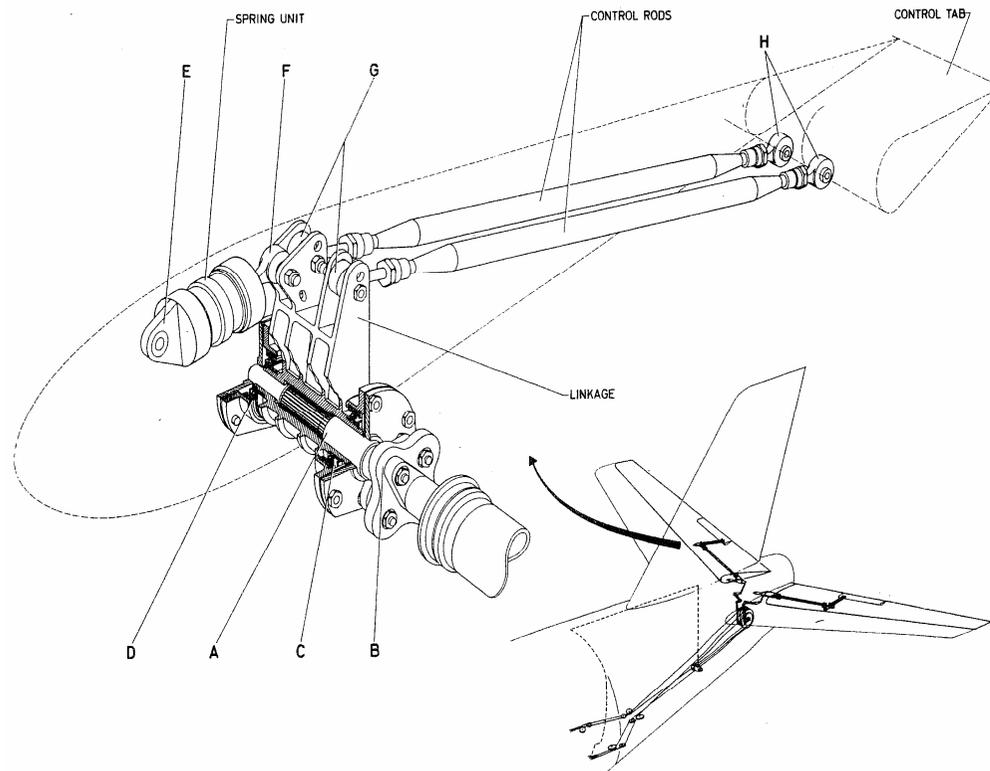
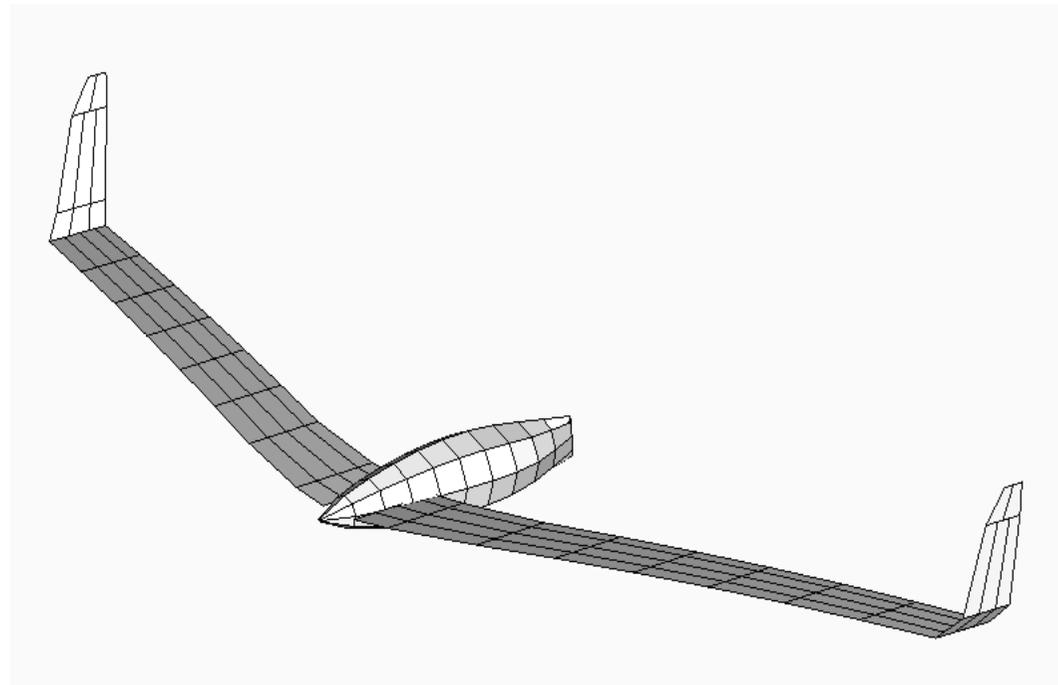


