

FORMELSAMMLUNG

Luftfahrzeugtechnik

Erstellt vom Berufskolleg für Technik und Medien Mönchengladbach
für Fluggerätemechaniker Fachrichtung A/B/C
konvertiert aus dem ursprünglichen Works-Format

Inhaltsverzeichnis



1	Basisgrößen, Einheiten, Umrechnungen	5
1.1	Basisgrößen und Vorsätze	5
1.2	Längen und Geschwindigkeiten	5
1.3	Druck und Durchflußmengen	5
2	Algebra	6
2.1	Addition, Subtraktion	6
2.2	Multiplikation, Division	6
2.3	Potenzen und Wurzel	6
3	Winkelfunktion	7
3.1	Sinus, Cosinus	7
3.2	Tangens, Cotangens	7
3.3	Sinus- und Cosinussatz	7
4	Prozent und Zinsrechnung	8
4.1	Prozentrechnung	8
4.2	Zinsrechnung	8
4.3	Zinseszinsrechnung	8
5	Längenberechnung	9
5.1	Längenteilung	9
5.2	Umfang, Bogenlängen	9
5.3	Regelmäßige Vielecke	11
6	Flächenberechnung	13
6.1	Pythagoras	13
6.2	Eckige Flächen	14
6.3	Runde Flächen	16
7	Volumenberechnung	18
7.1	Einfache Körper	18
7.2	Spitze Körper	19
7.3	Abgestumpfte	20
7.4	Kugel	20
8	Längen und Verschnitte	22
8.1	Längen gebogener Werkstücke	23
8.2	Einspannlänge	23
8.3	Mindestbiegeradien	24
8.4	Zuschnittslängen gebogener Rohre	24
8.5	Verschnitt	24
9	Kinematik	25
9.1	Gleichförmige Bewegung	25
9.2	Durchschnittsgeschwindigkeit	26
9.3	Drehbewegung	27

9.4	Beziehung zwischen Drehbewegung und geradliniger Bewegung	27
9.5	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	28
9.6	Zusammengesetzte Bewegung	30
10	Masse und Kraft	31
10.1	Masse	31
10.2	Dynamisches Grundgesetz	31
10.3	Kraft als Vektor	31
10.4	Kräftezusammensetzung	32
10.5	Kräftezerlegung	33
10.6	Reibung	34
10.7	Fliehkraft	35
10.8	Federkraft	35
11	Drehmoment, Hebel und Auflagekräfte	36
11.1	Drehmoment	37
11.2	Hebel	37
11.3	Auflagekräfte	37
12	Schwerpunktbestimmung	38
12.1	Einfache Körper	38
12.2	Zusammengesetzte Körper	38
12.3	Schwerpunkt eines Flugzeugs	39
13	Kräfte am Flugzeug	40
13.1	Kräfte beim Start	40
13.2	Kräfte während des Fluges	41
13.3	Flugmechanik	53
14	Arbeit, Energie und Leistung	45
14.1	Arbeit	45
14.2	Energie	47
14.3	Energieumwandlung	48
14.4	Leistung	49
15	Festigkeit	50
15.1	Zugspannung, Druckspannung	50
15.2	Scherspannung	51
15.3	Zulässige Spannung und Sicherheitszahl	51
15.4	Dehnung, Elastizität	52
15.5	Biegemoment	53
15.6	Widerstandsmomente	54
15.7	Biegespannung	55
15.8	Torsionsspannung	55
15.9	Kesselspannung	56
16	Druck, Hydrostatik	57
16.1	Kraft, Fläche und Druck	57
16.2	Wandler	58

17	Hydrodynamik	59
17.1	Ausfluß aus Gefäßen	59
17.2	Strömungen	60
17.3	Dynamische und kinematische Viskosität	61
18	Aerostatik	62
18.1	Atmosphäre	62
18.2	Statischer Auftrieb	64
19	Aerodynamik	65
19.1	Kontinuitätsgleichung	65
19.2	Bernoullische Gleichung	65
19.3	Machzahl	67
19.4	Korrektur der Bernoullischen Gleichung	67
19.5	Dynamischer Auftrieb, Kräfteverteilung	68
19.6	Luftvolumenstrom	69
19.7	Widerstand	70
19.8	Widerstandsbeiwerte	71
19.9	Reynoldszahl	72
19.10	Widerstandsbeiwerte und Interferenzwiderstand	73
20	Tragflächen- und Profilgrößen	74
20.1	Tragflächengeometrie	74
20.2	Flügelstreckung, Seiten-, Dicken-, und Wölbungsverhältnis	75
20.3	Kraftangriffspunkt und Auftriebsbeiwert	75
20.4	Profiltiefe und mittlere aerodynamische Flügeltiefe	76
20.5	Meßprotokoll	76
21	Thermodynamik	77
21.1	Wärmedehnung	77
21.2	Wärme, Energie	78
21.3	Wärmemischung	81
21.4	Luftfeuchtigkeit	83
22	Triebwerke	85
22.1	Kolbentriebwerke	85
22.2	Strahltriebwerke	89
22.3	Wirkungsgrade	91
22.4	Kreisprozeß	92
23	Instrumente	96
23.1	Temperatur, Höhe und Geschwindigkeit	96
23.2	Kreisel	99
23.3	Driften, Kippen	100
23.4	Kompaß, Kompaßfehler	102
23.5	Flugzeugmagnetismus bzw. Deviation	107
23.6	Elektromagnetische Wellen	112
23.7	Entfernungsmessung	113
23.8	Frequenzbereiche	114

1 Basisgrößen, Einheiten und Umrechnungen



1.1 Basisgrößen und Vorsätze

Basisgröße	Länge	Masse	Zeit	Strom	Temperatur	Lichtstärke
Einheit	Meter	Kilogramm	Sekunde	Ampere	Kelvin	Candela
Kurzzeichen	m	kg	s	A	K	cd

Piko	Nano	Mikro	Milli	Zenti	Dezi	Hekto	Kilo	Mega	Giga
p	n	μ	m	c	d	h	k	M	G
10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^2	10^3	10^6	10^9

1.2 Längen und Geschwindigkeiten

Einheit	m	ft	NM	KTS	m/s	km/h
1 m	1	3,2808	$5,4 \cdot 10^{-4}$			
1 ft	0,3048	1	$1,65 \cdot 10^{-4}$			
1 NM	1852	6076	1			
1 KTS				1	0,514	1,852
1 m/s				1,944	1	3,6
1 km/h				0,54	0,277	1

1.3 Drücke und Durchflußmengen

Einheit	bar	Pa	hPa	psi	Einheit	l/h	kg/h
1 bar	1	10^5	10^3	14,5	1 cuft/min	1700	
1 Pa	10^{-5}	1	10^{-2}	$14,5 \cdot 10^{-5}$	1 usg/h	3,785	
1 hPa	10^{-3}	100	1	$14,5 \cdot 10^{-3}$	1 lb/h		0,454
1 psi	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^3$	68,9	1			

2 Algebra



2.1 Addition, Subtraktion

$$\begin{array}{lcl} 2a + a & = & 3a \\ 2ab + 3ab & = & 5ab \end{array}$$

$$\begin{array}{lcl} 14a - 5c - 8a & = & 5a - 5c \\ 2a - 5a & = & -3a \end{array}$$

Vertauschungsregel:

$$a + b = c \quad b + a = c$$

Klammerregel:

$$(a + b) + c = a + (b + c) \quad a + b + c$$

2.2 Multiplikation, Division

$$\begin{array}{lcl} 4a \cdot 2b \cdot 3 & = & 24ab \\ 10a \cdot 5a & = & 2 \end{array}$$

$$\begin{array}{lcl} 6a \cdot 2 & = & 3a \\ -4a \cdot 2a & = & -2 \end{array}$$

Vorzeichenregel:

$$\begin{array}{lcl} (+a) \cdot (+b) & = & +ab \\ (-a) \cdot (+b) & = & -ab \\ (-a) \cdot (-b) & = & +ab \\ (+a) \cdot (-b) & = & -ab \end{array}$$

2.3 Potenzen und Wurzeln

Potenzen

a = Basis (Grundzahl)
 n = Exponent (Hochzahl)
 c = Potenzwert

$$c = a \cdot a \cdot a \dots a$$

$$a^n = c$$

Wurzeln

a = Wurzelwert
 n = Wurzelexponent
 c = Radikant

$$\sqrt[n]{a \cdot b} = \sqrt[n]{a} \cdot \sqrt[n]{b} \quad \sqrt[n]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}}$$

$$\sqrt[n]{a} = a^{\frac{1}{n}}$$

$$a^0 = 1$$

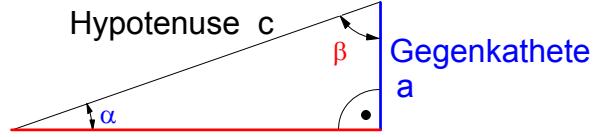
$$\sqrt[n]{c} = a$$

3 Winkelfunktion



3.1 Sinus und Cosinus

$$\text{Sinus } \alpha = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}}$$



oder

$$\text{Sin } \alpha = \frac{a}{c}$$

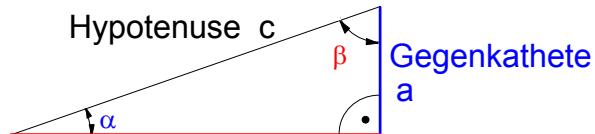
oder

$$\text{Cos } \alpha = \frac{b}{c}$$

$$\text{Cosinus } \alpha = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypotenuse}}$$

3.2 Tangens und Cotangens

$$\text{Tangens } \alpha = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}}$$



oder

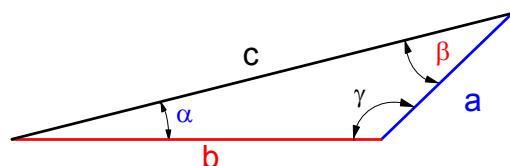
$$\text{Tan } \alpha = \frac{a}{b}$$

oder

$$\text{Cot } \alpha = \frac{b}{a}$$

$$\text{Cotangens } \alpha = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Gegenkathete}}$$

3.3 Sinussatz und Cosinussatz



Sinussatz:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

Cosinussatz:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha$$



4 Prozent- und Zinsrechnung

4.1 Prozentrechnung

p = Prozentsatz in %

G = Grundwert

P = Prozentwert

$$p = \frac{100 \cdot P}{G}$$

p gibt den Zahlenwert der Hundertstel an

G ist der Wert, auf den sich die Prozentrechnung bezieht

P ist der Teil des Grundwerts, der dem Prozentsatz entspricht

4.2 Zinsrechnung

Z = Zins

K = Kapital

p = Zinssatz in %

n = Zeit

Zins für n Jahre

$$Z = \frac{K \cdot p \cdot n}{100}$$

Zins für n Monate

$$Z = \frac{K \cdot p \cdot n}{100 \cdot 12}$$

Zins für n Tage

$$Z = \frac{K \cdot p \cdot n}{100 \cdot 360}$$

4.3 Zinseszinsrechnung

K₀ = Anfangskapital

K_n = Endekapital

n = Anzahl der Jahre

m = Anzahl der Zinszahlungen pro Jahr

p = Zinssatz in %

w = Wachstumsrate

W = Wachstumsfaktor

$$K_{mn} = K_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{p}{m \cdot 100} \right\}^{m \cdot n}$$

$$w = \frac{p}{100}$$

$$W = w + 1$$

5 Längenberechnung



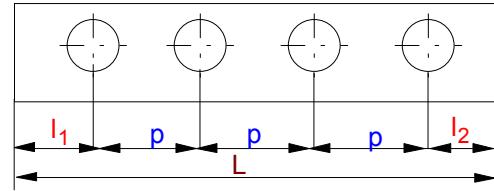
5.1 Längenteilungen

n = Teilungszahl (Lochzahl)

p = Teilung (Lochabstand)

L = Gesamtlänge

$l_{1/2}$ = Randabstände



Teilungszahl:

$$n = \frac{L - (l_1 + l_2)}{p} + 1$$

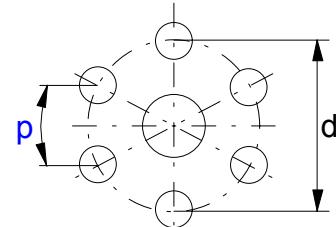
Teilung:

$$p = \frac{L - (l_1 + l_2)}{n - 1}$$

Gesamtlänge:

$$L = p(n - 1) + (l_1 + l_2)$$

p = Teilung (Kreisteilung)



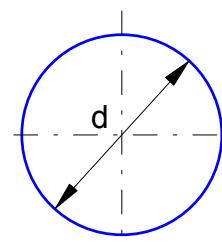
Teilung:

$$p = \frac{d \pi}{n}$$

5.2 Umfang und Bogenlängen

Kreisumfang

d = Durchmesser



Umfang:

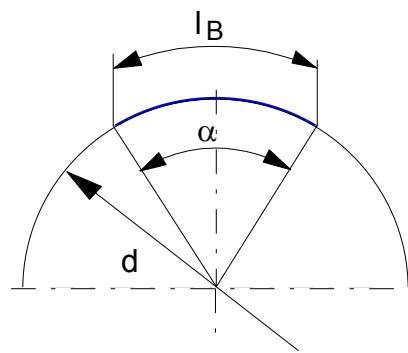
$$U = d \pi$$

$$U = 2r \pi$$

Kreisbogenlänge

d = Durchmesser

α = Mittelpunktswinkel

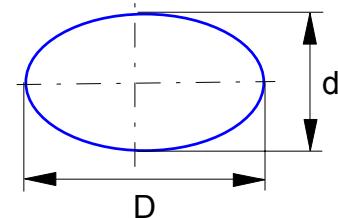


Bogenlänge l_B

$$l_B = \frac{d \pi \alpha}{360}$$

Ellipsenumfang

D, d = Durchmesser



$$U = \pi \frac{D + d}{2}$$

$$U = \pi \sqrt{2(R^2 + r^2)}$$

Umfang:

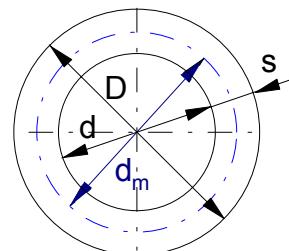
Gestreckte Längen

D = Außendurchmesser

d = Innendurchmesser

d_m = mittlerer Durchmesser

l_m = gestreckte Länge (Umfang)



mittlerer Durchmesser:

$$d_m = \frac{D + d}{2}$$

mittlerer Länge (Umfang):

$$l_m = d_m \pi$$

5.3 Regelmäßige Vielecke

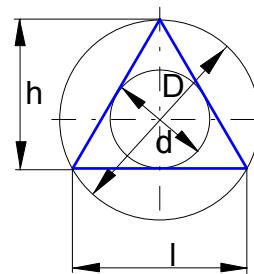
Dreieck

D = Umkreisdurchmesser

d = Inkreisdurchmesser

l = Seitenlänge

h = Höhe



Durchmesser:

$$D = 2 \cdot d$$

Seitenlänge:

$$l = 1,73 \cdot D$$

Umfang:

$$U = l \cdot n$$

Höhe:

$$h = 0,866 \cdot l$$

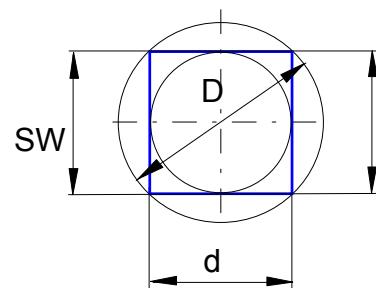
Quadrat:

D = Umkreisdurchmesser

d = Inkreisdurchmesser

SW = Schlüsselweite (Seitenlänge)

$D = e =$ Eckenmaß



Durchmesser:

$$D = 1,414 \cdot d$$

Seitenlänge:

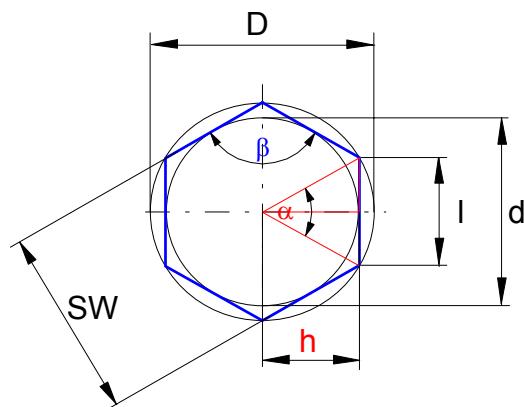
$$l = 0,707 \cdot D$$

Umfang:

$$U = l \cdot n$$

Sechseck:

D = Umkreisdurchmesser
d = Inkreisdurchmesser
SW = Schlüsselweite
D = e = Eckenmaß



Durchmesser:

$$D = 1,155 d$$

Seitenlänge:

$$l = 0,5 D$$

Umfang:

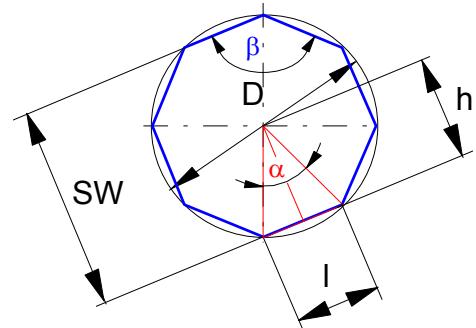
$$U = l n$$

Höhe:

$$h = 0,866 l$$

Achteck:

D = Umkreisdurchmesser
l = Seitenlänge
SW = Schlüsselweite
D = e = Eckenmaß



Schlüsselweite:

$$SW = 0,924 D$$

Seitenlänge:

$$l = 0,383 D$$

Umfang:

$$U = l n$$



6 Flächenberechnung

6.1 Pythagoras

Pythagoras

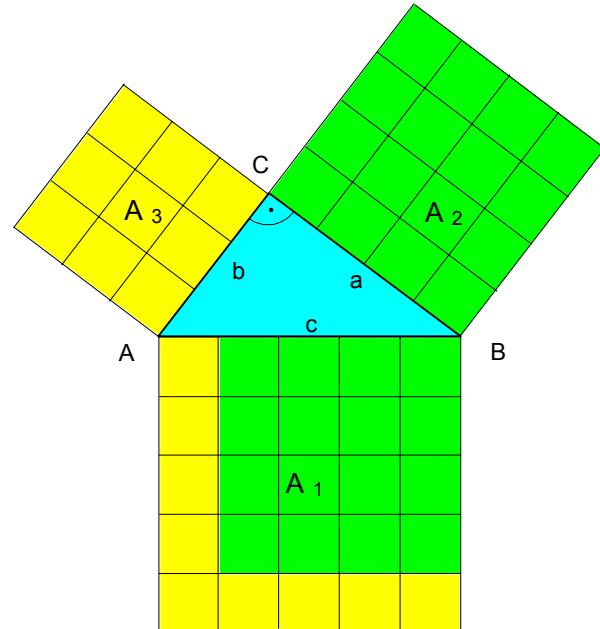
Satz des Pythagoras:

