

# VTP Flugzeugstabilität

15.09.2016

## 1. VTP Flugzeugstabilität

### 1.1 Aufgabenstellung

Anhand eines Windkanalmodells des Transportflugzeugs Transall C-160 soll im Rahmen einer Drei-Komponentenmessung der Beitrag des Höhenleitwerks zur statischen Längsstabilität bestimmt werden.

### 1.2 Messprogramm

Konfiguration	Anstellwinkelbereich	Messpunkte	Schiebewinkel	Staudruck
ohne Höhenleitwerk (oHLW)	$\alpha = 0 - 20^\circ$	$\Delta\alpha = 2^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$q_\infty = 400 \text{ Pa}$
mit Höhenleitwerk I (HLW I)	$\alpha = 0 - 20^\circ$	$\Delta\alpha = 2^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$q_\infty = 400 \text{ Pa}$
mit Höhenleitwerk II (HLW II)	$\alpha = 0 - 20^\circ$	$\Delta\alpha = 2^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$q_\infty = 400 \text{ Pa}$

Tab. 1.1 Messprogramm

### 1.3 Auswertung

- 1.3.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit  $V_\infty$  in der Messstrecke sowie der Reynolds-Zahl  $Re_{\mu}$  auf der Basis der aktuellen Tageswerte für  $p_\infty$ ,  $T_\infty$  und  $\rho$ .
- 1.3.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse in folgenden Diagrammen:  $C_A(\alpha)$ ,  $C_A(C_W)$ ,  $C_{mN25}(C_A)$ .
- 1.3.3 Bestimmung der Neutralpunktrücklage  $x_N - x_S$
- 1.3.4 Bestimmung des Stabilitätsmaßes  $\sigma$  für alle drei Konfigurationen
- 1.3.5 Darstellung des Verlaufs von  $\frac{\partial C_{mN25}}{\partial C_A}$  über  $\frac{S_H}{S}$  für alle drei Konfigurationen in einem Diagramm
- 1.3.6 Bestimmung einer analytischen Polare
- 1.3.7 Bestimmung folgender Parameter und Darstellung in Diagrammform für die Flügel-Rumpf-Kombination (oHLW):  $M_{FR}(\alpha)$ ,  $C_{mFR}(\alpha)$ ,  $C_{m\alpha FR}(\alpha)$
- 1.3.8 Bestimmung der Wirkungsfaktoren für HLW I und HLW II und Vergleich mit den Näherungsverfahren nach Prandtl und Truckenbrodt

Diagramme sind in schwarz, gegebenenfalls mit unterschiedlichen Linienarten bzw. Symbolen auszuführen. Farbige Diagramme sind nicht zulässig.

### 1.4 Annahmen

- An dem Höhenleitwerk treten keine Druckpunktschwankungen auf
- Der Rumpfbeitrag zur Längsstabilität kann vernachlässigt werden
- Schub und Widerstand liefern keinen Beitrag zum Moment
- Die Staudruckabminderung am Ort des Höhenleitwerks beträgt  $q_H/q_\infty = 0,93$

## 2. Windkanalmodell

### 2.1 Modellbeschreibung

Bei dem Windkanalmodell handelt es sich um ein Ureol-Modell des Transportflugzeugs Transall C-160 im Maßstab 1:80, bestehend aus