Fig. 4f CONTROL TAB LINKAGE - ELEVATOR CONTROL

# Flügel-Rumpf-Flattern

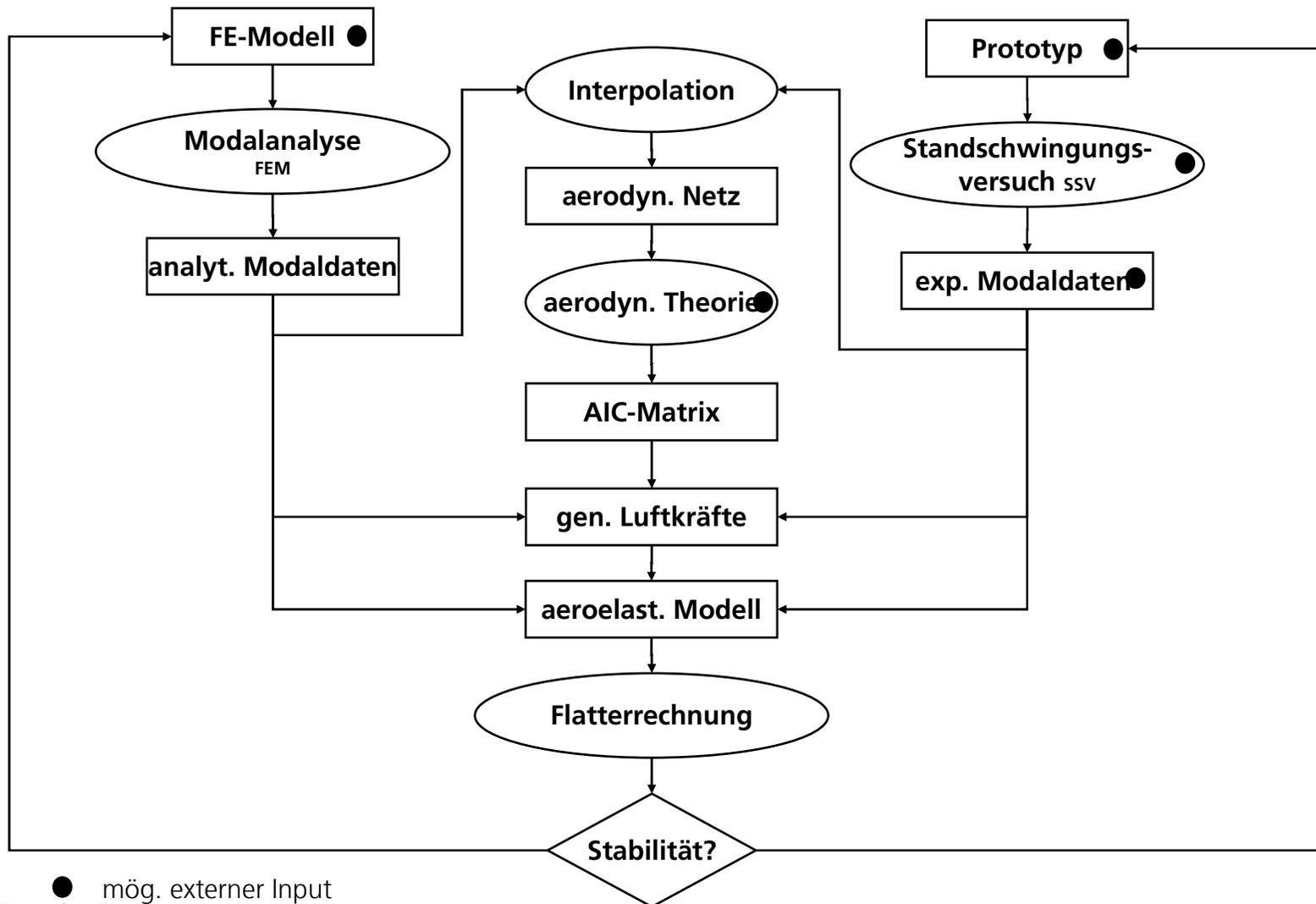
- Kopplung von Starrkörperdrehung und Flügelbiegung im niedrigen Frequenzbereich.
- Kann Auftreten, wenn die Gesamtmassenträgheit um die Nickachse und die aerodynamische Dämpfung klein sind, z.B. bei Nurflüglern