Das Hypotenusequadrat ist gleich der Summe der beiden Kathetenquadrate.

c = Hypotenuse
Die Hypotenuse liegt dem
rechten Winkel gegenüber.

a, b = Katheten
Die Katheten bilden
den rechten Winkel.

$$\begin{aligned}A_1 &= c^2 \\A_2 &= a^2 \\A_3 &= b^2\end{aligned}$$



Satz des Pythagoras:

$$c^2 = a^2 + b^2$$

Hypotenuse:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Kathete:

$$a = \sqrt{c^2 - b^2}$$

Kathete:

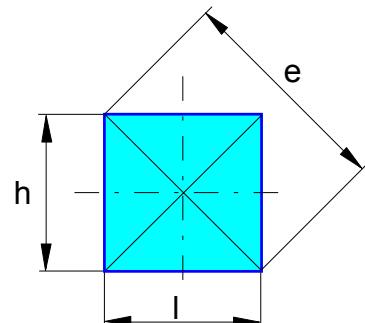
$$b = \sqrt{c^2 - a^2}$$

6.2 Eckige Flächen

Quadrat (h = l)

l = Seitenlänge

h = Höhe



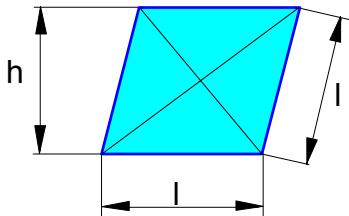
$$A = l^2$$

Fläche:

Rhombus (Rauten)

l = Seitenlänge

h = Höhe



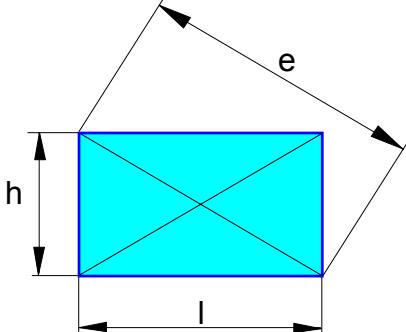
$$A = l \cdot h$$

Fläche:

Rechteck

l = Seitenlänge

h = Höhe



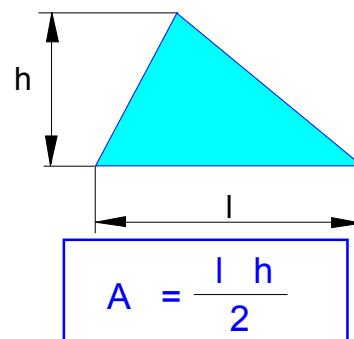
$$A = l \cdot h$$

Fläche:

Dreieck

l = Seitenlänge

h = Höhe



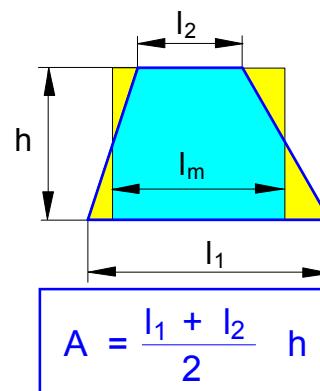
Fläche:

$$A = \frac{l \cdot h}{2}$$

Trapez

l = Seitenlänge

h = Höhe



Fläche:

$$A = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot h$$

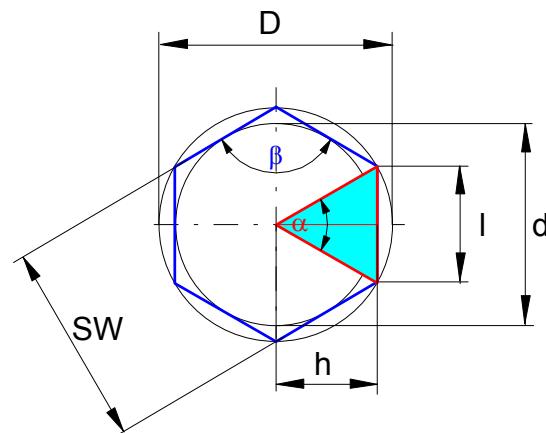
Sechseck:

D = Umkreisdurchmesser

d = Inkreisdurchmesser

SW = Schlüsselweite

$D = e =$ Eckenmaß



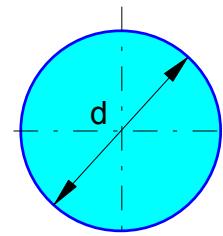
Fläche:

$$A = \frac{l \cdot h}{2} \cdot n$$

6.3 Runde Flächen

Kreis:

d = Durchmesser

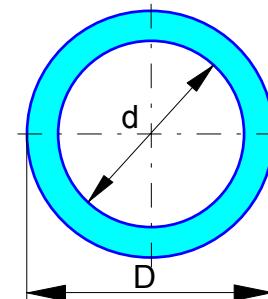


Fläche:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4}$$

Kreisring:

D, d = Durchmesser



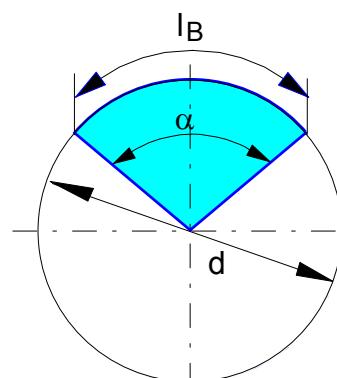
Fläche:

$$A = (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4}$$

Kreisausschnitt (Sektor)

d = Durchmesser

α = Mittelpunktswinkel



Fläche:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \frac{\alpha}{360}$$

Kreisabschnitt (Segment)

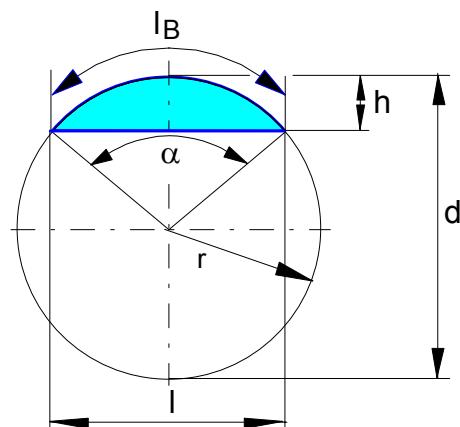
d = Durchmesser

r = Radius

α = Mittelpunktwinkel

l = Segmentlänge

h = Segmenthöhe



Fläche:

$$A = \frac{l_B r - l(r - h)}{2}$$

oder:

$$A = \frac{2 l h}{3}$$

Segmentlänge

$$l = 2 \sqrt{2 h r - h^2}$$

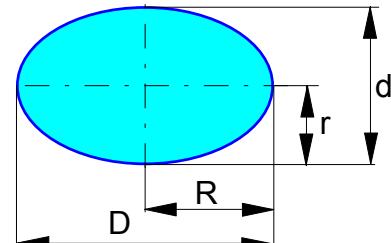
Segmenthöhe

$$h = r - \sqrt{r^2 - l^2 / 4}$$

Ellipse:

D, d = Durchmesser

R, r = Radien



Fläche:

$$A = \frac{\pi D d}{4}$$

oder:

$$A = \pi R r$$

7 Volumenberechnung



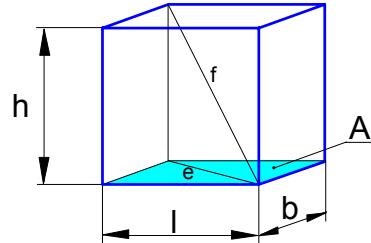
7.1 Einfache Körper

Prisma (Würfel)

l = Seitenlänge

b = Breite

h = Höhe



Volumen (Würfel $l=b=h$):

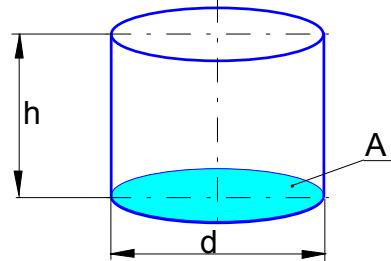
$$V = A \cdot h$$

$$V = l^3$$

Zylinder

d = Durchmesser

h = Höhe



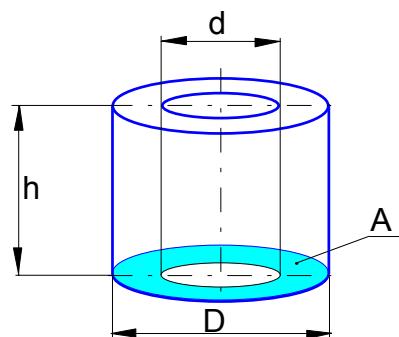
Volumen:

$$V = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot h$$

Hohlzylinder

D, d = Durchmesser

h = Höhe



Volumen:

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot h$$

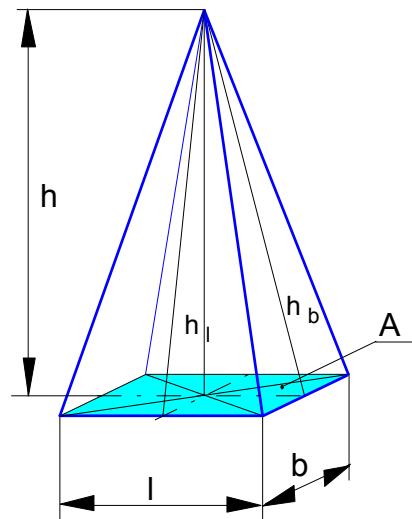
7.2 Spitze Körper

Pyramide

l = Seitenlänge

b = Breite

h = Höhe



Volumen:

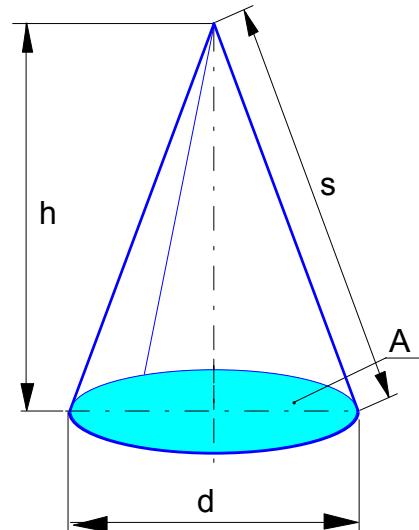
$$V = \frac{l \cdot b \cdot h}{3}$$

Kegel

d = Durchmesser

h = Höhe

s = Mantelhöhe



Mantelfläche:

$$A_M = \pi \cdot r \cdot s$$

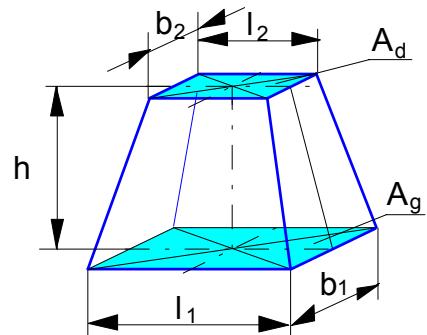
Volumen:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \cdot h$$

7.3 Abgestumpfte Körper

Pyramide

l = Seitenlänge
 b = Breite
 h = Höhe

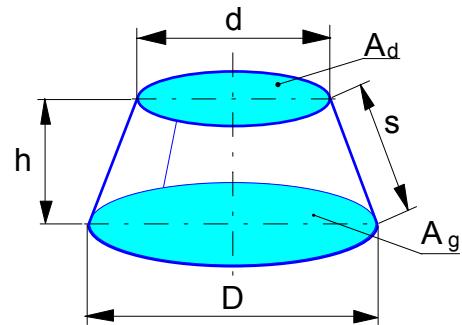


Volumen:

$$V = \frac{h}{3} (A_g + \sqrt{A_g A_d} + A_d)$$

Kegelstumpf

D, d = Durchmesser
 h = Höhe
 s = Mantelhöhe



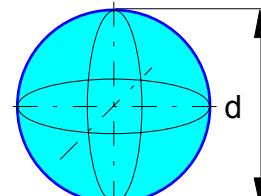
Volumen:

$$V = \frac{h \pi}{12} (D^2 + d^2 + D d)$$

7.4 Kugel

Kugel:

d = Durchmesser



Volumen:

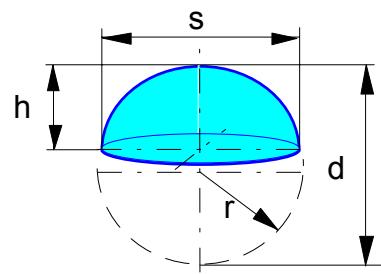
$$V = \frac{\pi d^3}{6}$$

Kugelabschnitt:

d = Durchmesser

h = Abschnitthöhe

s = Abschnittsdurchmesser



Volumen:

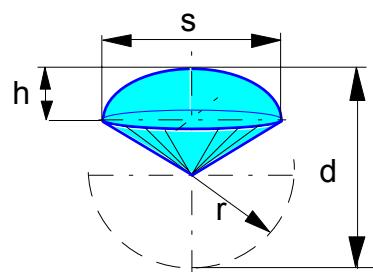
$$V = \pi h^2 \left(\frac{d}{2} - \frac{h}{3} \right)$$

Kugelausschnitt:

d = Durchmesser

h = Abschnitthöhe

s = Abschnittsdurchmesser



Volumen:

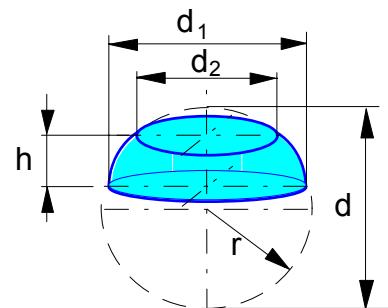
$$V = \frac{\pi d^2}{6} h$$

Kugelschicht:

d = Kugeldurchmesser

h = Abschnitthöhe

$d_{1/2}$ = Abschnittsdurchmesser



Volumen:

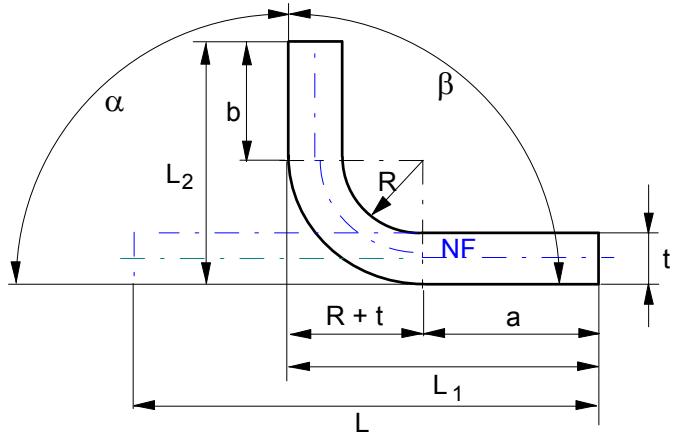
$$V = \frac{\pi}{6} h (3 r_1^2 + 3 r_2^2 + h^2)$$

8 Längen und Verschnitte



8.1 Längen gebogener Werkstücke (gestreckte Längen)

a u. b = gerade Längen
 $L_{1/2}$ = Schankellängen
 t = Materialstärke
 α = Biegewinkel
 β = Öffnungswinkel
 R = Biegeradius
 NF = neutrale Faser



Abwicklungslänge:

$$L = L_1 + L_2 - V$$

gestreckte Länge:

Zuschnittlänge:

Ausgleichswert:

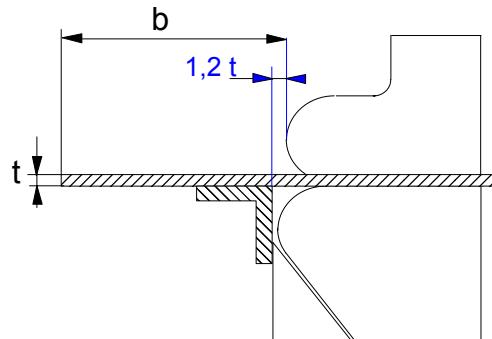
$$V = 2(R + t) - (R + \frac{t}{3})\frac{\pi}{2}$$

Ausgleichswert (Faustformel):

$$V = \frac{R}{2} + t$$

8.2 Einspannlänge

Der Abstand zwischen Oberwange und Biegewange muß 1,2 t sein, da sonst das Blech gequetscht wird.