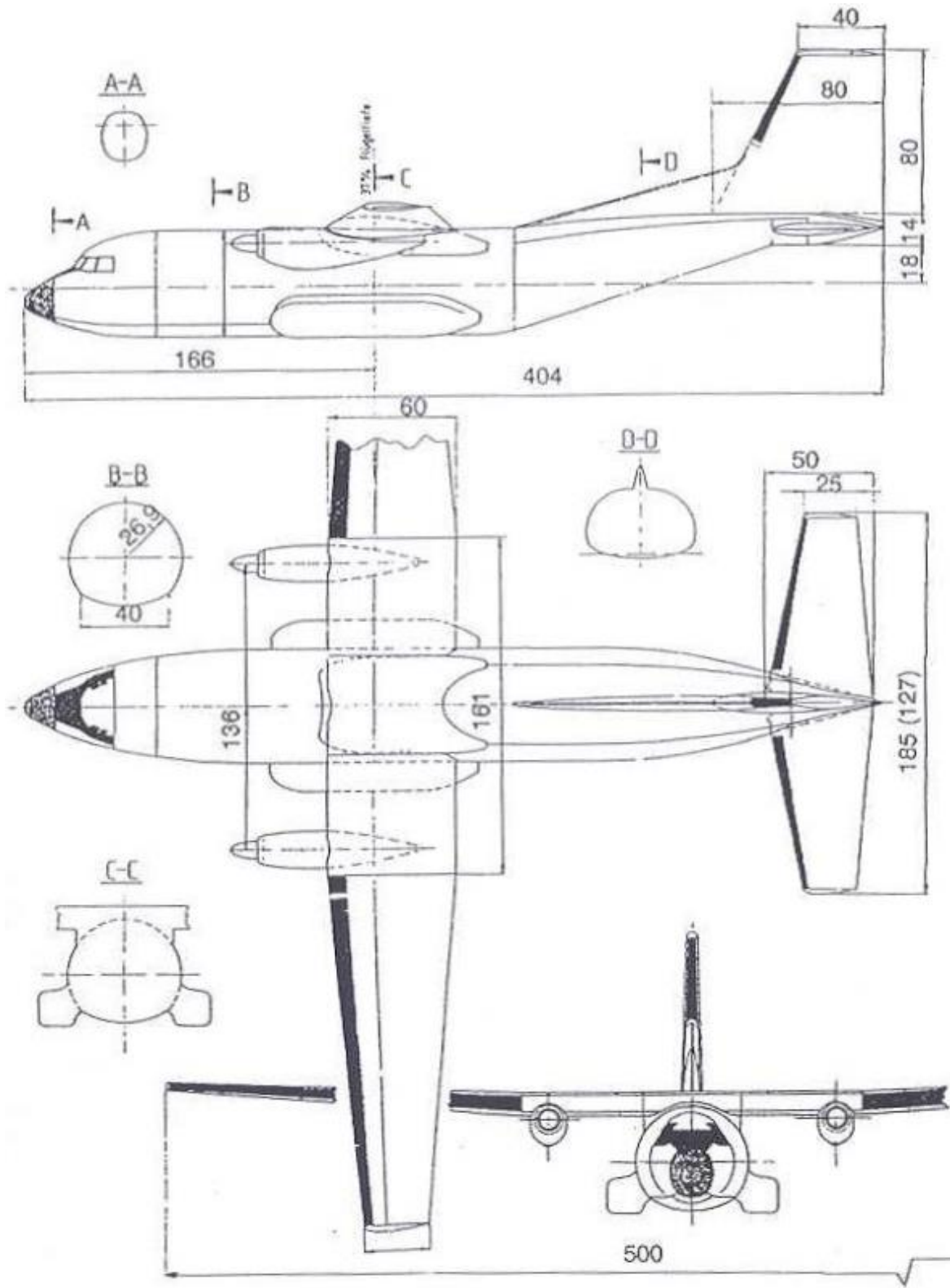
- Rumpf
- Tragflächen
- Triebwerksgondeln
- Fahrwerksschächte
- Höhenleitwerke I und II
- Seitenleitwerk
- Seitenleitwerksverkleidung
  
- Gesamtmasse: 680g
- Profil für Flügel, HLW und SLW: NACA 0018, keine Verwindung

### 2.2 Modellaufhängung

Das Modell wird in Rücklage über Drähte an der externen Drei-Komponentenwaage fixiert. Zur Stabilisierung während der Messung werden zusätzlich drei Gewichte über Drähte an dem Modell angebracht.

Beitrag der Modellaufhängung auf den Widerstand bei  $q_\infty = 400 \text{ Pa}$ :  $W_{\text{Aufhängung}} = 0,644 \text{ N}$