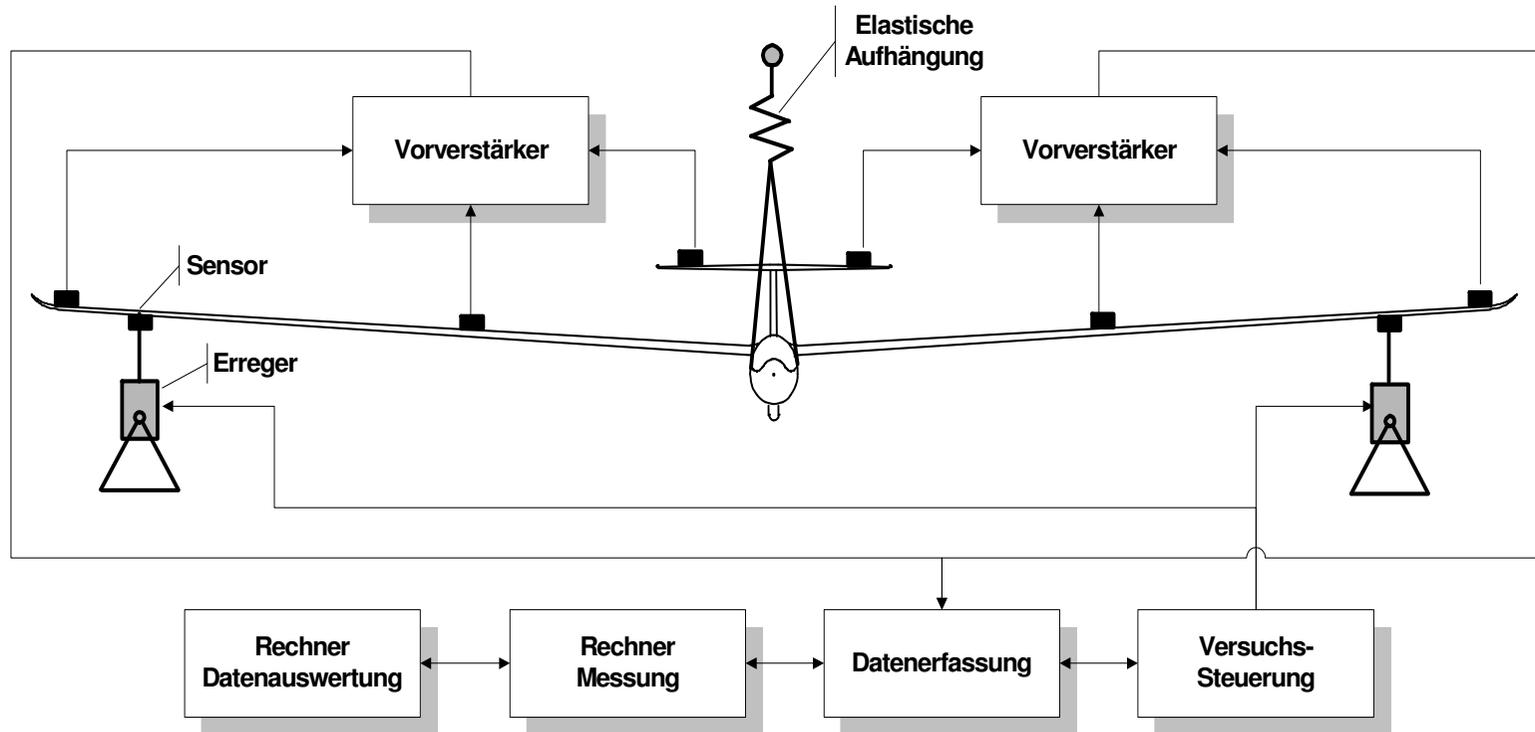
# Fluttermechanik

- Flattern kann auftreten, wenn *mindestens* zwei dafür geeignete Freiheitsgrade (Schwingungsformen) zusammenspielen.
- Mindestens einer der beteiligten Freiheitsgrade muss mit Änderung des Anstellwinkels der schwingenden Fläche oder mit Ausschlägen einer auftriebserzeugenden Klappe beteiligt sein.
- Es gelten folgende Bedingungen:
  1. Kombinationen ohne Beteiligung eines Freiheitsgrades mit Drehanteil sind immer gedämpft.
  2. Es können nur symmetrische Fälle oder nur antisymmetrische Fälle kombiniert werden.
  3. Es gibt maximale Frequenzen, oberhalb derer Schwingungsformen nicht berücksichtigt werden müssen.
  4. Wenn mehr als nur ein Freiheitsgrad zur Kombination mit einem Freiheitsgrades mit Drehanteil in Frage kommt, kann man häufig Freiheitsgrade von geringer Relevanz vernachlässigen.

# Analytischer Flatternachweis

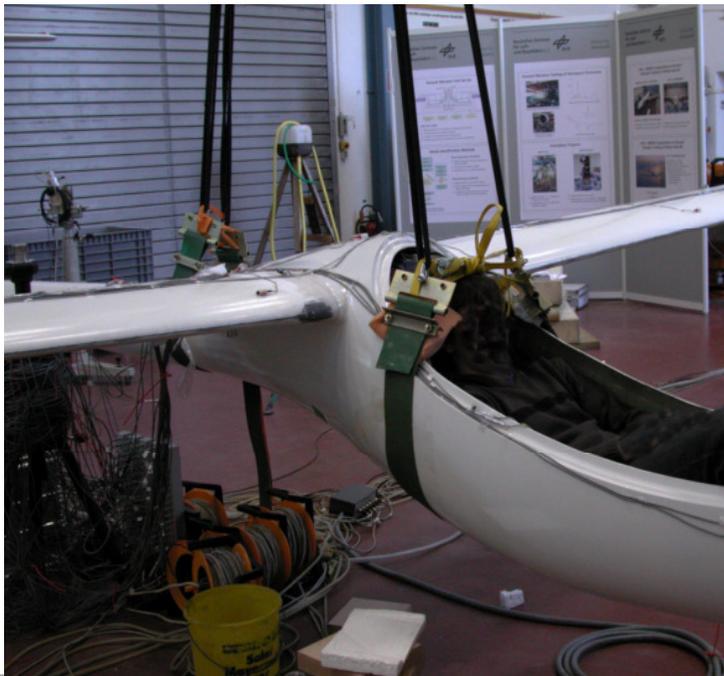


# Standschwingungsversuch am Segelflugzeug

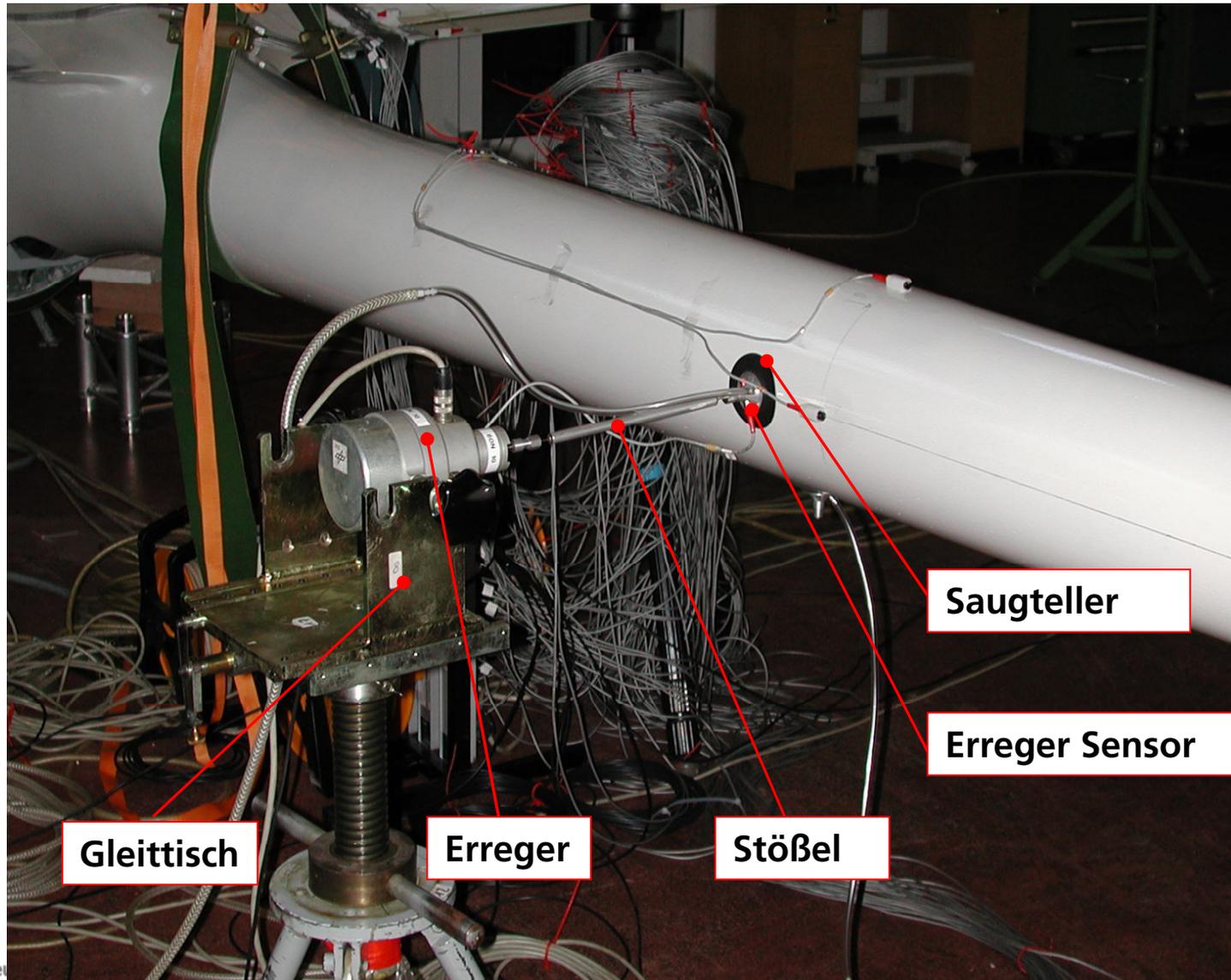


# Aufhängung an Gummiseilen

- niedrige Frequenz ( $<0.8\text{Hz}$ )
- bis ca. 800kg Flugzeuggewicht möglich
- Aufhängung verursacht negative Flügelbiegung