Einspannlänge:

$$b = L_1 - \frac{R}{2}$$

8.3 Mindestbiegeradien beim Kantbiegen von Blechen LN 9003

Werkstoff	Blechdicke										
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3
	R mindestens (mm)										
1.0334.7	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0
1.1274.2	0,6	0,6	1,0	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5			
1.4544.9	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	
1.5074.4	0,6	1,0	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0
1.7734.4	0,6	1,0	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0
2.0034.1	0,6	0,6	1,0	1,0	1,6	1,6	2,5	3,0	4,0	4,0	6,0
2.0224.2	0,6	0,6	1,0	1,0	1,6	1,6	2,5	3,0	4,0	4,0	6,0
2.1964.2	0,6	1,0			1,6	2,5	2,5	3,0	4,0		
W3050.2		0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
W3116.5		1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	3,0	5,0	6,0	8,0
3.1364.1		0,6	0,6	0,6	1,0	1,2	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0
3.1364.5		1,0	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	8,0	10	12
3.1364.4		0,6	0,8	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
3.3524.1		0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0
3.3214.1		0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0
3.3214.5		0,6	1,0	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
3.3214.7		0,6	1,0	1,2	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0
3.4374.1		0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	4,0
3.4374.7		1,6	2,0	2,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10	12	16

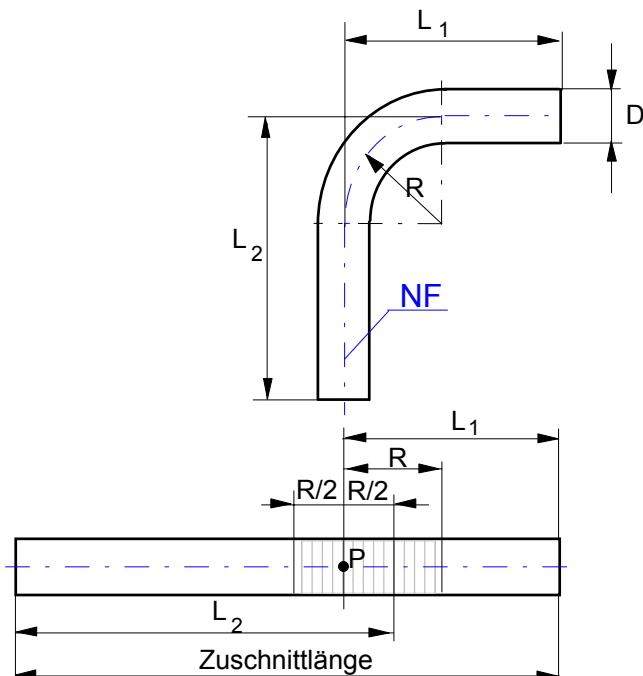
8.4 Zuschnittlängen gebogener Rohre (gestreckte Längen)

90° Rohrbogen

D = Rohrdurchmesser

R = Biegeradius

NF = neutrale Faser



Zuschnittlänge:

$$L = L_1 + L_2 - \frac{R}{2}$$

Biegelänge (Faustformel):

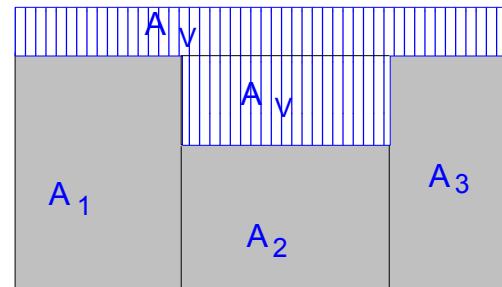
$$L_B = 1,5 R$$

8.5 Verschnitt von Blechen

A_W = Werkstückfläche

A_B = Bruttofläche

A_V = Verschnitt



Verschnitt:

$$A_V = A_B - A_W$$

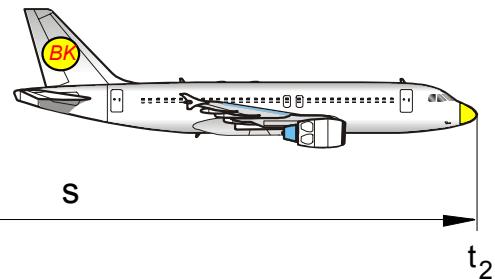
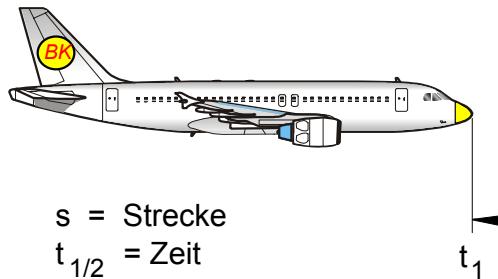
Verschnitt in %:

$$A_V \% = \frac{A_V}{A_W} \cdot 100 \%$$

9 Kinematik



9.1 Gleichförmige Bewegung



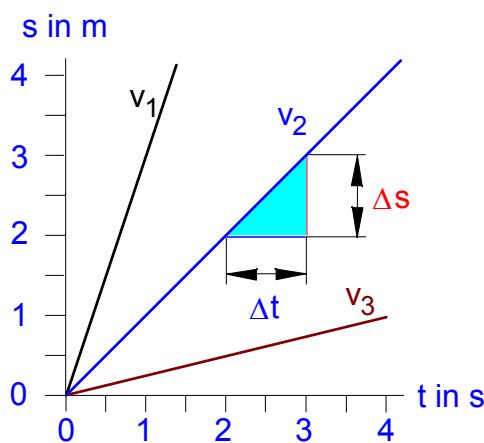
Geschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t}$$

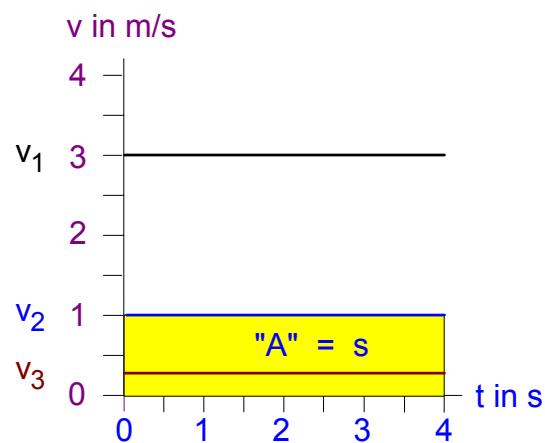
oder:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Graphische Darstellung gleichförmiger Bewegung



Weg-Zeit-Diagramm



Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm

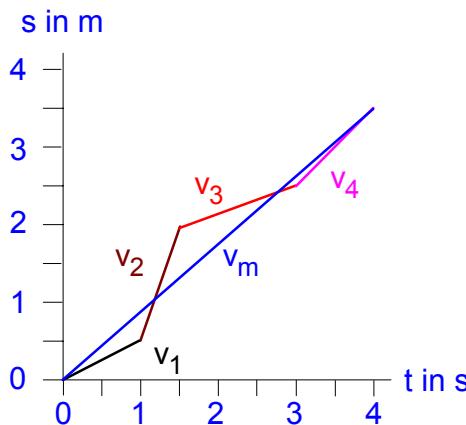
Anmerkung:

Je steiler der Anstieg der Geraden im Weg-Zeit Diagramm ist, um so größer ist die Geschwindigkeit.

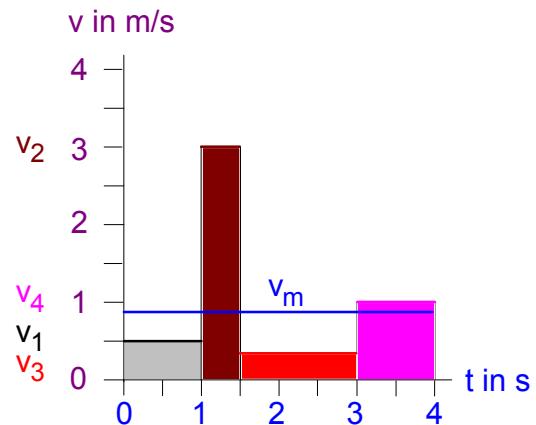
Im oben dargestellten Diagramm h.d.: $v_1 > v_2 > v_3$

9.2 Durchschnittsgeschwindigkeit

Bewegt sich ein Flugzeug oder ein anderes Fahrzeug mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ in den entsprechenden Zeitintervallen, so ist für die gesamte Strecke bzw. Zeit die Durchschnittsgeschwindigkeit v_m von Bedeutung. Zwischenstops bzw. Unterbrechungen können mit einbezogen werden. Die Geschwindigkeit ist in dem Zeitintervall $v_i = 0$.



Weg-Zeit-Diagramm



Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm

Durchschnittsgeschwindigkeit:

oder:

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

$$v_m = \frac{v_1 \cdot t_1 + v_2 \cdot t_2 + \dots + v_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Anmerkung:

Zur Bestimmung der Einzelwege s_i bzw. des Gesamtweges s eignet sich das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm.

Denn die Fläche unterhalb des Graphens im v-t-Diagramm entspricht dem zurückgelegten Weg s in dem Zeitintervall Δt .

Die Rechteckflächen $v \cdot t$ im oben dargestellten v-t-Diagramm entsprechen den Einzelwegen s_i . Die Summe der Einzelflächen ergibt den Gesamtweg.

9.3 Drehbewegung

d = Durchmesser in m

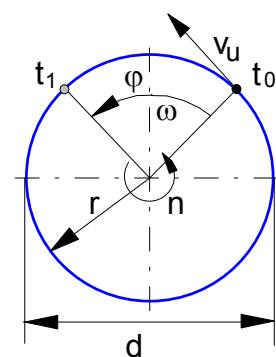
r = Radius in m

φ = Drehwinkel

n = Drehzahl in 1/min:

v_u = Umfangsgeschwindigkeit

ω = Winkelgeschwindigkeit



Umfangsgeschwindigkeit in m/s:

$$v_u = \frac{d \pi n}{60 \cdot 1000}$$

Winkelgeschwindigkeit in rad/s

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60}$$

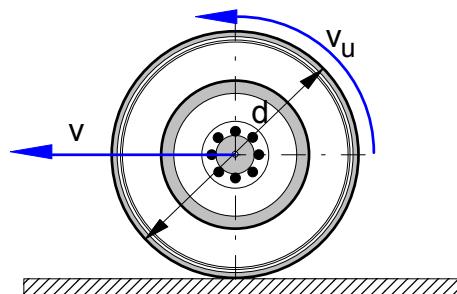
Umfangsgeschwindigkeit in m/s:

$$v = \omega \cdot r$$

9.4 Beziehung zwischen Drehbewegung und geradliniger Bewegung

v = Geschwindigkeit

v_u = Umfangsgeschwindigkeit



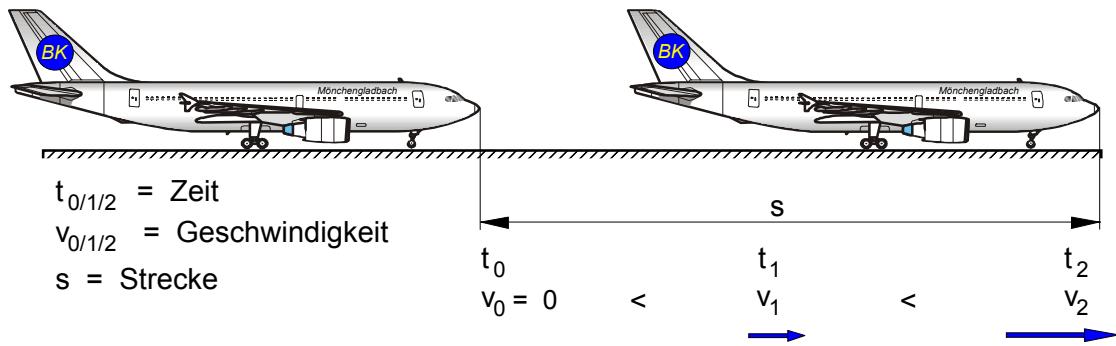
Geschwindigkeit in m/s:

$$v = v_u$$

oder:

$$v = \frac{d \pi n}{60 \cdot 1000}$$

9.5 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

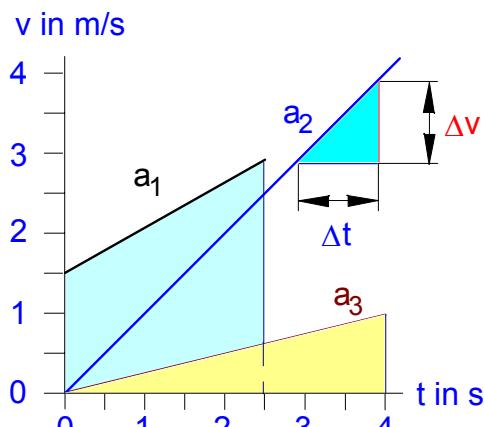


Beschleunigung: Geschwindigkeitszunahme pro Zeiteinheit

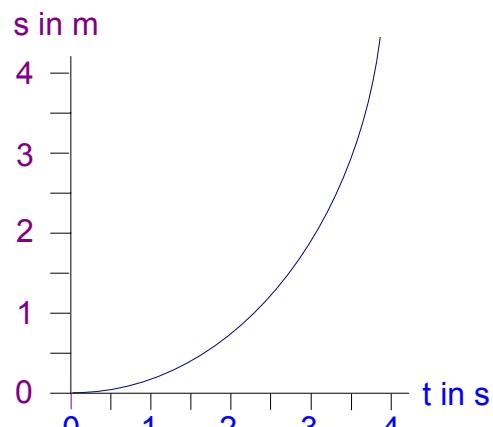
Beschleunigung:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Graphische Darstellung gleichmäßig beschleunigter Bewegung:



Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm



Weg-Zeit-Diagramm

Geschwindigkeit in m/s:

$$v = a t$$

Ist bereits eine Anfangsgeschwindigkeit vorhanden, so folgt:

Geschwindigkeit in m/s:

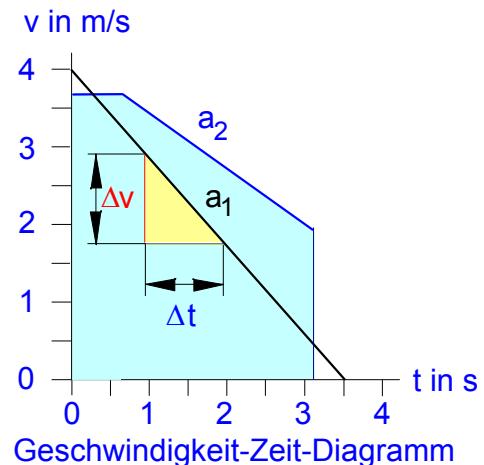
$$v = v_0 + a t$$

Verzögerung: Geschwindigkeitsabnahme pro Zeiteinheit

Verzögerung:

$$a = -\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Graphische Darstellung der Verzögerung im v-t-Diagramm



Die Strecken lassen sich u.a. mit Hilfe des v-t-Diagramms berechnen.

Strecke mit v und t:

$$s = \frac{v \cdot t}{2}$$

Strecke mit a und t:

$$s = \frac{a}{2} t^2 + v_0 \cdot t$$

Gesamtstrecke:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i$$

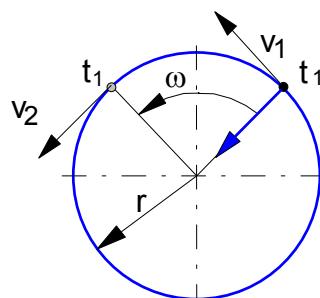
Radialbeschleunigung:

r = Radius in m

v = Umfangsgeschwindigkeit

ω = Winkelgeschwindigkeit

$$v_1 \neq v_2 \quad |v_1| = |v_2|$$



Radialbeschleunigung:

$$a_r = \omega^2 \cdot r$$

$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

9.6 Zusammengesetzte Bewegung

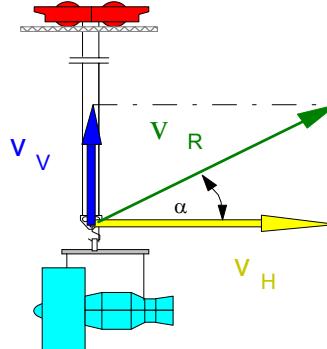
Durch Überlagerung verschiedener Einzelbewegungen entsteht eine zusammengesetzte (resultierende) Bewegung.

2 Komponenten

v_v = Vertikalgeschwindigkeit

v_h = Horizontalgeschwindigkeit

v_r = Resultierende Geschwindigkeit



Vektorielle Addition:

$$v = v_v + v_h$$

Resultierende Geschwindigkeit:

$$v = \sqrt{v_v^2 + v_h^2}$$

3 Komponenten

v_{sw} = Seitenwind, v_{st} = Steiggeschwindigkeit

v_f = Fluggeschwindigkeit (Eigengeschwindigkeit)

v_r = Resultierende Geschwindigkeit

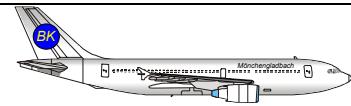
Vektorielle Addition:

$$v = v_{st} + v_{sw} + v_f$$

Resultierende Geschwindigkeit:

$$v = \sqrt{v_{sw}^2 + v_f^2 + v_{st}^2}$$

10 Masse und Kraft



10.1 Masse

Die Masse m eines Körpers ist das Maß für die Stoffmenge. Die Basiseinheit der Masse im SI-System ist das kg.

Die Dichte ρ eines Stoffes ist die auf eine Volumeneinheit bezogene Masse.

Masse:

$$m = V \rho$$

10.2 Dynamisches Grundgesetz

Wird einer Masse m die Beschleunigung a zuteil, dann ist eine Kraft F erforderlich, die gleich dem Produkt aus der Masse m und der Beschleunigung a ist.

Kraft:

$$F = m a$$

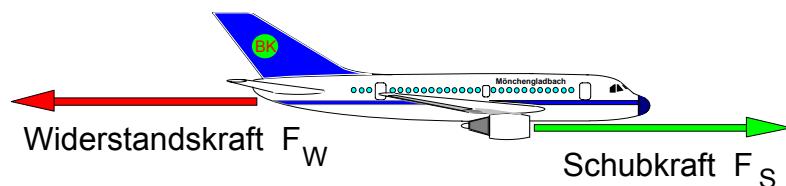
Eine besondere Kraft ist die Gewichtskraft. Die allgemeine Beschleunigung a ist bei der Gewichtskraft die Erdbeschleunigung g .

Gewichtskraft:

$$F_g = m g$$

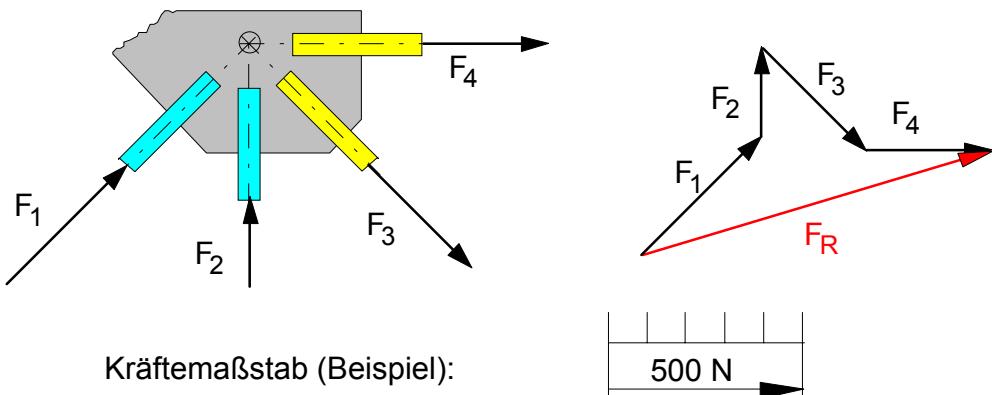
10.3 Kraft als Vektor

Die Kraft lässt sich als Vektor (Kraftpfeil) darstellen:



10.4 Kräftezusammensetzung

Die Resultierende ergibt sich aus der vektoriellen Addition der Einzelkräfte. Mit Hilfe eines Kräftemaßstabes (KM) lässt sich die Resultierende graphisch ermitteln.