### 2.3 Modellabmessungen



Modellmaßstab:  $\lambda = 1:80$

**Abb. 2.1** Modellabmessungen

## 2.4 Modelldaten

		Flügel	HLW I	HLW II	SLW	Rumpf
Profil		NACA 0018				
Flügelfläche	$S_{ref}$	0,025 m <sup>2</sup>	0,00777 m <sup>2</sup>	0,00362 m <sup>2</sup>	0,00472 m <sup>2</sup>	
Spannweite	$b$	0,5 m	0,185 m	0,127 m	0,16 m <sup>2</sup>	
Streckung	$\Lambda$	10	4,4	4,46	1,36	
Flügelbezugstiefe	$l_{\mu}$	0,0518 m	0,0435	0,0296		
Rücklage	$x_E$	0,0054 m				
Einstellwinkel	$\varepsilon_F$	0°	0°	0°		
Verwindung	$\varepsilon_{AF}$	0°				
Pfeilung 1/4-Linie	$\varphi_{F25}$	4,25°	6,89°	7,1°		
Flügelinnentiefe	$l_i$	0,06 m				
Zuspitzung	$\lambda_F$	0,5	0,5	0,5		
Neutralpunkt	$x_{N25}$	0,0183 m	0,0147 m	0,0101 m		
Länge	$L$					0,404 m
Durchmesser	$d$					0,05/0,052 m

Tab. 2.1: Modellgeometrie

## 3. Auswertung

### 3.1 Längsbewegung

$$\text{Auftrieb} \quad A = C_A \cdot \bar{q} \cdot S_{ref}$$

$$\text{Widerstand} \quad W = C_W \cdot \bar{q} \cdot S_{ref}$$

$$\text{Nickmoment} \quad M = C_m \cdot \bar{q} \cdot S_{ref} \cdot l_{\mu}$$

### 3.2 Statische Längsstabilität

Durch Auftragen des Beiwerts des Längsmoments  $C_{m,N25}$  über  $C_A$  kann eine Aussage über die statische Längsstabilität getroffen werden.

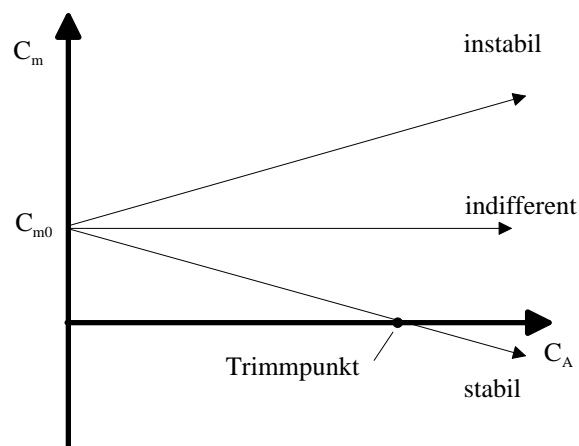


Abb. 3.1 Statische Längsstabilität

Allgemein gilt

$$C_m = C_{m,0} + \frac{\partial C_m}{\partial C_A} \cdot C_A$$

$\frac{\partial C_m}{\partial C_A} > 0$       *Instabiles Verhalten*, d.h. eine eingebrachte Störung wird verstärkt

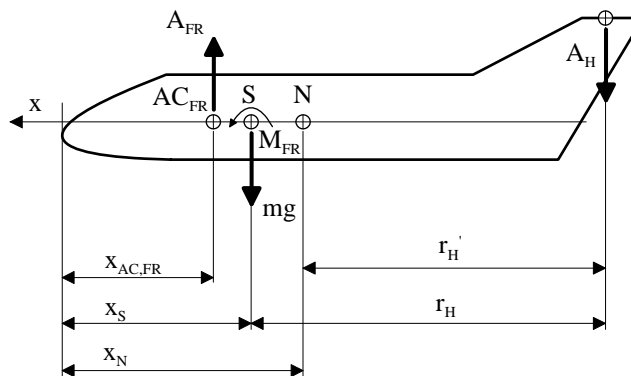
$\frac{\partial C_m}{\partial C_A} = 0$       *Indifferentes Verhalten*, d.h. eine eingebrachte Störung wird weder verstärkt noch gedämpft

$\frac{\partial C_m}{\partial C_A} < 0$       *Stabiles Verhalten*, d.h. eine eingebrachte Störung wird gedämpft

Der Schnittpunkt der Kurve des Momentenbeiwerts mit der Auftriebsachse, also  $C_M = 0$  wird als Trimpunkt bezeichnet, es stellt sich ein Momentengleichgewicht ein.

### 3.3 Stabilitätsmaß

Der Gradient  $\partial C_m / \partial C_A$  wird als Stabilitätsmaß  $\sigma$  der Längsbewegung bezeichnet und entspricht dem Abstand zwischen Neutralpunkt und Schwerpunkt des Flugzeugs bezogen auf die Flügelbezugstiefe  $l_\mu$ .