# Elektrodynamische Erregung



Gleittisch

Erreger

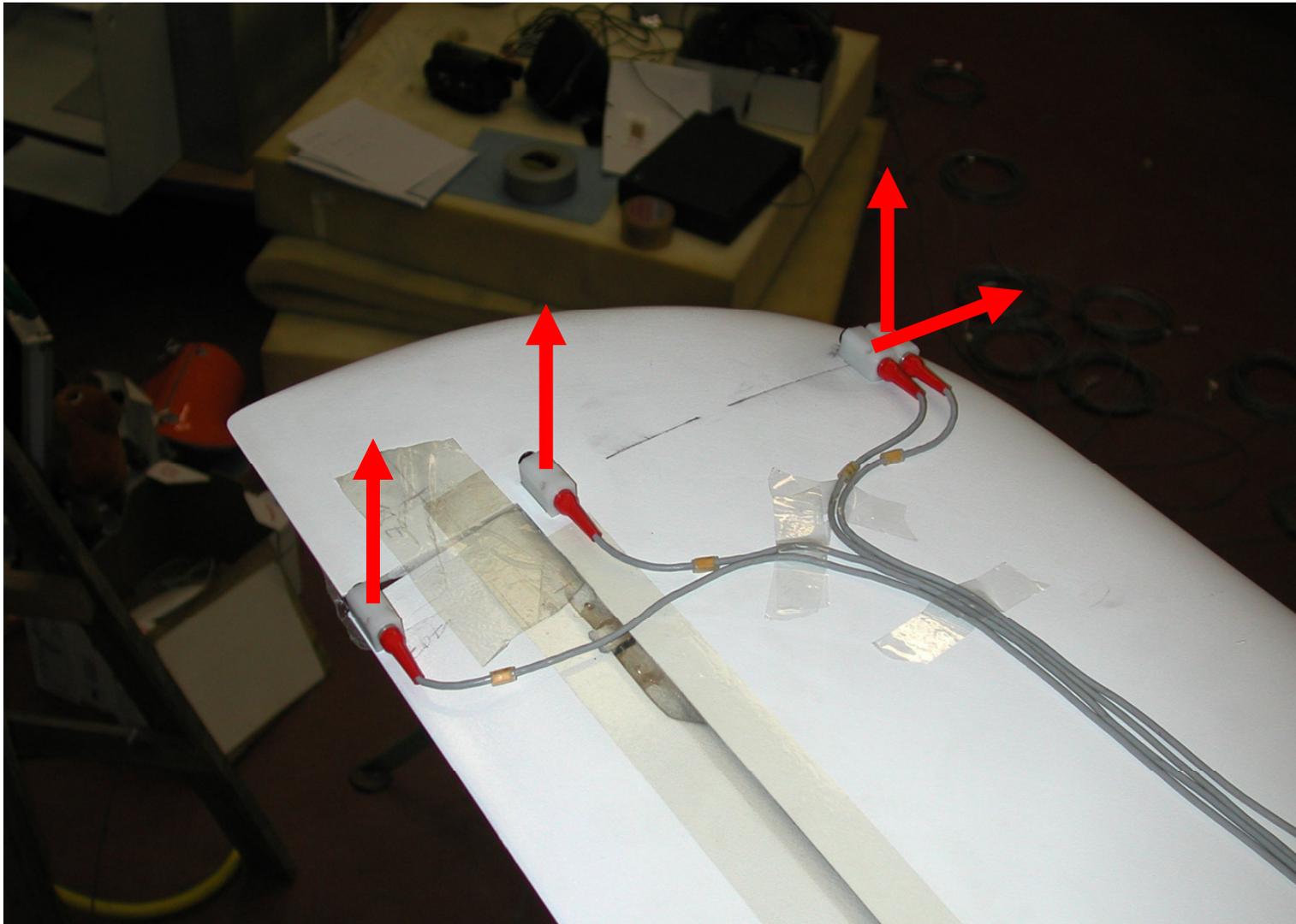
Stößel

Saugteller

Erreger Sensor

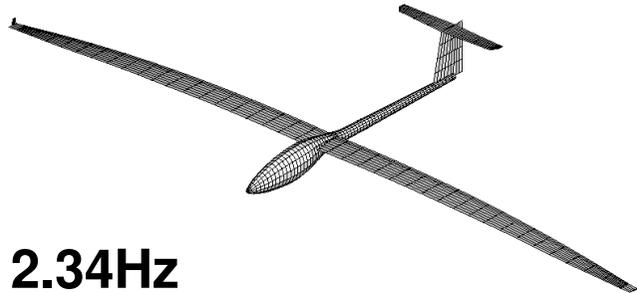


# Beschleunigungsaufnehmer

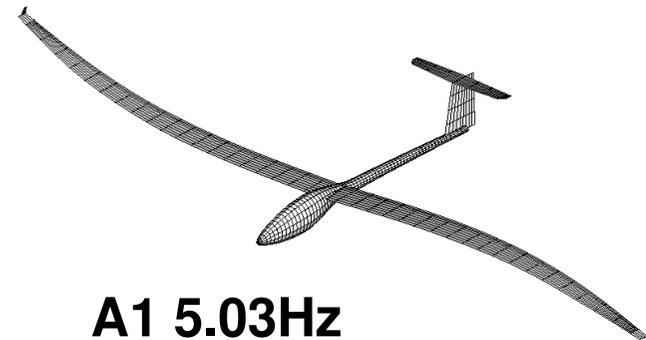


# Schwingungsformen

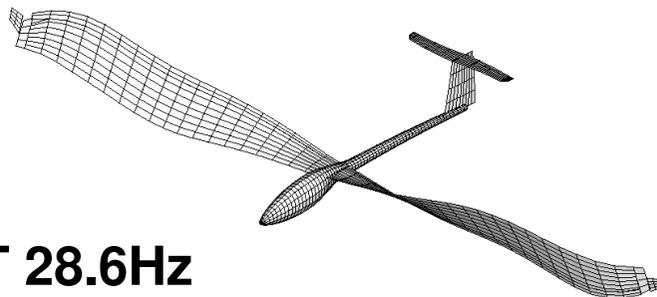
- Ein Segelflugzeug hat ca. 20-30 für das Flattern relevante Schwingungsformen ( $< 40\text{Hz}$ ).
- einige Beispiele ...