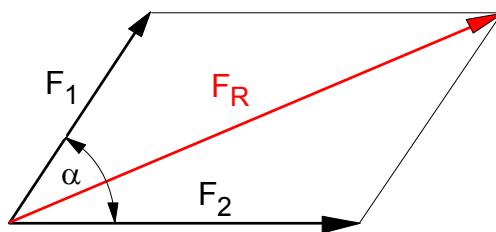
Resultierende Kraft:

$$\vec{F}_R = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

oder:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

Die Resultierende (Betrag) eines Kräfteparallelogramms lässt sich auch mit Hilfe des Cosinus-Satzes berechnen.



Resultierende Kraft:

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \alpha}$$

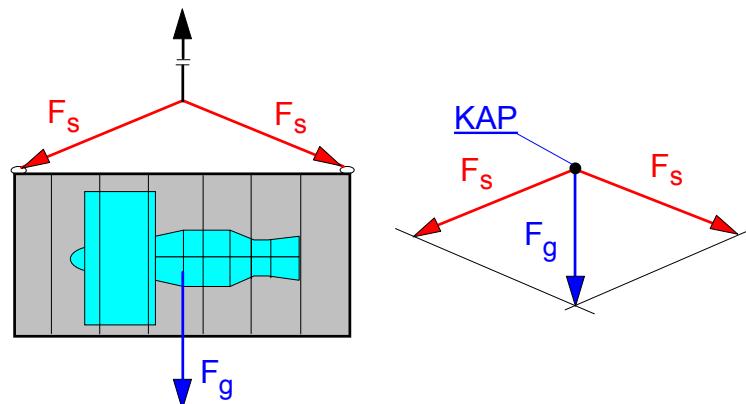
Bilden F_1 und F_2 einen rechten Winkel, so kann man den Pythagoras anwenden

10.5 Kräftezerlegung

Graphisch lässt sich eine Kraft, ähnlich wie bei der Zusammensetzung, in Einzelkräfte zerlegen, wenn deren Krafrichtungen (Wirklinien) bekannt sind.

Sind die Richtungen bekannt, so zieht man die Wirkungslinien durch den Kraftangriffspunkt (KAP) der zu zerlegenden Kraft und konstruiert das Parallelogramm.

F_s = Seilkraft
 F_g = Gewichtskraft

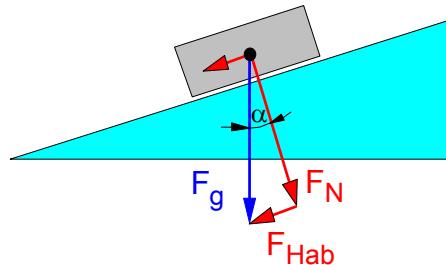


Resultierende Kraft:

$$F_{s1} = F_g - F_{s2}$$

Stehen die Einzelkräfte senkrecht aufeinander und ist der Winkel α bekannt, dann lassen sich die Einzelkräfte wie folgt berechnen.

F_{Hab} = Hangabtriebskraft
 F_N = Normalkraftkraft
 F_g = Gewichtskraft



Hangabtriebskraft:

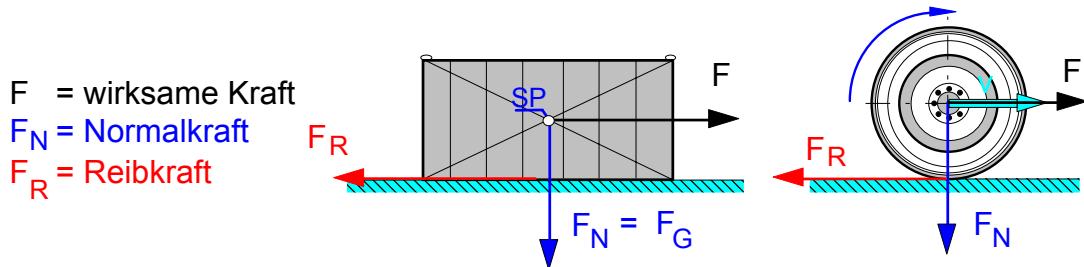
$$F_{Hab} = F_g \sin \alpha$$

Normalkraft:

$$F_N = F_g \cos \alpha$$

10.6 Reibung

Bei der Reibung muß man zwischen Haft-, Gleit- und Rollreibung unterscheiden.



Gekennzeichnet sind die Reibungskräfte durch die unterschiedlichen Reibungszahlen:

μ_{Haft} , μ_{Gleit} und μ_{Roll}

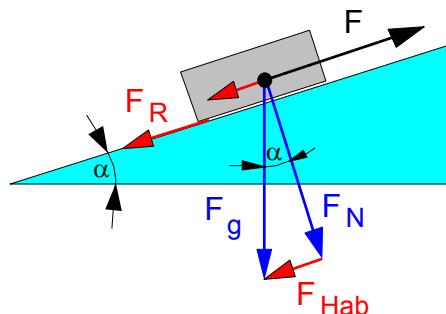
$\mu_{\text{Haft}} > \mu_{\text{Gleit}} > \mu_{\text{Roll}}$

Reibkraft:

$$F_R = \mu F_N$$

Bewegt sich ein Körper auf einer schießen Ebene, so ist die Normalkraft nicht gleich der Gewichtskraft, wie im oberen Beispiel. Sie ist abhängig von dem Neigungswinkel α .

F = wirksame Kraft
 F_g = Gewichtskraft
 F_N = Normalkraft
 F_{Hab} = Hangabtriebskraft
 F_R = Reibkraft

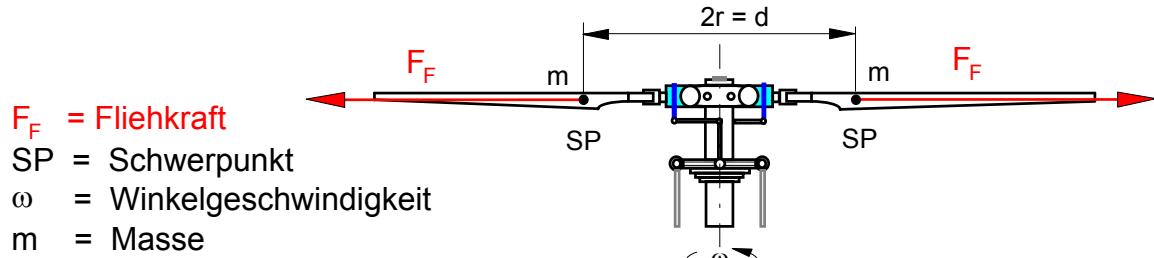


Reibkraft:

$$F_R = \mu F_g \cos \alpha$$

10.7 Fliehkraft

Die Fliehkraft ist abhängig von der Masse m im Schwerpunkt (SP) und der Radialbeschleunigung a_r (s. S. 27).



Fliehkraft:

$$F_F = m a_r$$

oder:

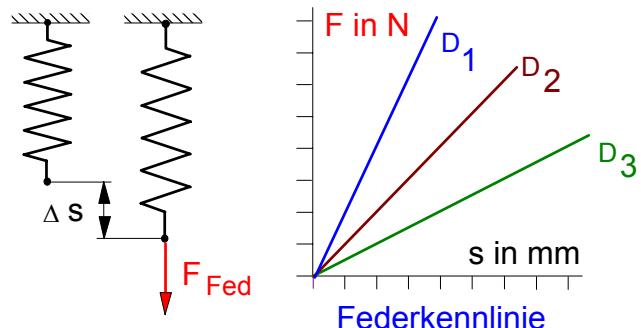
$$F_F = m \omega^2 r$$

$$F_F = m \frac{v^2}{r}$$

10.8 Federkraft

Die elastische Verlängerung der Schraubenfeder ist der wirkenden Kraft proportional.

Δs = Federweg
 D = Federkonstante
 F_{Fed} = Federkraft



Federkraft:

$$F_{\text{Fed}} = D \Delta s$$

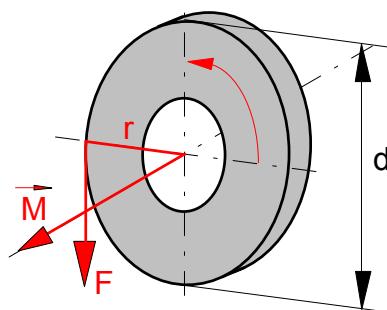
11 Drehmoment, Hebel und Auflagekräfte



11.1 Drehmoment

Bei einem Drehmoment stehen Hebelarm (r) und Wirklinie der Kraft senkrecht aufeinander.

d = Durchmesser
 r = Hebelarm
 F = Kraft
 M = Drehmoment (Vektor)



Drehmoment:

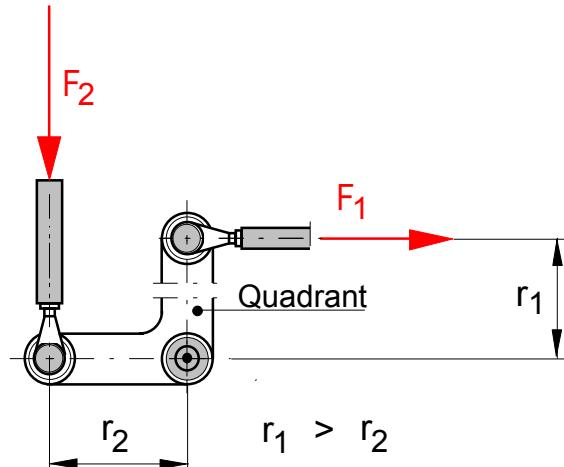
$$M = F \cdot r$$

11.2 Hebel

Hebelgesetz:

Summe aller linksdrehenden Momente = Summe aller rechtsdrehenden Momente.

$r_{1,2}$ = Hebelarme
 $F_{1,2}$ = Kräfte



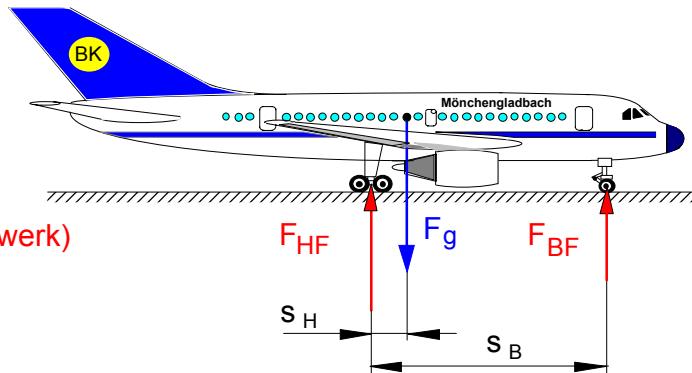
Hebelgesetz:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

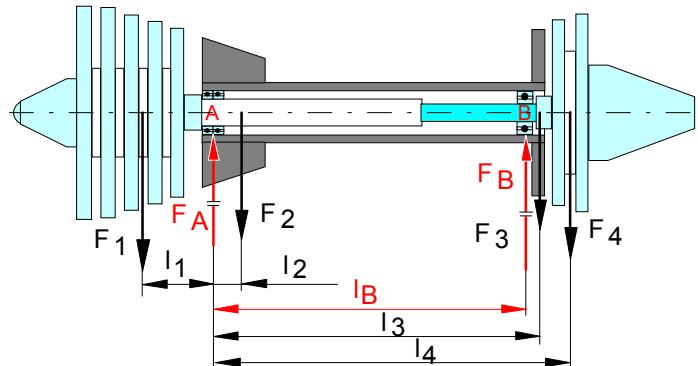
11.3 Auflagekräfte

Auflagekräfte werden mit Hilfe des Drehmomenten- und Kräftegleichgewichtes ermittelt. Der Drehpunkt kann dabei frei gewählt werden. Es empfiehlt sich jedoch ihn an einem Auflagepunkt (z.B. Hauptfahrwerk oder Wälzlager A) zu legen. Die Summe der Auflagekräfte = der Summe der übrigen Kräfte (Gewichtskräfte).

$s_{H,B}$ = Hebelarme
 F_g = Gewichtskraft
 $F_{H,B}$ = Auflagekräfte (Fahrwerk)



A, B = Lager
 $l_{1,2,\dots}$ = Hebelarme
 $F_{1,2,\dots}$ = Gewichtskräfte der Triebwerksmodule
 $F_{A,B}$ = Auflagekräfte



Kräftegleichgewichtsbedingung:

$$\sum_1^n F_{gi} = \sum_1^n F_{Auf i}$$

Momentengleichgewichtsbedingung:

$$\sum M_{re} = \sum M_{li}$$

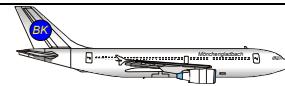
Auflagekraft Bugfahrwerk:

$$F_{BF} = \frac{F_g \cdot s_H}{s_B}$$

Auflagekraft Lager B:

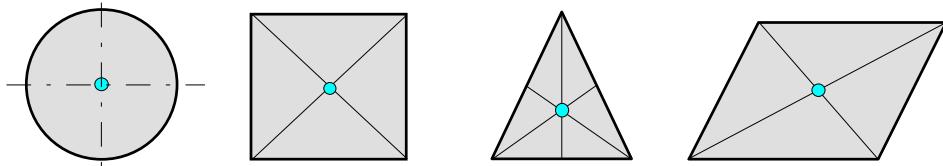
$$F_B = \frac{F_2 l_2 + F_3 l_3 + F_4 l_4 - F_1 l_1}{l_B}$$

12 Schwerpunktbestimmung



12.1 Einfache Körper

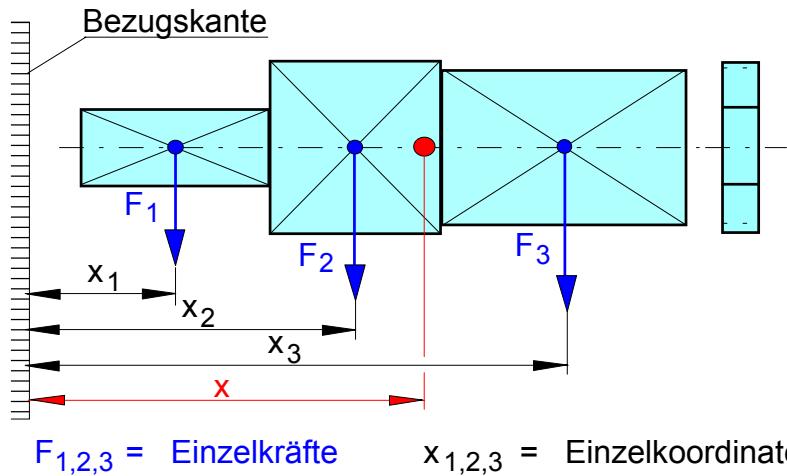
Befindet sich ein Körper im Momentengleichgewicht, so wird er in seinem Schwerpunkt gestützt bzw. gelagert.



Bei geometrisch bestimmten Figuren ist der Schwerpunkt leicht zu finden. Es bietet sich hier eine zeichnerische Lösung an,

12.2 Zusammengesetzte Körper

Zusammengesetzte Körper werden ähnlich wie bei den Auflagekräften über die Momentengleichgewichtsbedingung berechnet.



Koordinate des Schwerpunktes:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n F_{gi}}$$

oder:

$$x = \frac{F_1 x_1 + F_2 x_2 + F_3 x_3}{F_{Ges}}$$

12.3 Schwerpunkt eines Flugzeugs

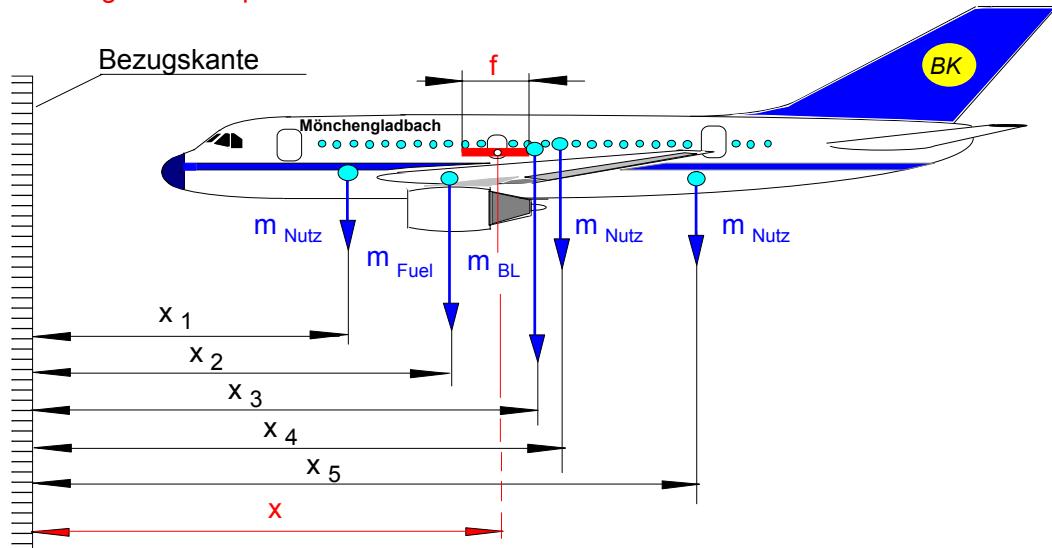
Wie im vorherigen Beispiel lässt sich auch der Schwerpunkt von Flugzeugen mit der Momentengleichgewichtsbedingung berechnen.

m_{Fuel}^{BL} = Kraftstoffmasse

m_{Nutz} = Nutzlast

$x_{1,2,\dots}$ = Koordinaten (Hebelarme)

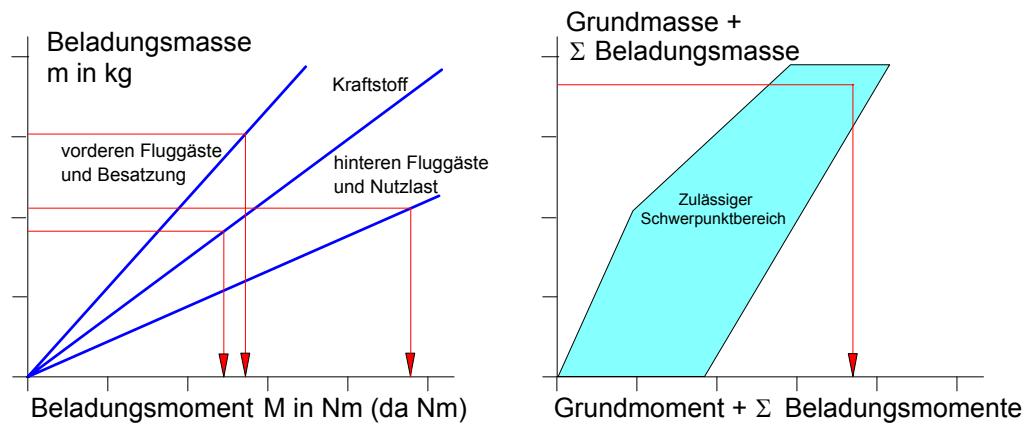
f = zulässiger Schwerpunktsbereich



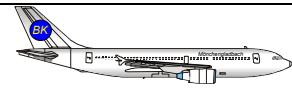
Koordinate des Schwerpunktes:

$$x = \frac{\sum (m \cdot x)}{\sum m}$$

In den meisten Flughandbüchern sind Tabellen bzw. Diagramme (Beladungsdiagramme) mit denen ebenfalls der Schwerpunkt ermittelt werden kann.