**Abb. 3.2 Kräfteverteilung**

$$\frac{\partial C_m}{\partial C_A} = \underbrace{\frac{x_S}{l_\mu} - \frac{x_N}{l_\mu}}_{\text{Gesamtflugzeug}} = \underbrace{\frac{x_S - x_{AC,FR}}{l_\mu}}_{\text{Flügel+Rumpf}} - \underbrace{\frac{\frac{C_{A\alpha,H}}{C_{A\alpha,FR}} \frac{q_H}{q_\infty} \frac{S_H}{S} \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)}{1 + \frac{C_{A\alpha,H}}{C_{A\alpha,FR}} \frac{q_H}{q_\infty} \frac{S_H}{S} \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)}}_{\text{Höhenleitwerk}} \cdot \frac{r_H}{l_\mu}$$

Wird der Rumpfbeitrag zur Längsstabilität vernachlässigt, so kann  $C_{A\alpha,FR} = C_{A\alpha,F}$  gesetzt werden, wobei  $C_{A\alpha,F}$  aus der Messung ohne Höhenleitwerk bestimmt wird.

Allgemein gilt

$x_S < x_N$ : Schwerpunkt liegt vor dem Neutralpunkt:      Stabiles Verhalten

$x_S = x_N$ : Schwerpunkt liegt im Neutralpunkt:      Indifferentes Verhalten

$x_S > x_N$ : Schwerpunkt liegt hinter dem Neutralpunkt:      Instabiles Verhalten

### 3.4 Analytische Ersatzpolare

Aus dem Diagramm  $C_w = C_{w,0}^* + k \cdot C_A^2$  sind die Werte für  $k$  und  $C_{w,0}^*$  einer Ersatzpolaren zu bestimmen

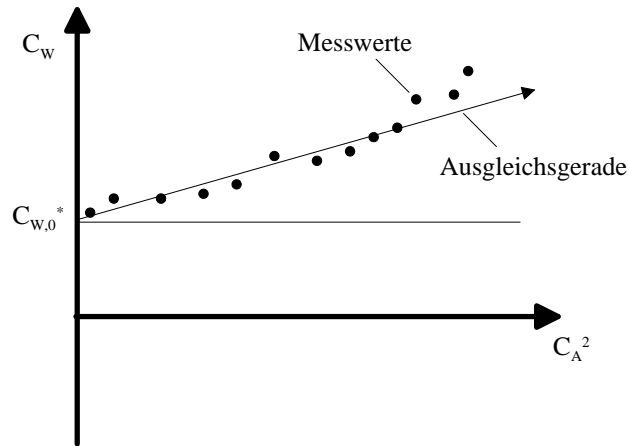


Abb. 3.3: Analytische Ersatzpolare

### 3.5 Wirkungsfaktor des Höhenleitwerks

Die Änderung des Moments mit dem Anstellwinkel hängt von der Interferenz zwischen Flügel und Höhenleitwerk ab und beschreibt somit den Beitrag des Höhenleitwerks zur Stabilität und ist proportional zu dem sogenannten Wirkungsfaktor des Höhenleitwerks  $\partial \alpha_H / \partial \alpha$ .

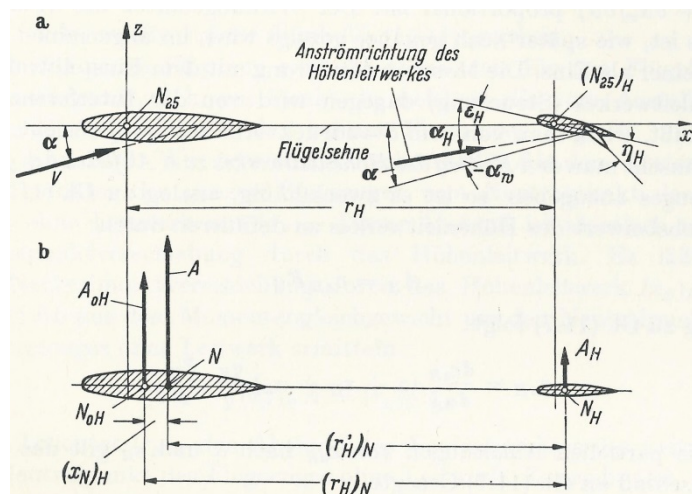


Abb. 3.4: Aerodynamik des Höhenleitwerks beim Geradeausflug

Schlichting/Truckenbrodt: *Aerodynamik des Flugzeuges, zweiter Band*, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1969, p. 379