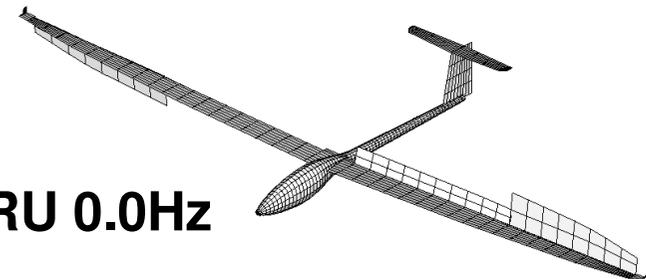
**S1 2.34Hz**



**A1 5.03Hz**



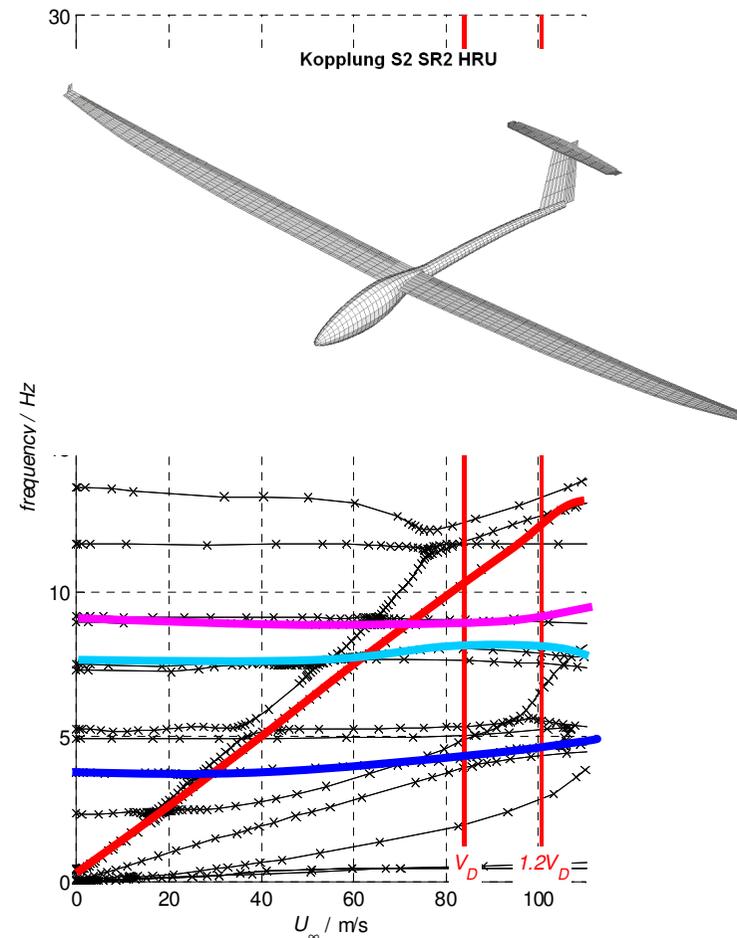
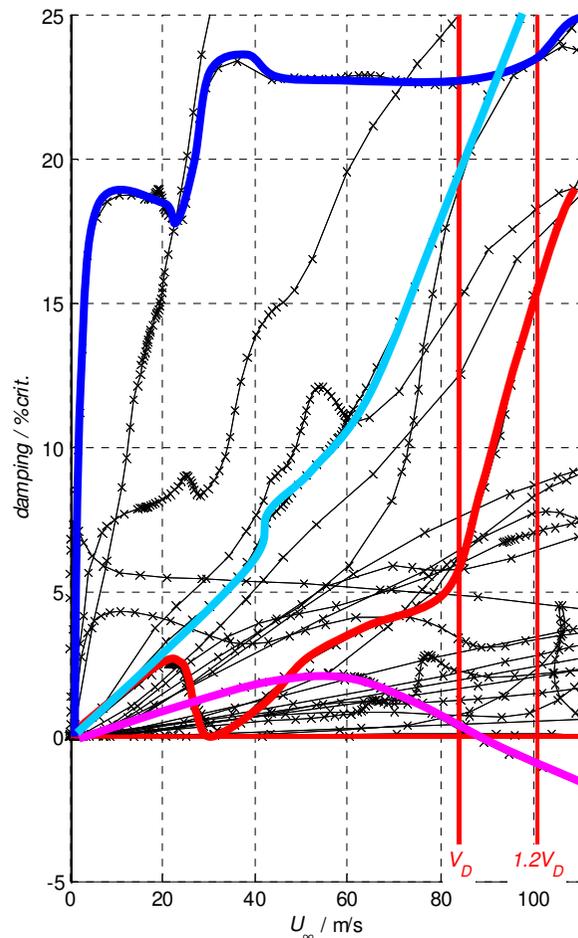
**ST 28.6Hz**