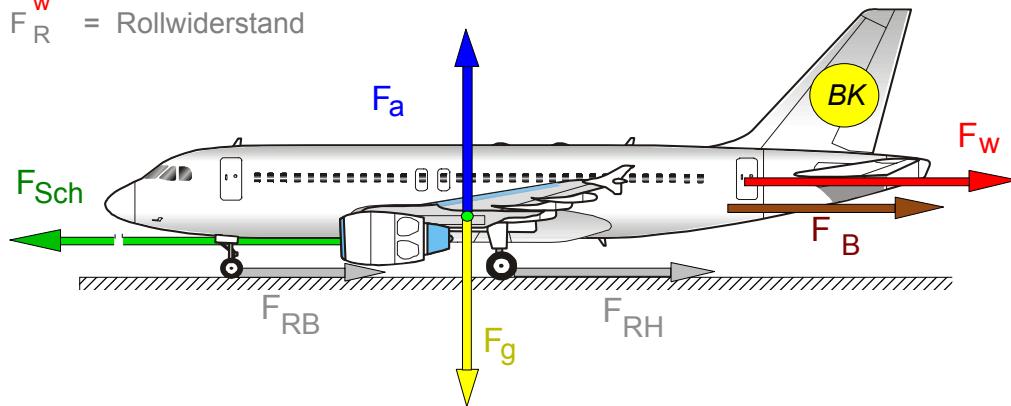
13 Kräfte am Flugzeug



13.1 Kräfte beim Start

F_{Sch} = Schubkraft
 F_B = Beschleunigungskraft
 F_w = Luftwiderstand
 F_R = Rollwiderstand

F_a = Auftriebskraft
 F_g = Gewichtskraft



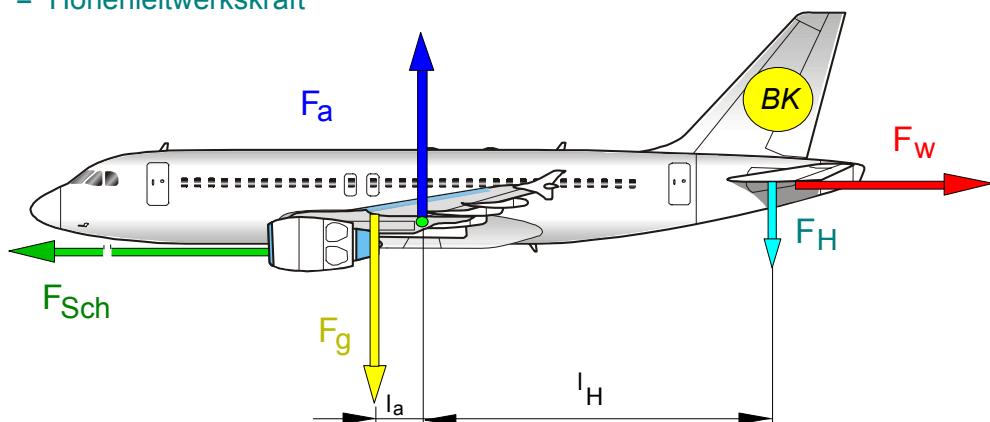
Horizontalkräfte:

$$F_{Sch} \geq F_B + F_w + F_{RH} + F_{RB}$$

13.2 Kräfte während des Fluges (Horizontalflug)

F_a = Auftriebskraft
 F_g = Gewichtskraft
 F_H = Höhenleitwerkskraft

F_{Sch} = Schubkraft
 F_w = Luftwiderstand



Vertikalkräfte:

$$F_a = F_g + F_H$$

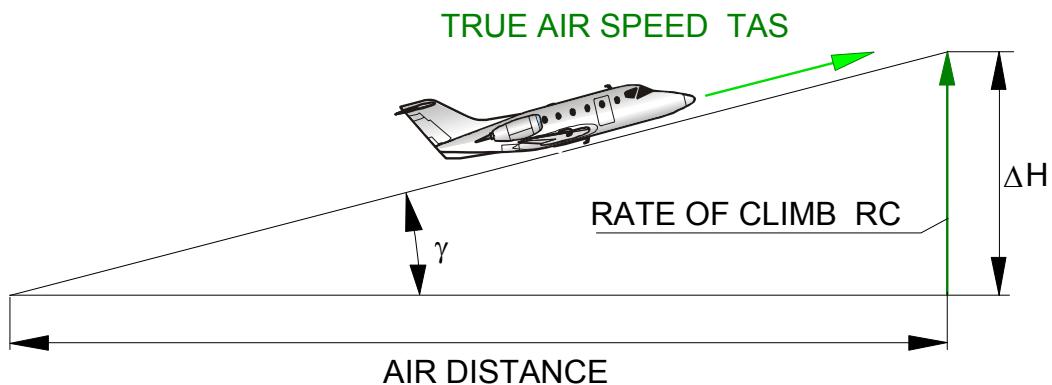
Vertikalmomente:

$$F_a \cdot I_a = F_H \cdot (I_H + I_a)$$

13.3 Flugmechanik

Begriffsbestimmung :

T = Schubkraft
L = Auftrieb
D = Luftwiderstand
A = Beschleunigung
W = Gewicht, Gewichtskraft
MTW = Maximales TO-Gewicht
n = Belastungszahl (Lastvielfache)
 γ = Steigwinkel
TAS = True Air Speed (wahre Luftgeschwindigkeit)
RC = Rate of Climb (Steiggeschwindigkeit)
H = Höhe



Schub:

$$T = D + W \sin \gamma$$

Auftrieb:

$$L = W \cdot \cos \gamma$$

Climb Gradient:

$$\tan \gamma = \frac{\Delta H}{\text{Air Distance}}$$

Climb Gradient:

$$\tan \gamma = \frac{T - D}{W}$$

Für kleine Winkel:

$$\tan \gamma \approx \sin \gamma$$

Climb Gradient:

$$\sin \gamma = \frac{T - D}{W}$$

Climb Gradient mit Beschleunigung:

$$\sin \gamma = \frac{T - D}{W} - \frac{a}{g}$$

Rate of Climb:

$$RC = \frac{\Delta H}{\text{Steigzeit}}$$

Rate of Climb mit $v = TAS$:

$$RC = v \frac{T - D}{W} - v \frac{a}{g}$$

Begriffsbestimmung :

- F_F = Fliehkraft
 β = Querneigungswinkel
 ω = Winkelgeschwindigkeit des Kurvenfluges
 v = Bahngeschwindigkeit

Lastvielfache:

$$n = \frac{L}{W}$$

Fliehkraft:

$$F_F = m r \omega^2$$

oder:

$$F_F = m \frac{v^2}{r}$$

oder:

$$F_F = W \cdot \tan \beta$$

Resultierende Kraft:

$$F_R = m \sqrt{g^2 + \frac{v^4}{r^2}}$$

oder:

$$F_R = \frac{m \cdot g}{\cos \beta}$$

bzw.:

$$F_R = \frac{W}{\cos \beta}$$

Auftriebsverlust:

$$\Delta F_a = F_R - F_a$$

oder:

$$F_R = m \left(\sqrt{g^2 + \frac{v^4}{r^2}} \right) - g$$

Lastvielfache im Kurvenflug:

$$n = \sqrt{1 + \frac{v^4}{r^2 g^2}}$$

Querneigung:

$$\tan \beta = \frac{v^2}{r \cdot g}$$

Lastvielfache im Kurvenflug:

$$n = \sqrt{1 + \tan^2 \beta}$$

14 Arbeit, Energie und Leistung



14.1 Arbeit

Die Arbeit W ist das Produkt aus Kraft und Weg. Kraft und Weg müssen dabei parallel bzw. auf einer gemeinsamen Geraden liegen.

Arbeit:

$$W = F \cdot s$$

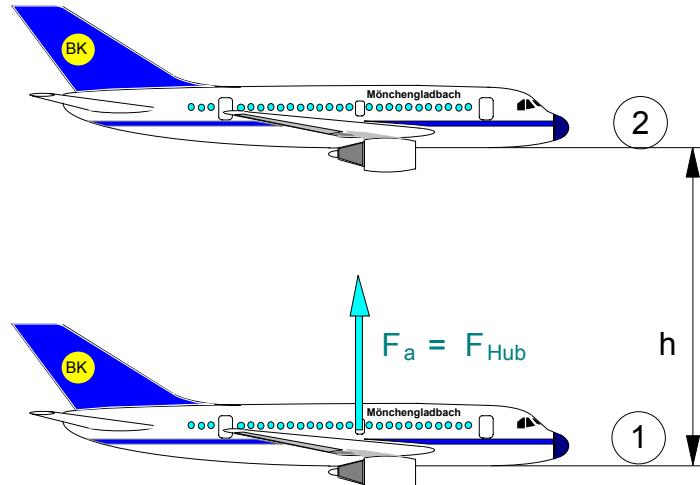
Die Einheit der Arbeit wird in J angegeben. $1J = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$

Es gibt verschiedene Formen von Arbeit. So gibt es, um nur einige zu nennen, z. B. die Hubarbeit und die Federspannarbeit.

Hubarbeit:

Das Flugzeug steigt um die Höhe h . Dabei wird Hubarbeit verrichtet.

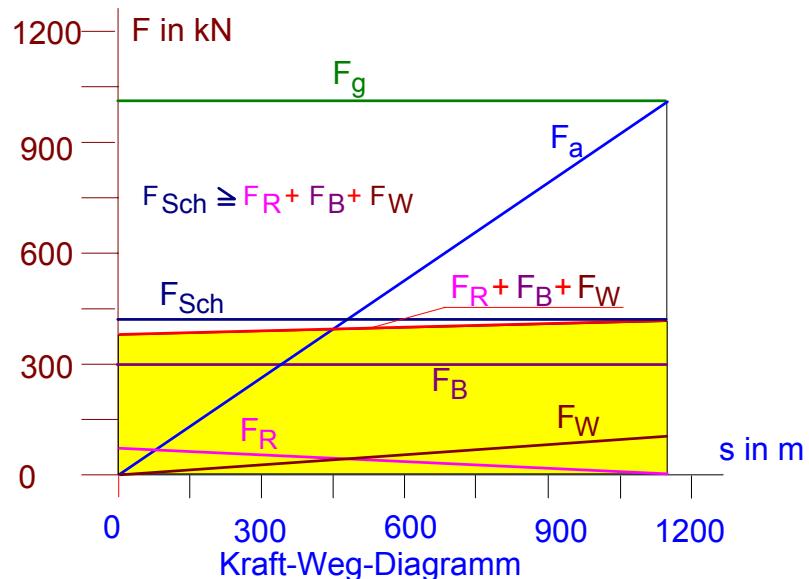
Auftriebskraft F_a = Hubkraft F_{Hub}
Höhe h = Hubweg s



Hubarbeit:

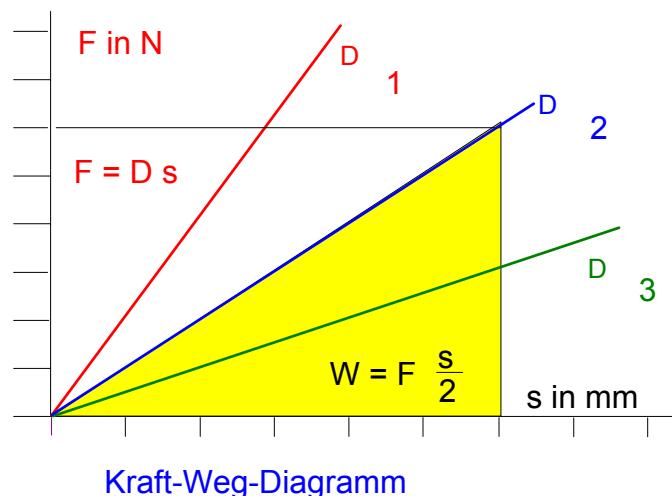
$$W = F \cdot h$$

Die Arbeit W läßt sich im Kraft-Weg-Diagramm darstellen. Im unten dargestellten Beispiel sind die Kräfte eines Flugzeuges beim Start (s. S. 38) eingezeichnet. Zur Überwindung der Kräfte F_R , F_B und F_W entlang des Weges s muß vom Triebwerk Schubarbeit W (Fläche unterhalb des Graphens $F_R + F_B + F_W$) verrichtet werden.



Federspannarbeit:

Beim Spannen einer Feder wird Federspannarbeit verrichtet.



Federspannarbeit:

$$W = D \frac{s^2}{2}$$

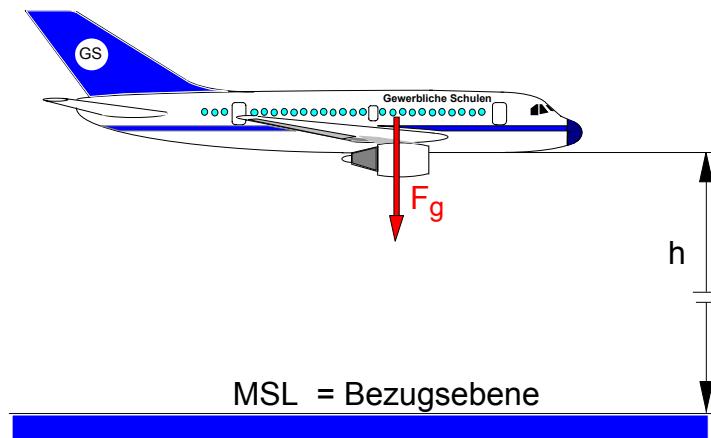
14.2 Energie

Die Arbeit ist ein zeitlich ablaufender Vorgang. Ist der Vorgang vollzogen, so wird keine Arbeit mehr verrichtet. Die Arbeit kann man also nicht speichern. Energie hingegen ist ein Zustand, der nicht abläuft. Energie lässt sich (im Prinzip unbegrenzt) speichern. Energie hat aber auch die Fähigkeit Arbeit zu verrichten (gespeicherte Arbeitsfähigkeit).

Die Einheit der Energie wird auch in J angegeben. $1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m}$

Energie kann in verschiedenen Formen auftreten und ist unter bestimmten Voraussetzungen umwandelbar. Man unterscheidet aber grundsätzlich zwischen Lageenergie (potentielle) und Bewegungsenergie (kinetische).

Potentielle Energie:



Lageenergie:

$$E_p = F_g \cdot h$$

oder:

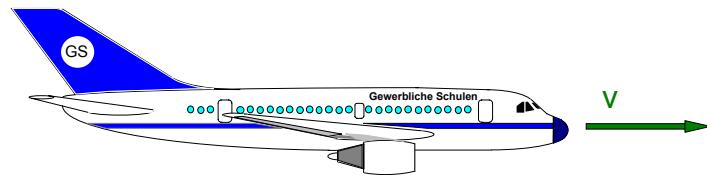
$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Man bezeichnet die Energie einer Körpermasse, bezogen auf eine bestimmte Bezugsebene als Energie der Lage bzw. als potentielle Energie.

Die vorher verrichtete Hubarbeit (s.S. 40) ist gleich der Zunahme der potentiellen Energie.

Massen die sich bewegen, besitzen Bewegungsenergie.

Kinetische Energie:



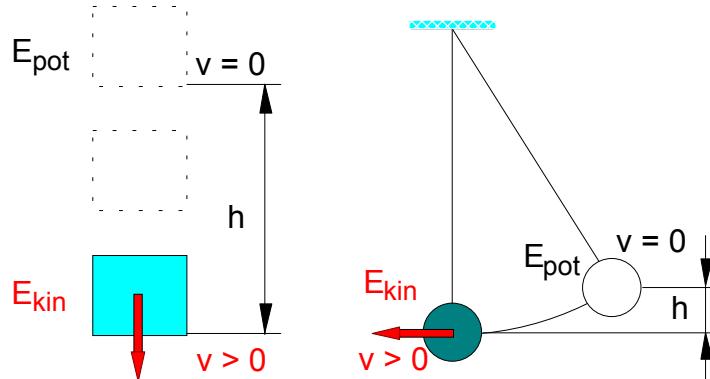
Bewegungsenergie:

$$E_k = m \frac{v^2}{2}$$

Man bezeichnet die Energie der Bewegung auch als kinetische Energie.

14.3 Energieumwandlung (Energieerhaltung)

Wie bereits erwähnt kann man unter bestimmten Voraussetzungen Energieformen umwandeln. So lässt sich z.B. potentielle Energie in kinetische Energie umwandeln. Die beiden folgenden Beispiele verdeutlichen die Umwandlung.:



Die Beispiele zeigen, daß potentielle Energie (nach Verrichten der Hubarbeit) in kinetische Energie umgewandelt wird.