Beitrag des Höhenleitwerks bei nicht ausgeschlagenem Höhenruder

$$C_{m,H} = -\frac{\partial C_{A,H}}{\partial \alpha_H} \cdot (\alpha + \varepsilon_H + \alpha_W) \cdot \frac{q_H}{q_\infty} \cdot \frac{S_H}{S} \cdot \frac{r_H'}{l_\mu}$$

mit

$r_H'$  Abstand des Neutralpunkts des Höhenleitwerks vom Momentenbezugspunkt

Anströmwinkel des Höhenleitwerks

$$\alpha_H = \alpha + \varepsilon_H + \alpha_W$$

mit

$\alpha_H$  Anströmwinkel am Höhenleitwerk  
 $\alpha$  Anströmwinkel der Flugzeuglängsachse  
 $\varepsilon_H$  Einstellwinkel des Höhenleitwerks (hier:  $\varepsilon_H = 0$ )  
 $\alpha_W = w_i/V_\infty$  Durch Flügel und Rumpf induzierten Anstellwinkel am Höhenleitwerk,

Änderung des Nickmoments infolge Änderung des Anstellwinkels

$$\frac{\partial C_{m,H}}{\partial \alpha} = -\frac{\partial C_{A,H}}{\partial \alpha_H} \cdot \left(1 + \frac{\partial \alpha_W}{\partial \alpha}\right) \cdot \frac{q_H}{q_\infty} \cdot \frac{S_H}{S} \cdot \frac{r_H'}{l_\mu}$$

Wirkungsfaktor des Höhenleitwerks

$$\frac{\partial \alpha_H}{\partial \alpha} = 1 + \frac{\partial \alpha_W}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial \alpha_H}{\partial \alpha} = 1 + \frac{\partial \alpha_W}{\partial \alpha} = -\frac{\partial C_{m,H}}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha_H}{\partial C_{A,H}} \cdot \frac{q_\infty}{q_H} \cdot \frac{S}{S_H} \cdot \frac{l_\mu}{r_H'}$$

### Hinweis

- Berechnung von  $C_{m,H}$  und  $C_{A,H}$  durch Inkrementbildung von  $C_{m,HLW}$  und  $C_{m,oHLW}$  bzw.  $C_{A,HLW}$  und  $C_{A,oHLW}$



### 3.6 Vergleich mit den Näherungsverfahren nach Prandtl und Truckenbrodt

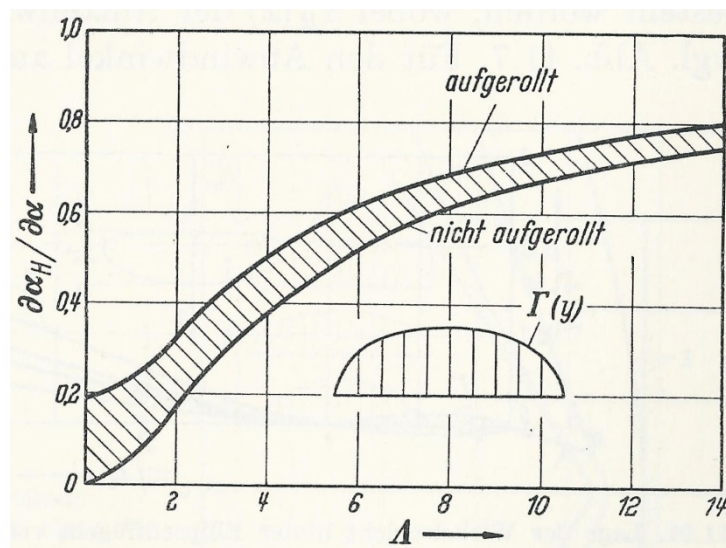
#### Truckenbrodt

Nicht aufgerollte Wirbelfläche

$$\frac{\partial \alpha_H}{\partial \alpha} = 1 + \frac{\partial \alpha_W}{\partial \alpha} = \frac{\sqrt{\Lambda^2 + 4} - 2}{\sqrt{\Lambda^2 + 4} + 2}$$