**QRU 0.0Hz**

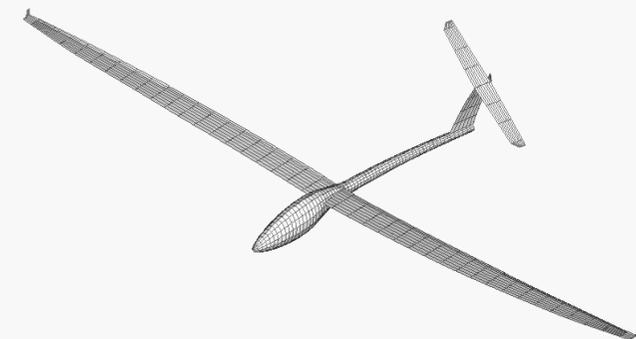
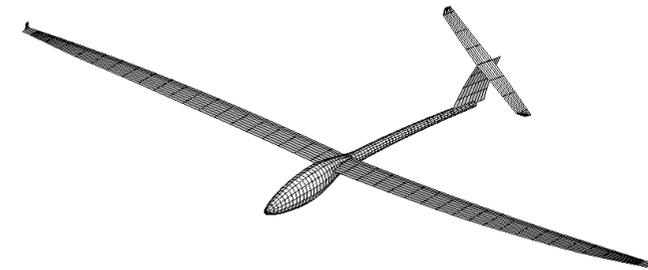
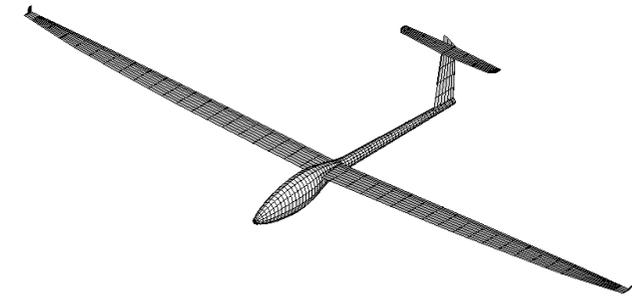
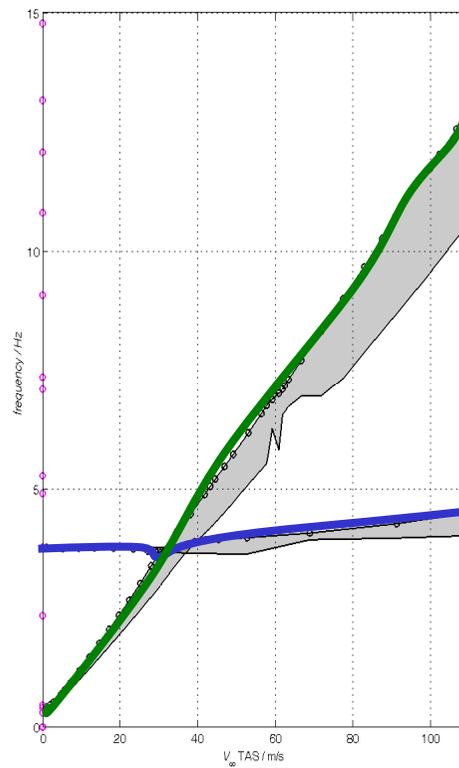
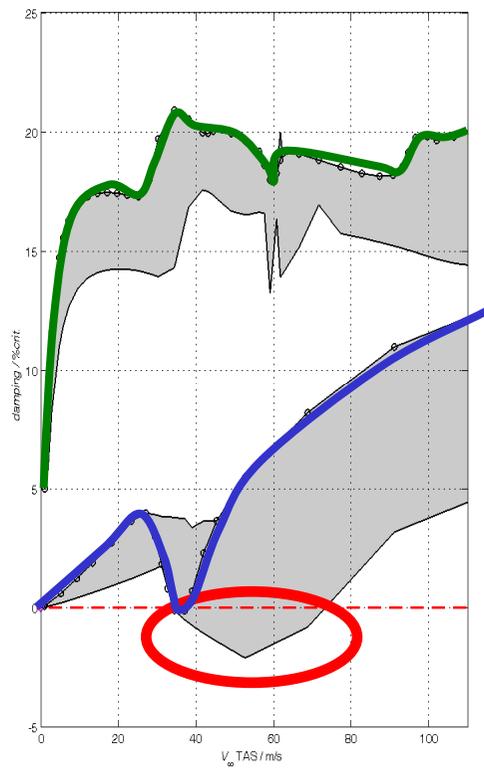
# Dämpfungs- und Frequenzverlauf über der Fluggeschwindigkeit

- Verfolgung der Dämpfung und Frequenz jeweils einer Schwingungsform mit ansteigender Fluggeschwindigkeit bei fester Flughöhe



# Intervall-Flutterrechnung Einfluss der Luftdichte

➤ Variation der Flughöhe zwischen 0 – 10000m



➤ mehr Massenausgleich für große Flughöhen erforderlich!

# Beachtung der max. Fluggeschwindigkeit in der Höhe

(Auszug Flughandbuch Ventus 2a/b)

## 4.5.7 Flug in großer Höhe

Bei Flügen in größerer Höhe ist zu beachten, daß die tatsächliche Fluggeschwindigkeit TAS (TRUE AIRSPEED) größer ist als die angezeigte Geschwindigkeit IAS (INDICATED AIRSPEED).

Dies hat keine Bedeutung für die Festigkeit und Belastbarkeit des Flugzeuges, jedoch dürfen aus Gründen der Flattersicherheit folgende vom Fahrtmesser angezeigten Geschwindigkeiten (IAS) nicht überschritten werden:

Höhe m	V (IAS) km/h	Höhe m	V (IAS) km/h
0	270	6000	221
1000	270	7000	209
2000	270	8000	197
3000	260	9000	186
4000	247	10000	175
5000	234	12000	151