Energieumwandlung:

$$m \cdot g \cdot h = m \frac{v^2}{2}$$

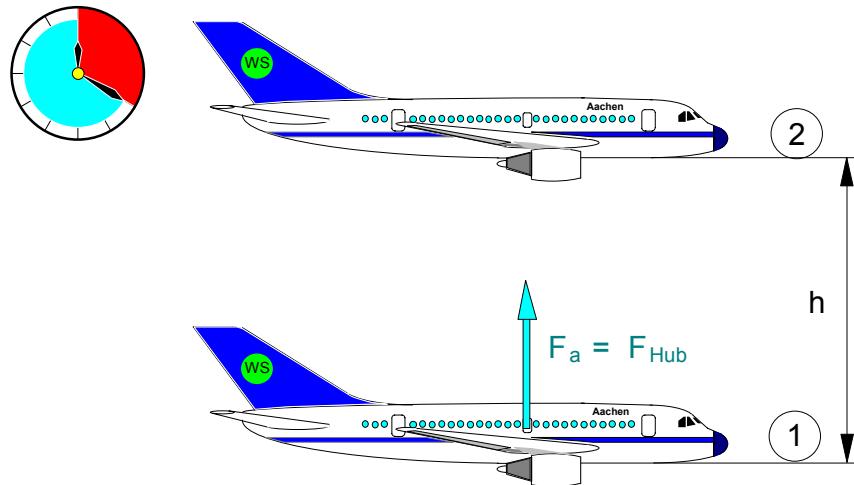
14.4 Leistung

Die Leistung P ist das Verrichten von Arbeit pro Zeiteinheit. Es ist also der Quotient aus Arbeit und Zeit. Oder:
Wenn in der Zeit t die Arbeit W verrichtet wird, errechnet sich daher die Leistung P in dieser Zeit aus der Gleichung:

Leistung:

$$P = \frac{W}{t}$$

Die Einheit der Leistung wird in **Watt** angegeben. $1W = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$



Hubleistung:

$$P = \frac{F_{Hub} h}{t}$$

Leistung als Funktion von Kraft und Geschwindigkeit:

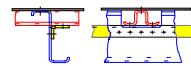
Leistung:

$$P = F \frac{s}{t}$$

oder:

$$P = F v$$

15 Festigkeit



15.1 Zugspannung, Druckspannung

Den Quotienten aus Belastung in N und Fläche in mm² bezeichnet man als Spannung.

Spannung:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Man unterscheidet zwischen Zugspannung und Druckspannung.

R_m = Bruchfestigkeit

σ = Spannung

F_D = Druckkraft

F_z = Zugkraft

A = Querschnitt

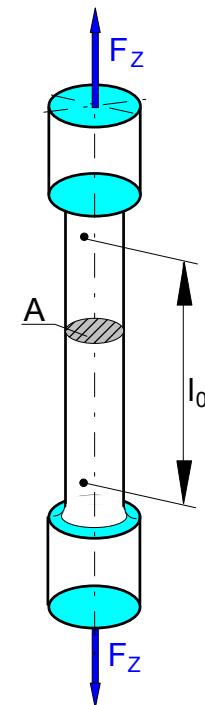
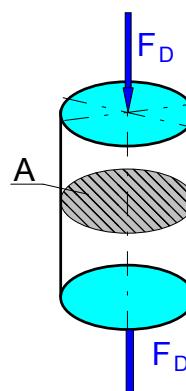
l_0 = Ausgangslänge

σ_z = Zugspannung

σ_D = Druckspannung

σ_{zul} = zulässige Spannung

ν = Sicherheitszahl



Zugspannung:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A}$$

Druckspannung:

$$\sigma_D = \frac{F_D}{A}$$

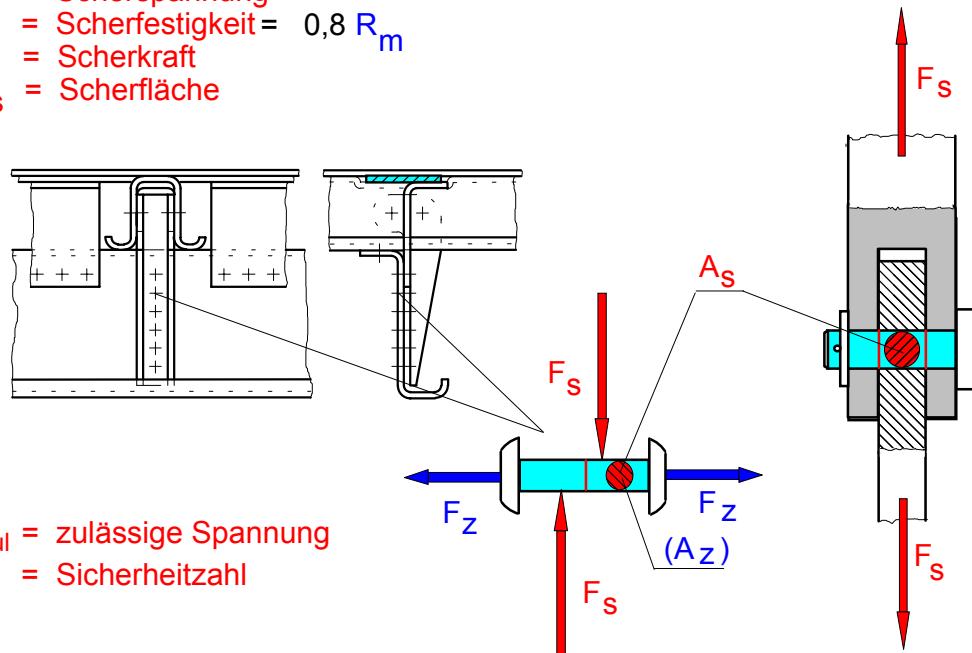
15.2 Scherspannung

Die Scherspannung wird ähnlich berechnet wie die Zug- und Druckspannung. Es ist der Quotient aus Belastung in N und Scherfläche in mm².

Scherspannung:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

τ = Scherspannung
 τ_B = Scherfestigkeit = 0,8 R_m
 F_s = Scherkraft
 A_s = Scherfläche



τ_{zul} = zulässige Spannung
 v = Sicherheitszahl

Scherspannung:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$

15.3 zulässige Spannung, Sicherheitszahl

zulässige Zugspannung:

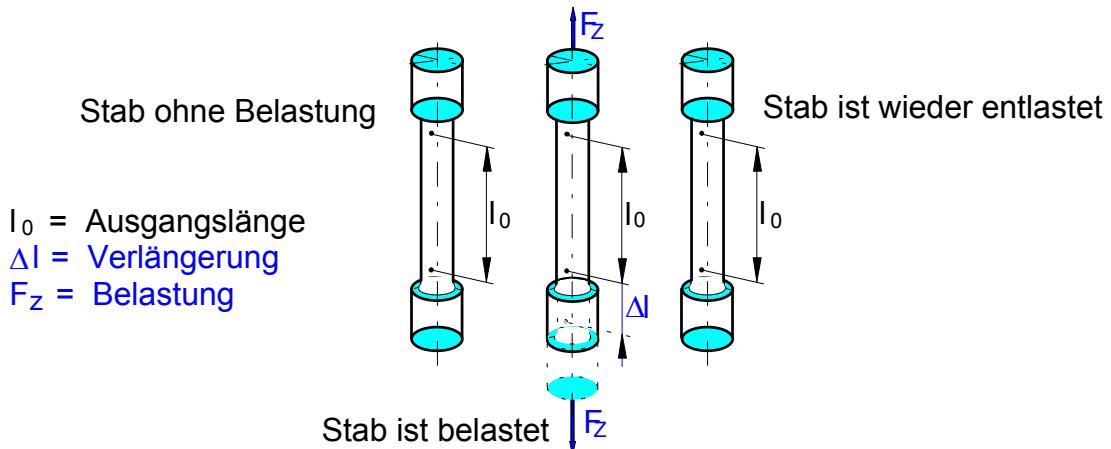
$$\sigma_{zul} = \frac{R_m}{v}$$

zulässige Scherspannung:

$$\tau_{zul} = \frac{\tau_B}{v}$$

15.4 Dehnung, Elastizität

Feste Körper verhalten sich ähnlich wie Federn. Werden sie elastisch verformt, so erhalten sie nach der Entlastung wieder ihre ursprüngliche Form.



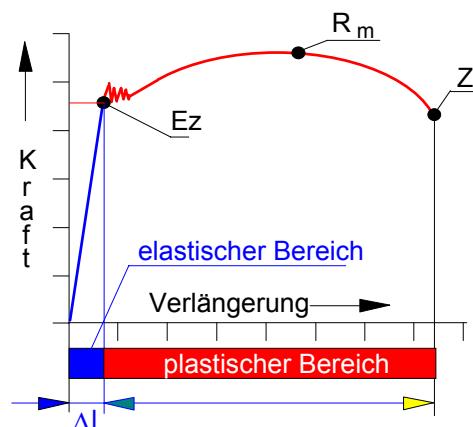
Als Dehnung bezeichnet man den Quotient aus Verlängerung durch Ausgangslänge.

Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Zwischen Belastung (Spannung) und Verlängerung (Dehnung) gilt folgende Beziehung:
Die elastische Dehnung ist der vorhandenen Spannung proportional.

E_z = Elastizitätsgrenze
 R_m = Bruchgrenze
 Z = Zerreißgrenze
 E = Elastizitätsmodul (Proportionalitätsfaktor)



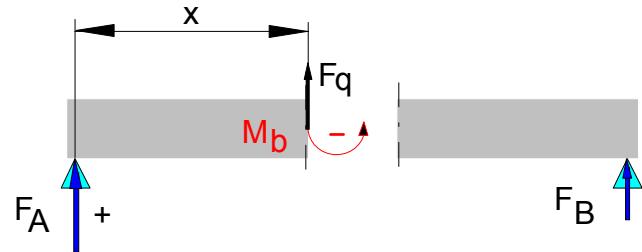
Spannung:

$$\sigma = E \varepsilon$$

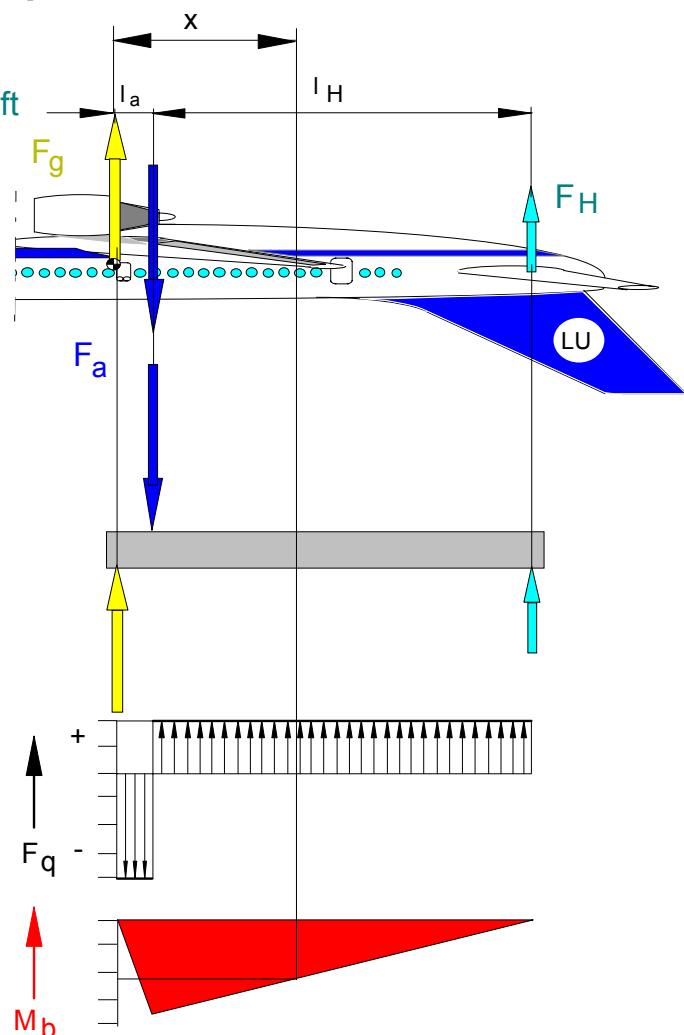
15.5 Biegemoment

Das Biegemoment M_b ist das im Bauteil (Rumpf,...) auftretende Moment, welches den angreifenden äußereren Drehmomenten das Gleichgewicht hält.

M_b = Biegemoment
 F_q = Querkraft



F_H = Höhenleitwerkskraft
 F_a = Auftriebskraft
 F_g = Gewichtskraft



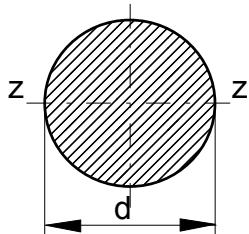
Biegemoment:

$$M_b = - (M_g + M_H + \dots)$$

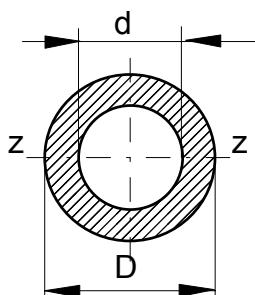
15.6 Widerstandsmoment

Welches Biegemoment $M_b = \sum M_i$ von den inneren Kräften aufgebracht werden kann, hängt vom Werkstoff des Balkens und von seinem Widerstandsmoment ab.

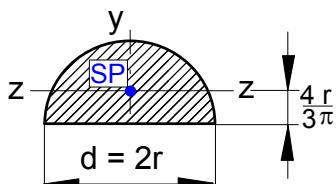
Biegewiderstandsmomente:



$$W_b = \frac{\pi d^3}{32}$$

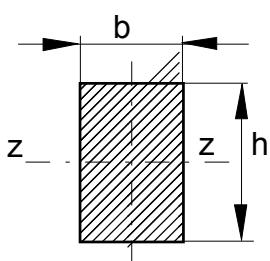


$$W_b = \frac{D^4 - d^4}{10 D}$$

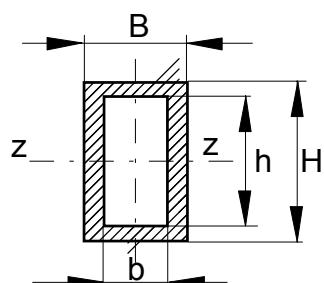


$$W_{yb} = \frac{\pi r^3}{8}$$

$$W_{zb} = 0,1902 r^3$$



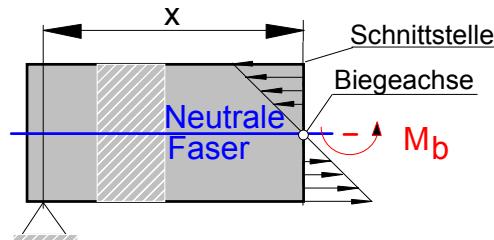
$$W_b = \frac{b h^2}{6}$$



$$W_b = \frac{B H^3 - b h^3}{6 H}$$

15.7 Biegespannung (Randfaserspannung)

Die Biegespannung bzw. Randfaserspannung ist der Quotient aus dem Biegemoment und dem Widerstandsmoment.



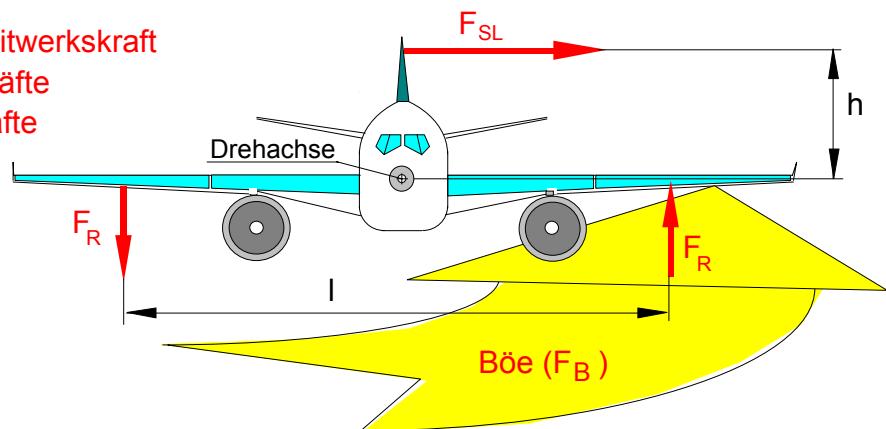
Biegespannung:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

15.8 Torsionsspannung (Verdrehspannung)

Torsionsspannung am Rumpf können u.a. durch Böen, Ruder- und Leitwerkskräfte verursacht werden.

$$\begin{aligned} F_{SL} &= \text{Seitenleitwerkskraft} \\ F_R &= \text{Ruderkräfte} \\ F_B &= \text{Böenkräfte} \end{aligned}$$



Torsionsspannung:

$$\sigma_{Tor} = \frac{M_{Tor}}{W_{pol}}$$

Torsionsmoment durch Querruder:

$$M_{Tor} = F_R \cdot I$$

polares Widerstandsmoment:

$$W_{pol} = \pi \frac{D^4 - d^4}{16 D}$$

15.9 Kesselspannung

Kesselspannung am Rumpf tritt durch den Differenzdruck zwischen Kabine und Atmosphäre auf.