#### Prandtl

$$\frac{\partial \alpha_H}{\partial \alpha} = 1 + \frac{\partial \alpha_W}{\partial \alpha} = \frac{\Lambda - 2}{\Lambda + 2}$$



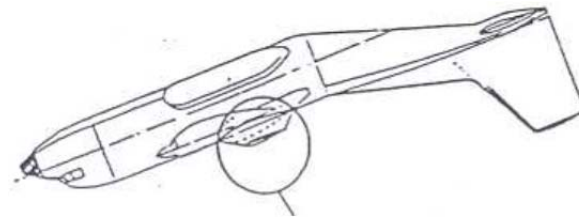
**Abb. 3.5:** Wirkungsfaktor des Höhenleitwerks in Abhängigkeit der Flügelstreckung

Schlichting/Truckenbrodt: *Aerodynamik des Flugzeuges*, zweiter Band, 2. Aufl., Springer-Verlag  
Berlin, Heidelberg, New York 1969, p. 397

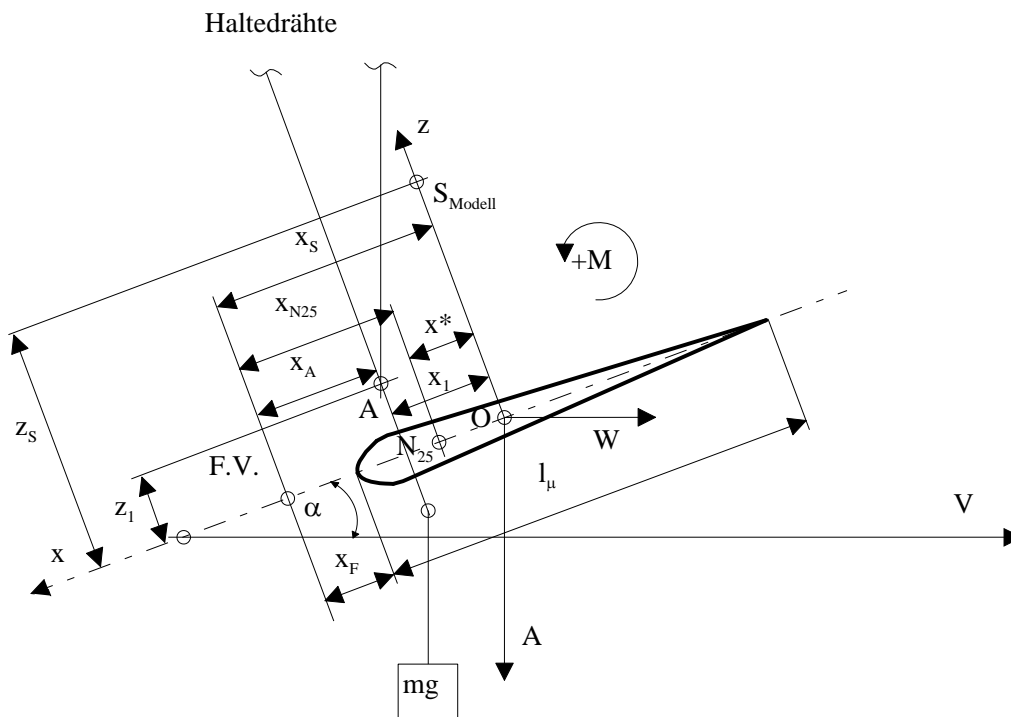
#### 4. Versuchsdurchführung

##### 4.1 Modellaufhängung

Lage des Modells in der Messtrecke



dargestellter Ausschnitt



S	Modellschwerpunkt	
A	Drehpunkt, vorderer Aufhängepunkt	
F.V.	Flügelvorderkante	
O	Koordinatenursprung	
$l_\mu$	Flügelbezugstiefe	51,8 mm
$x_F$		5,4 mm
$x^*$	$= x_S - x_{N25}$	
$x_A$		15 mm
$x_{N25}$		18,3 mm
$z_1$		5,4 mm
$x_{S1}$	Schwerpunktkoordinate HLW I	48,6 mm
$x_{S2}$	Schwerpunktkoordinate HLW II	43,2 mm
$x_{S0}$	Schwerpunktkoordinate ohne HLW	42,7 mm
$r_{HN,1}$	Leitwerkshebelarm HLW I	201 mm
$r_{HN,2}$	Leitwerkshebelarm HLW II	207 mm