**Max. zugelassene Fluggeschwindigkeit über 3000m nimmt deutlich ab!**

**➤ Ältere Flugzeuge (vor 1980) sind häufig nur bis 3000m Flughöhe erprobt! (Abschätzung nach Stender)**



*inkompressibel :*

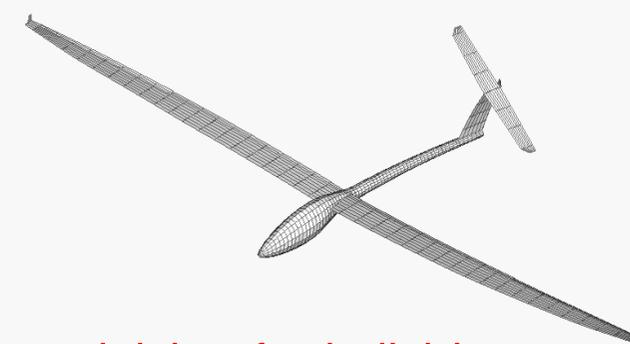
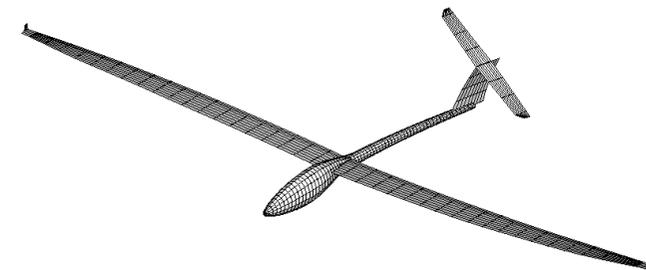
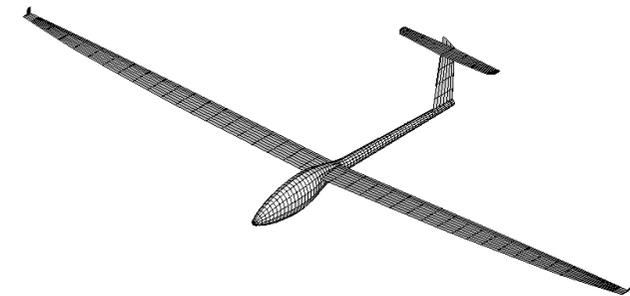
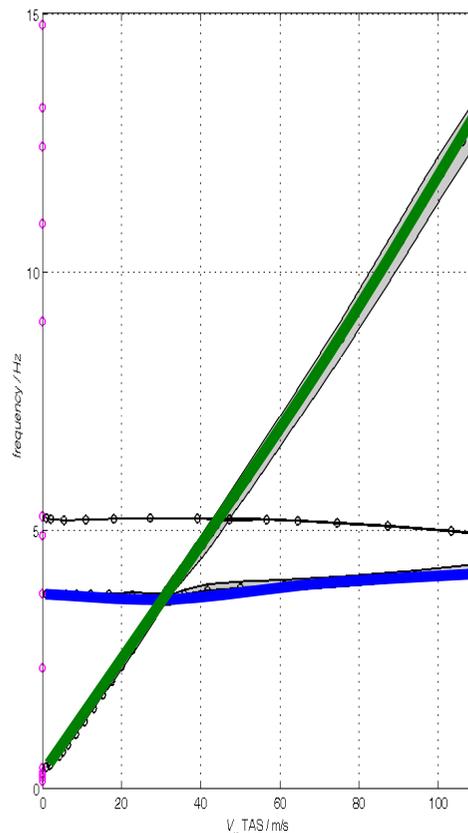
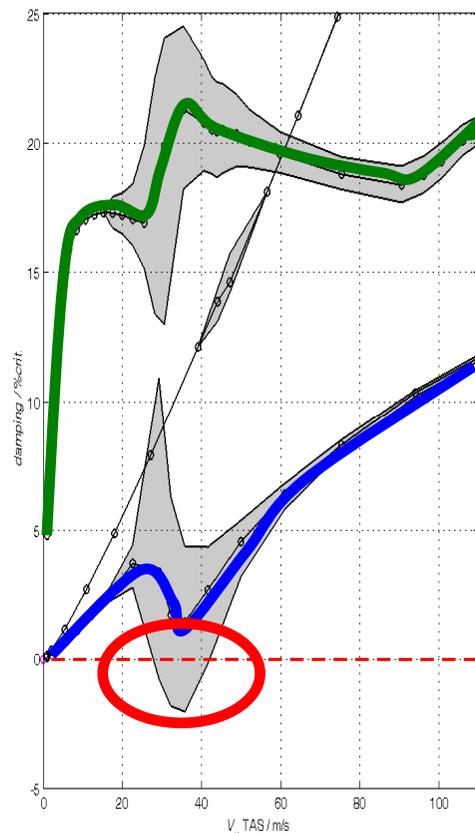
$$V_{IAS} \approx V_{CAS} \approx V_{EAS}$$

$$V_{EAS} = V_{TAS} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{MSL}}}$$

$$\rho \leq \rho_{MSL}$$

# Intervall-Flutterrechnung Toleranz der Rudermassen

➤ Änderung der Seitenrudermasse +/-20%  
z.B. durch Neulackierung



➤ **Reduktion des Restmoments durch Massenausgleich erforderlich!**

# Modifikationen der Steuerruder und des Steuerungssystems

- Beachtung der Angaben über Ruderrestmomente im Betriebs- /  
Wartungshandbuch
  - insbesondere nach Reparaturen und Änderungen
  - Vorgehensweise bei der Bestimmung beachten
- Überprüfung
  - von Spiel und Steifigkeit in der Steuerung während des Betriebs, insbesondere nach Auftreten von Beschädigungen
  - der Steuerflächen auf Wasser- bzw. Eisansammlungen, Gewährleistung der Durchlässigkeit von Entwässerungslöchern an der Hinterkante
  - von zusätzlichen Anbauten in den Steuerungssträngen z.B. Steuerknüppelgriff mit viel „Multifunktionstechnik“

# Beachtung der Rudermomente und Massen

(Auszug Wartungshandbuch Ventus 2a/b)

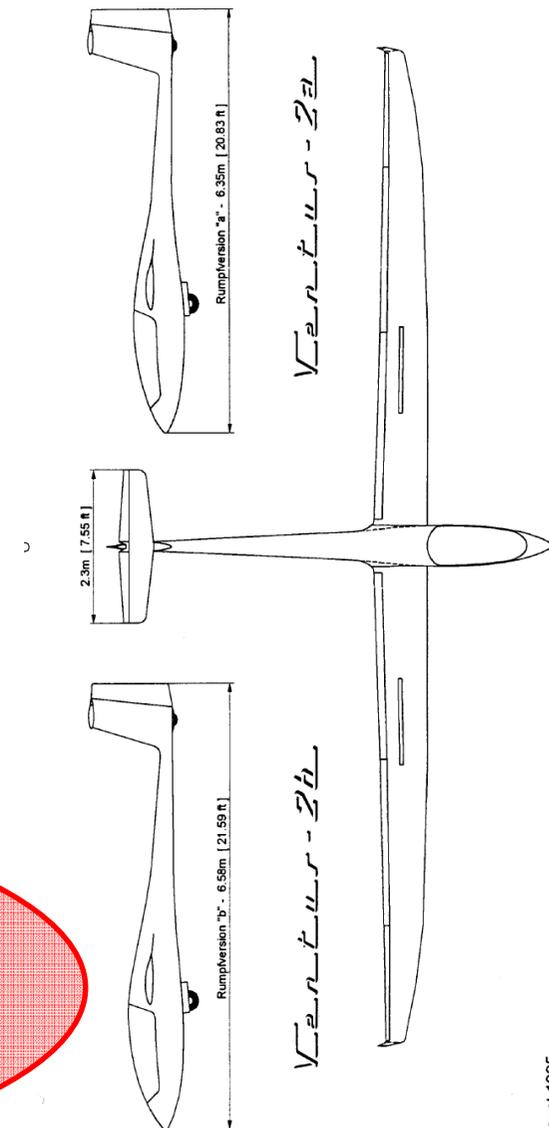
## 2.2 Rudermomente und Massen

Nach einer Reparatur oder Neulackierung dürfen die Rudermomente und Massen die folgenden Werte nicht überschreiten:

Ruder	Masse kg	Restmoment cmkg
Seitenruder mit Massenausgleich	3,9 bis 4,8	(-3,0) bis (1,0)
1 Höhenruder ohne Beschlag	0,72 bis 0,88	2,75 bis 3,5
Wölbklappe gleich Querruder innen	1,50 bis 1,85	7,0 bis 8,5
Querruder Mitte mit Massenausgleich	2,0 bis 2,5	2,7 bis 3,5
Querruder außen	0,54 bis 0,66	1,5 bis 1,9

Werden die Werte des Restmomentes überschritten, so ist ein zusätzlicher Massenausgleich folgendermaßen vor der Drehachse anzubringen:

1. Bei Reparaturen im Bereich der Reparatur.
2. Bei Neulackierungen möglichst über die ganze Länge des lackierten Bereiches (bei Rudern ohne Massenausgleich) bzw. in der Nähe oder neben dem schon vorhandenen Massenausgleich.

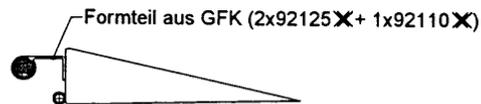


# Messung des Ruderrestmoments

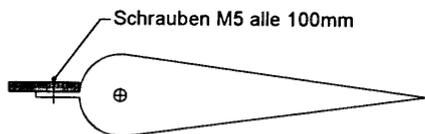
(Auszug Wartungshandbuch Ventus 2a/b)

Bei allen Rudern ist der Massenausgleich (Bandmaterial aus Blei oder Stahl, maximale Länge der einzelnen Stücke 0,5 m) an der Fahne vor der Drehachse anzuschrauben bzw. ein GFK-Formteil mit Rundmaterial (Stahl, Messing, Blei) anzuharzen.

## Querruder und Wölbklappe



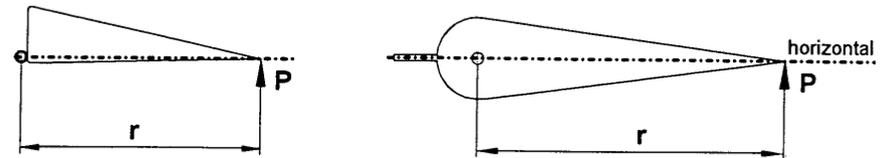
## Höhenruder und Seitenruder



Die Rudermomente werden im ausgebauten Zustand der Ruder bestimmt.

$$M = P \times r$$

Die Profilsehne muß dabei möglichst horizontal sein.



Ruder im Drehpunkt gelagert.

Messung der Kraft P mit Hilfe einer Brief- oder Federwaage.

Nach Einbau von zusätzlichen Massenausgleichsgewichten ist zu überprüfen, ob die Ruderausschläge nicht eingeschränkt werden.

# Kontrolle des Spiels in der Steuerung

(Auszug Wartungshandbuch Ventus 2a/b)

## Spiel in der Steuerung

Bei festgehaltenen Steuern darf das Spiel an den Rudern folgende Werte nicht überschreiten:

Inneres Querruder	: +/- 2 mm,	gemessen 126 mm hinter Drehachse
Zwischen innerem und mittlerem Querruder	: +/- 2 mm,	gemessen 106 mm hinter Drehachse
Zwischen mittlerem und äußerem Querruder	: +/- 1 mm,	gemessen 88 mm hinter Drehachse
Höhenruder	: +/- 3 mm,	gemessen 157 mm hinter Drehachse

Bei übermäßigem Spiel in Lagern und Gelenken sind diese auszuwechseln bzw. Maßnahmen zur Behebung beim Hersteller zu erfragen.

Das Seitenruder hat eine direkt durchgehende Seilsteuerung und ist deshalb immer spielfrei.

# Zusammenfassung und Empfehlungen

- Die Musterzulassung eines Segelflugzeugs erfordert einen aufwendigen experimentellen und rechnerischen Nachweis der Flatterstabilität inklusive Flugerprobung.
- Segelflugzeuge sind daher *flattersicher*, wenn
  1. sie in den im Flughandbuch angegebenen Betriebsgrenzen für Höhe und Geschwindigkeit betrieben werden,
  2. die im Wartungshandbuch angegebenen Toleranzen für Rudermassen, Restmomente und Spiel in der Steuerung eingehalten werden (insbesondere Prüfung nach Reparaturen und Neulackierungen),
  3. das Flugzeug nur wie im Flughandbuch vorgesehen beladen / betankt wird.
- Der Wellenflug-ambitionierte Pilot sollte die Grenzen seines Flugzeugs kennen.
- Gegebenenfalls sollte er den Zustand seines Flugzeugs nachprüfen (Winterwartung).

# ASG29 Fahrtmesserschild für Flüge in großer Höhe (Auszug Flughandbuch)

Schild für Fluggeschwindigkeiten in großer Höhe:

Höchstgeschwindigkeit $V_{NE}$ in großer Höhe		Höchstgeschwindigkeit $V_{NE}$ in großer Höhe		Höchstgeschwindigkeit $V_{NE}$ in großer Höhe	
Höhe msl [m]	$V_{max}$ IAS [km/h]	Höhe msl [ft]	$V_{max}$ IAS [kts]	Höhe msl [ft]	$V_{max}$ IAS [mph]
0 - 3500	270	0 - 10000	168	0 - 10000	146
< 5000	249	< 15000	159	< 15000	138
< 7000	223	< 20000	146	< 20000	127
< 9000	198	< 25000	134	< 25000	116
< 11000	175	< 30000	122	< 30000	106
< 12000	162	< 40000	99	< 40000	86

Dieses Schild wird nahe dem Fahrtmesser angebracht.



Wellenaufwind 8500m über dem Riesengebirge  
K. Vládar

**Viel Spaß beim Aufspüren  
der Wellenaufwinde!**