$$\text{Druckfläche } A_l = D \cdot l$$

$$\text{Druckfläche } A_q = D^2 \frac{\pi}{4}$$

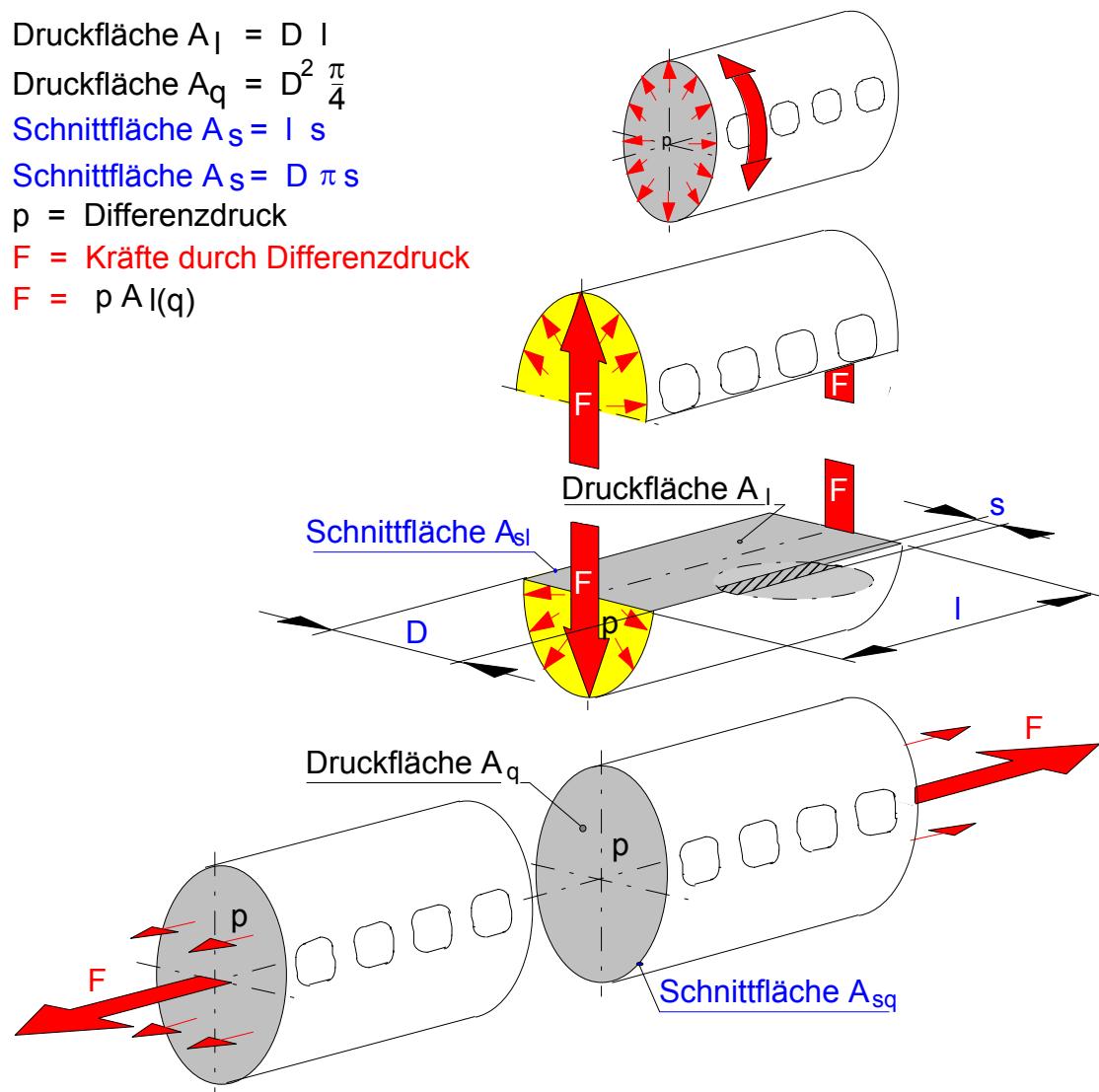
$$\text{Schnittfläche } A_s = l \cdot s$$

$$\text{Schnittfläche } A_s = D \cdot \pi \cdot s$$

p = Differenzdruck

F = Kräfte durch Differenzdruck

$$F = p \cdot A_l \cdot l(q)$$



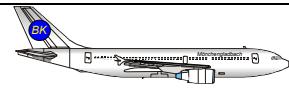
Kesselspannung L:

$$\sigma_L = p \frac{D}{2s}$$

Kesselspannung Q:

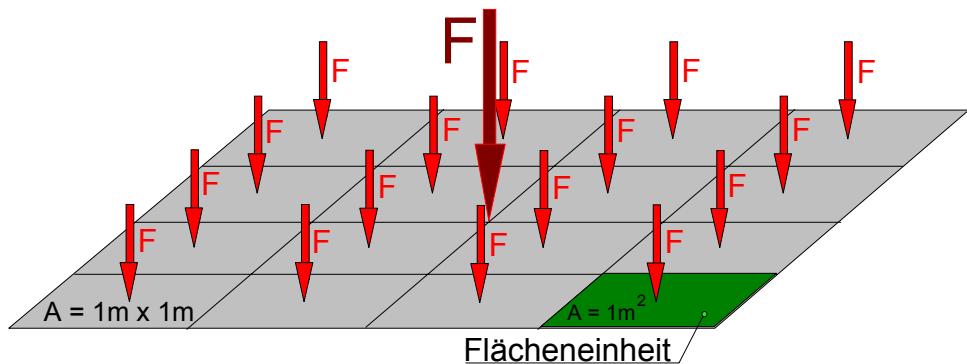
$$\sigma_Q = p \frac{D}{4s}$$

16 Druck, Hydrostatik



16.1 Kraft, Fläche und Druck

Druck ist der Quotient aus Kraft und Fläche. D.h. die Gesamtkraft ist auf eine Flächeneinheit bezogen.

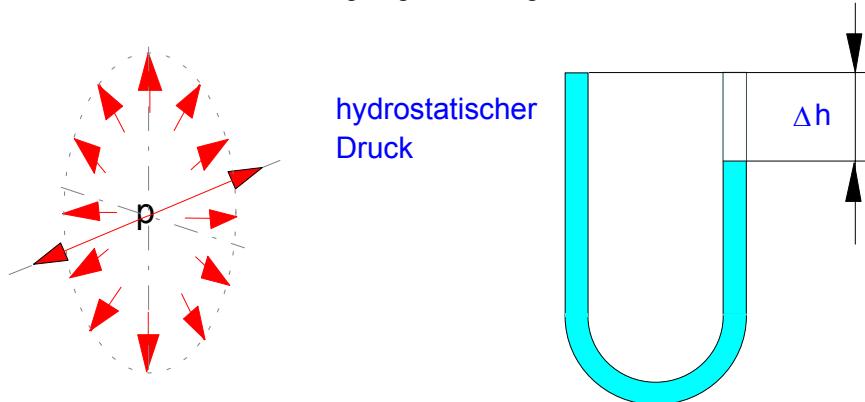


Druck:

$$p = \frac{F}{A}$$

Druckeinheit: $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Der Druck ist eine skalare Größe und ist damit nicht richtungsgebunden. Er breitet sich in alle Richtungen gleichmäßig aus.



Der hydrostatische Druck ist von der Höhendifferenz Δh abhängig.

hydrostatischer Druck:

$$p = \rho g \Delta h$$

16.2 Kraft, Wandler

Kraft:

Kraft:

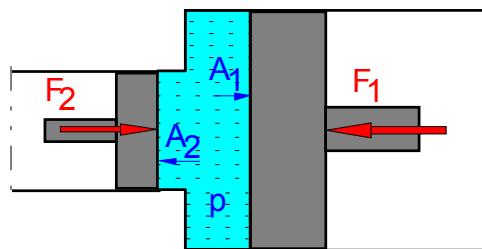
$$F = p \cdot A$$

Kraftwandler

$F_{1/2}$ = Kräfte

$A_{1/2}$ = Flächen

p = Druck



Kräfteverhältnis:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

oder:

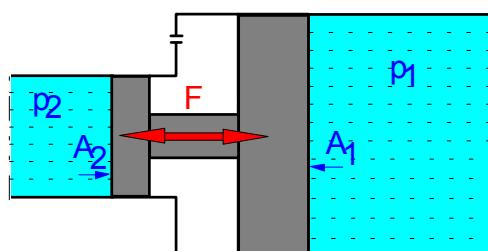
$$F_1 \cdot A_2 = F_2 \cdot A_1$$

Druckwandler

$p_{1/2}$ = Drücke

$A_{1/2}$ = Flächen

F = Kraft



Druckverhältnis:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

oder:

$$p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2$$

17 Hydrodynamik



17.1 Ausfluß aus Gefäßen

Volumenstrom durch Bodenöffnung:

Q = Volumenstrom

A = Öffnungsquerschnitt

h = Spiegelhöhe der Flüssigkeit

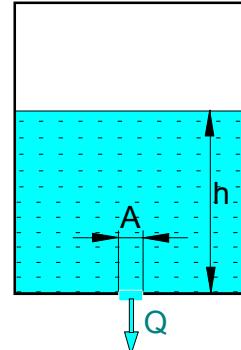
g = Erdbeschleunigung

μ = Kontraktionszahl

Kontraktionszahl für:

gut abgerundete Düsen $\mu = 0,97$

scharfkantige Düsen $\mu = 0,62$



Volumenstrom:

$$Q = A \mu \sqrt{2gh}$$

Bodenausflußgeschwindigkeit:

$$v = \mu \sqrt{2gh}$$

Volumenstrom durch Seitenöffnung:

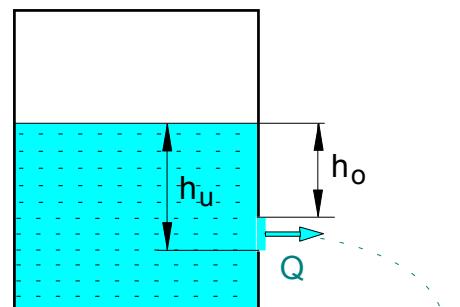
Q = Volumenstrom

b = Breite der Ausflußöffnung

h_u = Abstand Fluidspiegel bis untere Kante der Ausflußöffnung

h_o = Abstand Fluidspiegel bis obere Kante der Ausflußöffnung

h_m = Abstand Fluidspiegel bis Mitte der Ausflußöffnung



Volumenstrom:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b (h_u \sqrt{2gh_u} - h_o \sqrt{2gh_o})$$

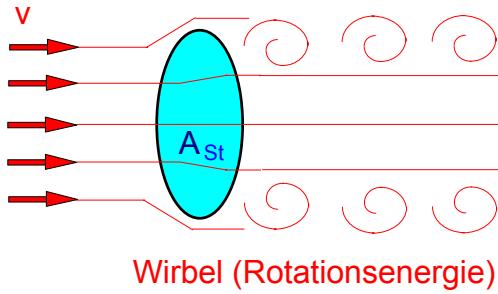
Volumenstrom (kleine Öffnung):

$$Q = A \mu \sqrt{2gh_m}$$

17.2 Strömungen

Turbulente Strömung

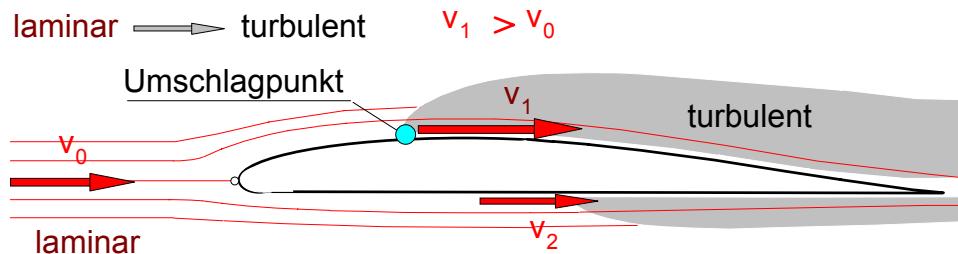
V = Anströmgeschwindigkeit
 A_{st} = Stirnfläche
 c_w = Widerstandsbeiwert
 ρ = Dichte



Für turbulente Strömung wird folgende Formel verwendet:

Strömungswiderstand:

$$F_w = c_w \frac{1}{2} \rho V^2 A_{st}$$



Die Grenze (bzw. Übergang) zwischen laminarer und turbulenter Strömung wird durch die Reynoldssche Zahl Re_{krit} bestimmt.

Reynoldssche Zahl:

$$Re = \frac{l \cdot V \cdot \rho}{\eta}$$

Die Reynoldssche Zahl ist u.a. von der Geschwindigkeit (v = variabel) abhängig. Die anderen Größen sind m.o.w. konstant.

Im oberen Beispiel (Profil) ist bis zum Umschlagpunkt die Geschwindigkeit verhältnismäßig klein. Die Strömung ist laminar ($Re < Re_{krit}$). Zur Berechnung der Reibung kann die Formel $F_{ri} = \eta A v/d$ verwendet werden.

Ab dem Umschlagpunkt ist die Geschwindigkeit groß. Die Strömung ist turbulent ($Re > Re_{krit}$). Zur Widerstandsberechnung muß die Formel

$$F_w = c_w 1/2 \rho V^2 A$$

verwendet werden. Für das obere Profil (Luft) liegt die kritische Reynoldszahl bei: $Re_{krit} = 5 \cdot 10^5$.

17.3 dynamische und kinematische Viskosität

Die Viskosität oder Zähigkeit ist eine wichtige Materialkonstante. Sie ändert sich mit der Temperatur.

dynamische Viskosität:

F_{RI} = innere Reibkraft, v = Geschwindigkeit,

A = Fläche des Körpers, d = Grenzschichtdicke

dynamische Viskosität:

$$\eta = \frac{F_{RI} d}{A v}$$

kinematische Viskosität:

ρ = Dichte

kinematische Viskosität:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Stoffe und Temperatur	kinematische Zähigkeit in $\frac{m^2}{s}$ bei Normalluftdruck	Stoffe und Temperatur	kinematische Zähigkeit in $\frac{m^2}{s}$ bei Normalluftdruck
Ethanol bei 20 °C	$1,5 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 10 °C	$800 \cdot 10^{-6}$
Benzol bei 20 °C	$0,74 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 20 °C	$380 \cdot 10^{-6}$
Glycerin bei 20 °C	$850 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 50 °C	$80 \cdot 10^{-6}$
Wasser bei 0 °C	$1,79 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 80 °C	$20 \cdot 10^{-6}$
Wasser bei 20 °C	$1,01 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 100°C	$10 \cdot 10^{-6}$
Wasser bei 100 °C	$0,28 \cdot 10^{-6}$	Motorenöl bei 120°C	$3 \cdot 10^{-6}$
Luft bei 0 °C	$13,2 \cdot 10^{-5}$	Motorenöl bei 150°C	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Luft bei 20 °C	$16,9 \cdot 10^{-5}$		
Luft bei 100 °C	$181 \cdot 10^{-6}$		
Sauerstoff bei 20 °C	$18 \cdot 10^{-6}$		

kinematische Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur

Umrechnung: $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1 \text{ Zentistokes} = 1 \text{ cSt} = 0,01 \text{ St}$

18 Aerostatik



18.1 Atmosphäre

Internationale Standard Atmosphäre ISA:

In der ISA wurden die atmosphärischen Verhältnisse festgelegt, welche etwa in einer geographischen Breite von 45° in Meereshöhe (MSL) herschen.

Dabei wurden drei Werte wie folgt definiert:

Temperatur ϑ : 15° C

Dichte ρ : 1,225 Kg/m³

Luftdruck p : 1013,25 hPa

Der Luftdruck entspricht der Gewichtskraft der Luftsäule bezogen auf ihre Grundfläche.

Da die Luftsäule über der Grundfläche mit zunehmender Höhe immer kürzer wird, muß auch der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnehmen.

Für die folgenden Berechnungen ist die Höhe H in km einzusetzen.

Der Luftdruck nimmt nach folgender Funktion ab:

Luftdruck:

$$p = 1013,25 \cdot (1 - 0,0226 \cdot H)^{5,25}$$

Der Luftdruck der Atmosphäre ist relativ geringen Schwankungen unterworfen. Sie liegt bei 5 % vom Mittelwert.

Nach einer ähnlichen Funktion nimmt die Dichte ab:

Dichte:

$$\rho = 1,225 \cdot (1 - 0,0226 \cdot H)^{4,25}$$

Die Dichte der Atmosphäre schwankt um ca. 20 % um den Mittelwert.

Die Temperatur nimmt bis zur Tropopause nach ISA $6,5^{\circ}$ pro 1000 m linear ab und bleibt ab 11 km mit $-56,5^{\circ}$ konstant.

Die Temperatur nimmt bei 0% Luftfeuchtigkeit nach folgender Funktion ab:

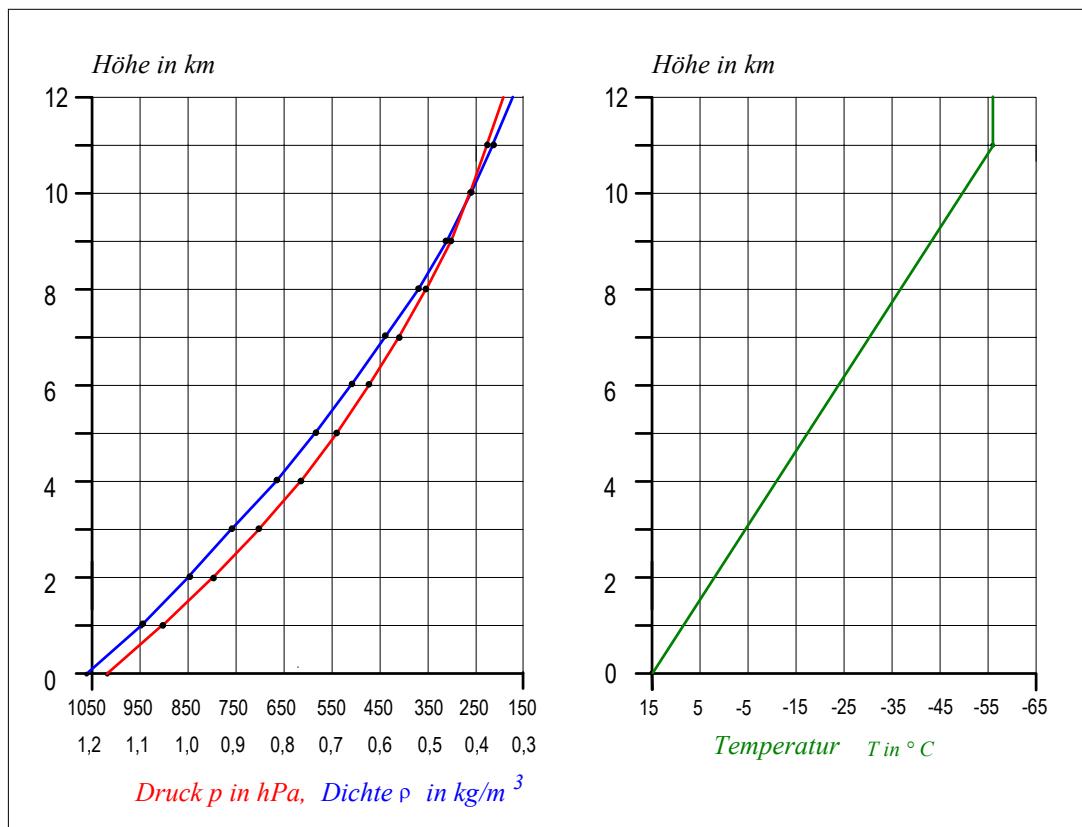
Temperatur (trocken):

$$T = 15^{\circ}\text{C} - 6,5 \cdot H$$

Die Temperatur ist großen Schwankungen in der Atmosphäre unterworfen.