## 4.2 Hinweise zur Messung

- Aufgrund der geringen Geschwindigkeiten werden alle Messungen mit einem Turbulenzgitter im Austrittsquerschnitt der Düse durchgeführt um einen unterkritischen Strömungszustand am Windkanalmodell zu vermeiden.
- Mit zunehmendem Anstellwinkel erhöht sich die Versperrung in der Messstrecke. Der dadurch abnehmende Staudruck ist entsprechend nachzuregeln und bei einem Wert von  $q_\infty = 400 \text{ Pa}$  konstant zu halten.
- Die Ergebnisse der Waage sind von  $k_p$  und  $k_{pcm}$  in N und Nm umzurechnen

## 4.3 Auswertung

### 4.3.1 Anstellwinkel

Für die Rumpfbezugsebene (RBE), die Flügelbezugsebene (FBE) und die Kanalbezugsebene (KBE) = geometrische Kanalachse gilt

$$\alpha_{RBE} = \alpha_{FBE} = \alpha_{KBE}$$

geometrischer Anstellwinkel

$$\alpha_g = \alpha_{RBE} - \Delta\alpha$$

Abweichung der Strömung in  $x$ -Richtung von der Kanalachse, mit  $A_{Düse} = 0,63 \text{ m}^2$

$$\Delta\alpha = \frac{C_A \cdot S}{8 \cdot A_{Düse}}$$

Auftriebsbeiwert

$$C_A = \frac{A_{Mess}}{q_\infty \cdot S}$$

Widerstandsbeiwert

$$C_W = C_{W,Mess} - \Delta C_W$$

mit

$$\Delta C_W = \frac{C_A^2 \cdot S}{8 \cdot A_{Düse}}$$

und

$$C_{W,Mess} = \frac{W_{Mess} - W_{Aufhängung}}{q_\infty \cdot S}$$

mit  $W_{Aufhängung} = 0,644 \text{ N}$

#### 4.3.2 Bestimmung von $C_{m,N25}$

$$X = A \cdot \sin\alpha_g - W \cdot \cos\alpha_g$$

$$Z = A \cdot \cos\alpha_g - W \cdot \sin\alpha_g$$

Momentengleichgewicht um Punkt A

$$M_A = M_O + Z \cdot x_1 - X \cdot z_1$$

$$M_O = M_A - Z \cdot x_1 + X \cdot z_1$$

mit

$$M_A = M_{A,Mess} - M_{stat.}$$

$M_{stat.}$  = statisches Moment ohne Windlast

$$M_{N25} = M_O + x^* \cdot Z$$

$$C_{m,N25} = \frac{M_{N25}}{q_\infty \cdot S \cdot l_\mu}$$

	HLW I				HLW II				ohne HLW			
$\alpha_g$ [grad]	$M_{stat}$ [kpcm]	$M_{Mess}$ [kpcm]	$A_{Mess}$ [kp]	$W_{Mess}$ [kp]	$M_{stat}$ [kpcm]	$M_{Mess}$ [kpcm]	$A_{Mess}$ [kp]	$W_{Mess}$ [kp]	$M_{stat}$ [kpcm]	$M_{Mess}$ [kpcm]	$A_{Mess}$ [kp]	$W_{Mess}$ [kp]
0												
2												
4												
6												
8												
10												
12												
14												
16												
18												
20												

**Tab. 4.1: Messprotokoll 1**

	HLW I				HLW II				ohne HLW			
$\alpha_g$ [grad]	$M_{stat}$ [Nm]	$M_{Mess}$ [Nm]	$A_{Mess}$ [N]	$W_{Mess}$ [N]	$M_{stat}$ [Nm]	$M_{Mess}$ [Nm]	$A_{Mess}$ [N]	$W_{Mess}$ [N]	$M_{stat}$ [Nm]	$M_{Mess}$ [Nm]	$A_{Mess}$ [N]	$W_{Mess}$ [N]
0												
2												
4												
6												
8												
10												
12												
14												
16												
18												
20												

**Tab. 4.2: Messprotokoll 2**