Die Werte der verschiedenen Größen können entweder nach den obigen Formeln errechnet, Zahlentafeln entnommen oder in Diagrammen (s.u.) abgelesen werden.

ICAO - Normalatmosphäre mit standardisierten Werten

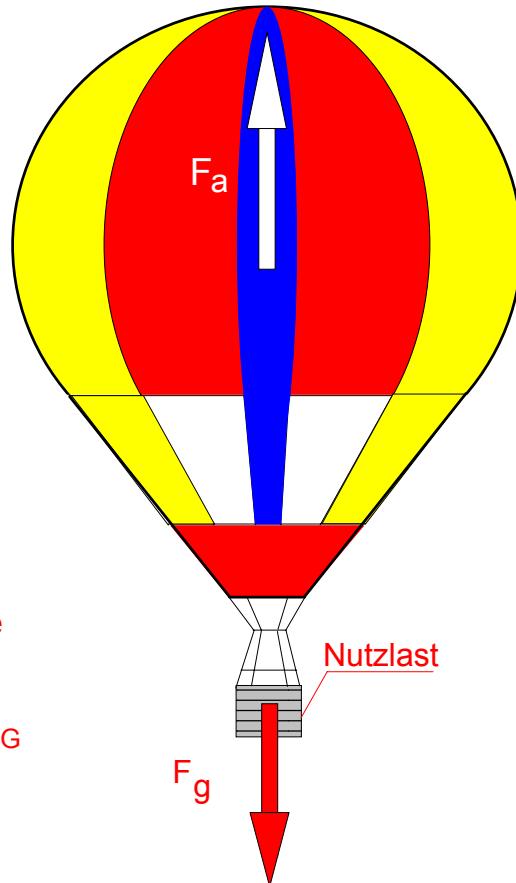


18.2 Auftrieb

Statischer Auftrieb:

Jeder eingetauchte Körper (in Gas oder Flüssigkeit) erfährt eine nach oben gerichtete Auftriebskraft, die ebenso groß ist wie die Gewichtskraft der von ihm verdrängten Gas- oder Flüssigkeitsmenge.

m_{VL} = Masse der verdrängten Luft



schwebt:

$$F_a = F_g$$

steigt:

$$F_a > F_g$$

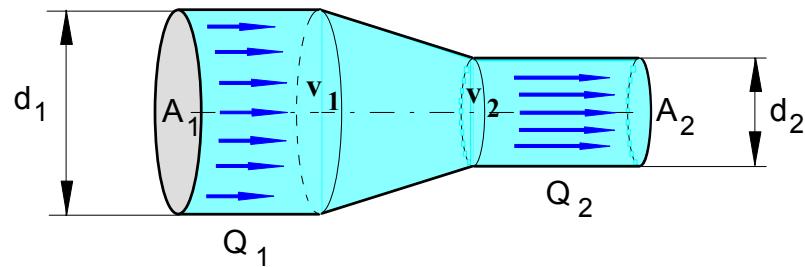
19 Aerodynamik



19.1 Kontinuitätsgleichung

Bei Flüssigkeiten oder Gasen sind die durch verschiedene Querschnitte einer Leitung je Zeiteinheit durchtretenden Volumen gleich.

v = Geschwindigkeiten A = Querschnitte Q = Volumenströme



19.2 Bernoullische Gleichung

Gesamtdruck:

$$p_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_0$$

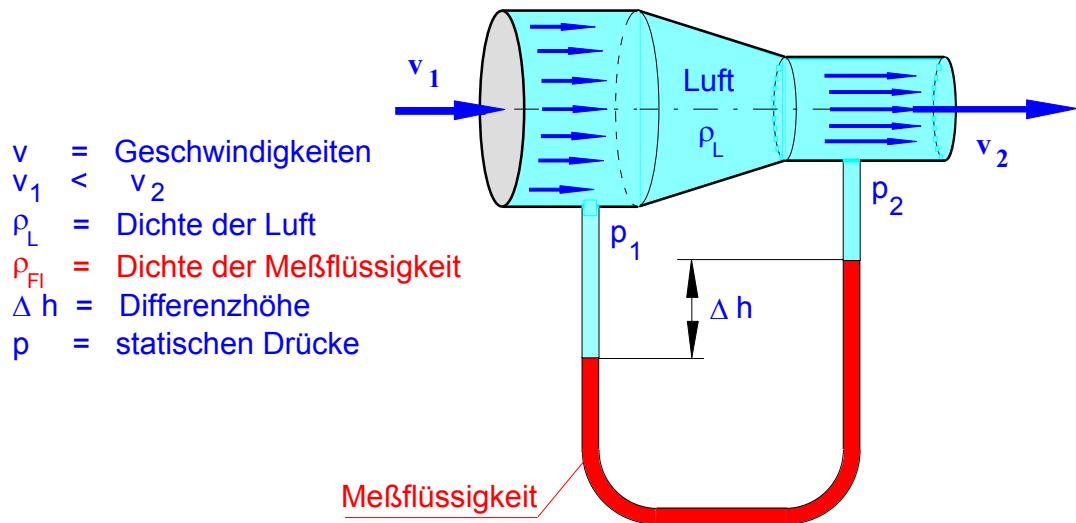
oder:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p_0 = \text{konstant}$$

oder:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2$$

Differenz der statischen Drücke:



Differenzdruck:

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Differenzdruck:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

hydrostatischer Druck:

$$\Delta p = \rho_{\text{Fl}} g \Delta h$$

Durchflußgeschwindigkeit v_1 :

Durchflußgeschwindigkeit:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_L \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}}$$

19.3 Machzahl

Die Machzahl (M) zeigt das Verhältnis der Fluggeschwindigkeit v zur Schallgeschwindigkeit a :

Machzahl:

$$M = \frac{v}{a}$$

Berechnung der Schallgeschwindigkeit a :

κ = Adiabatenexponent (für Luft $\kappa = 1,4$)
 R = Gaskonstante (für Luft $R = 287 \text{ J/kg K}$)
 T = absolute Temperatur (in K)

Schallgeschwindigkeit:

$$a = \sqrt{\kappa R T}$$

oder

$$a = 20,1 \sqrt{T}$$

19.4 Korrektur der Bernoullischen Gleichung

Die Änderung der Dichte infolge der Änderung des dynamischen Druckes, die sogenannte Kompressibilität, macht es erforderlich die Bernoullische Gleichung (ab etwa $v = 100 \text{ m/s}$) zu korrigieren:

Gesamtdruck (korrigiert):

$$p_{\text{ges}} = p_0 + q + \Delta q$$

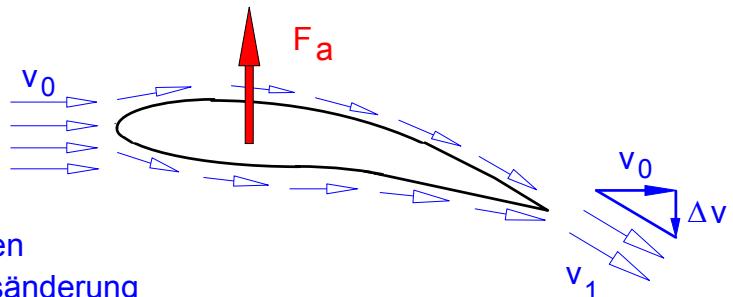
oder

$$p_{\text{ges}} = p_0 + q \left[1 + \frac{1}{4} M^2 \right]$$

19.5 Auftrieb

Beim Tragflügel kann Auftrieb nur dann entstehen, wenn in Vertikalrichtung eine Impulsstromänderung (Δv) auftritt. Um eine solche hervorzurufen, muß der Tragflügel Luft nach unten ablenken. Der Flügel ist also gezwungen, um sein eigenes Fallen zu verhindern, an seiner Stelle Luft nach unten zu leiten.

F_a = Auftriebskraft



v = Geschwindigkeiten

Δv = Geschwindigkeitsänderung

Q = Volumenstrom

ρ_L = Dichte der Luft

c_a = Auftriebsbeiwert

A = Auftriebsfläche

dynamischer Auftrieb:

$$F_a = Q \rho \Delta v$$

oder:

$$F_a = c_a \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

19.5 Kräfteverteilung

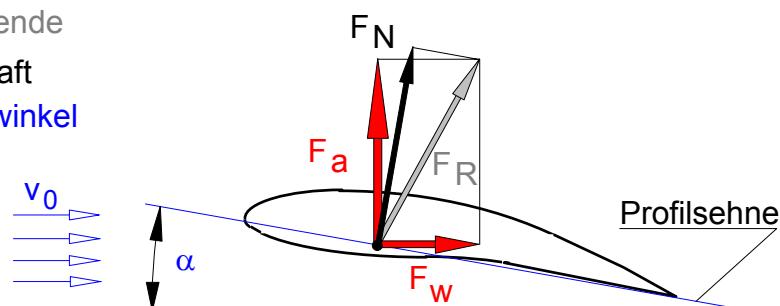
F_a = Auftriebskraft

F_w = Widerstandskraft

F_R = Resultierende

F_N = Normalkraft

α = Anströmwinkel

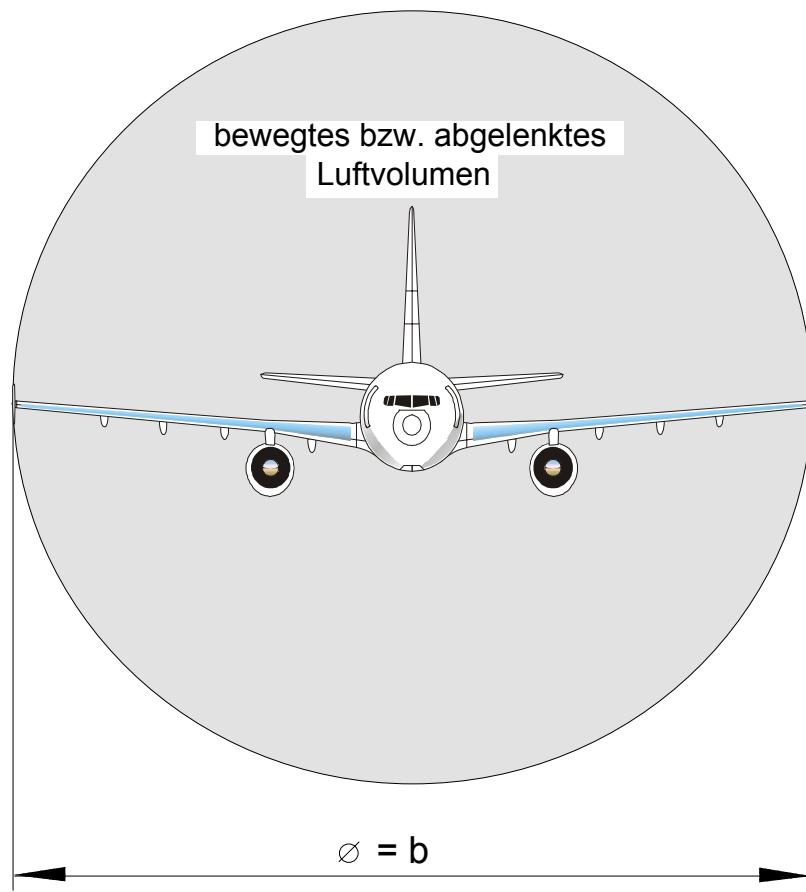


19.6 Luftvolumenstrom

Ablenkung und sekundlich abgelenktes Luftvolumen:

Das sekundlich durch den Tragflügel verarbeitete Luftvolumen Q kann auf Grund folgender vereinfachten (idealisiert) Annahme bestimmt werden:

Man betrachtet die vom Flügel beeinflußte Luft scharf begrenzt durch einen über die Spannweite b errichteten Kreisquerschnitt und rechnet mit einer über den ganzen Querschnitt konstante Ablenkung. In Wirklichkeit ist die Ablenkung an der Flügelwurzel am größten und klingt mit zunehmender Entfernung ab.



Ablenkung:

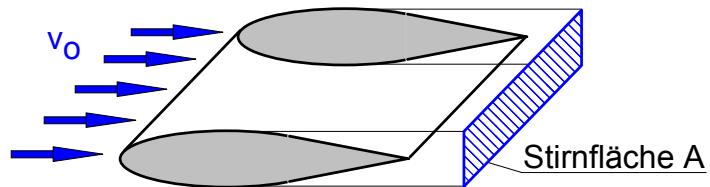
$$\Delta v = \frac{2}{\pi} c_a v_o \lambda$$

abgelenktes Luftvolumen:

$$Q = \frac{\pi}{4} b^2 v$$

19.7 Widerstand

Während im luftleeren Raum alle Körper unter Einfluß der Schwerkraft gleich schnell und gleichmäßig beschleunigt fallen, trifft dies im Luftraum nicht zu. Diese gegen die Bewegungsrichtung gerichtete Kraft ist der Luftwiderstand. Bis auf den Reibungswiderstand sind alle anderen Widerstandskräfte Druckkräfte.



Maßgebend für die Widerstandskraft ist die Stirnfläche A und der dynamische Druck q . Hinzu kommt noch der Widerstandsbeiwert c_w . Er beinhaltet u.a. die Widerstandsart, er gibt also an, um welchen Widerstand es sich handelt.

Folgende Widerstände werden unterschieden:

Reibungswiderstand F_R

Formwiderstand F_F

Induzierter Widerstand F_I

Interferenzwiderstand F_{In}

Schockwellenwiderstand F_S

Nicht jeder Widerstand läßt sich einfach berechnen, so z.B. der Schockwellenwiderstand im Überschallbereich.

Die berechenbaren Widerstände werden mit folgender Gleichung berechnet:

Widerstand:

$$F_w = c_w \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

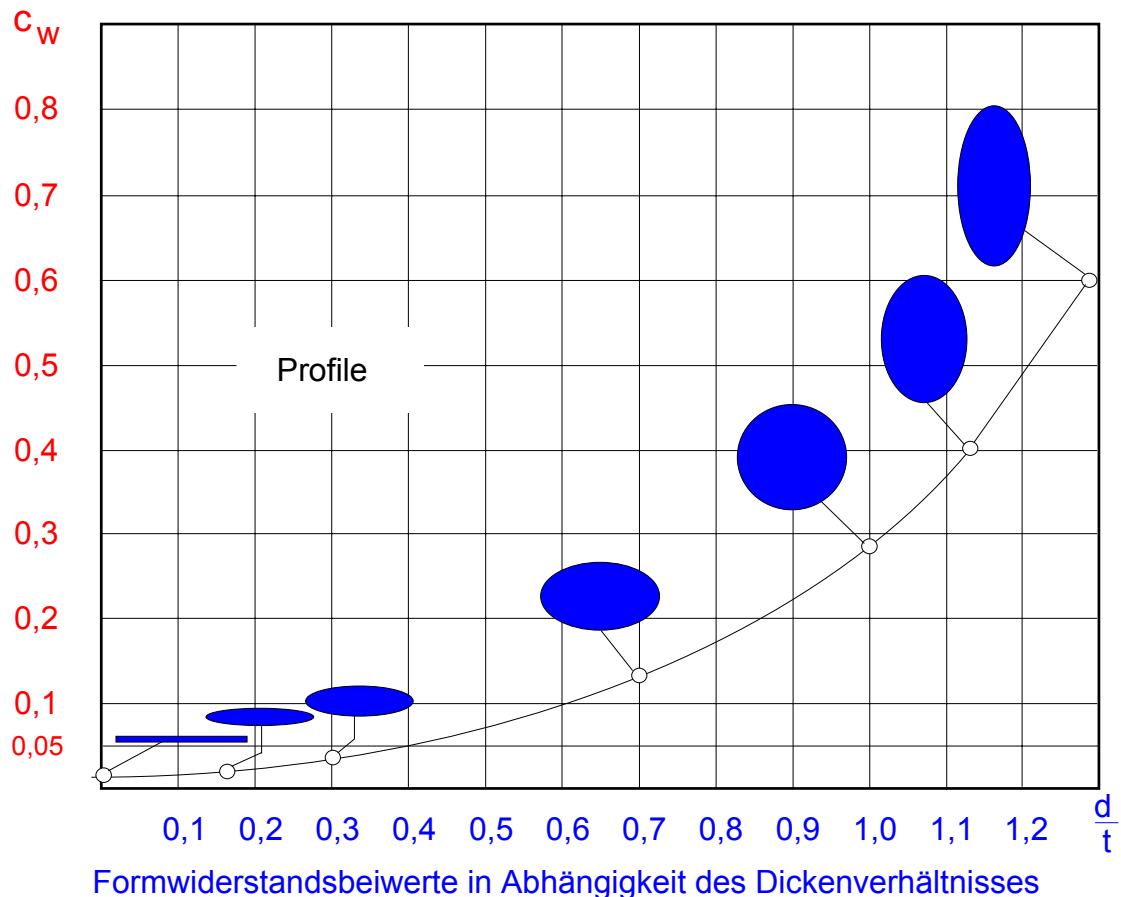
Das gilt für turbulente Stömungszustände.

Laminare Strömung (Reibungswiderstand) wird berechnet: s. K. 17.5 (S. 75)

19.8 Widerstandsbeiwerte

Formwiderstand:

Der Formwiderstandsbeiwert kann, sofern das Dickenverhältnis bekannt ist, dem Diagramm entnommen werden.



Induzierter Widerstand:

Der Widerstandsbeiwert des induzierten Widerstandes kann wie folgt berechnet werden:

Beiwert des induzierten Widerstandes:

$$C_{w_i} = \frac{C_a^2}{\pi} \lambda$$

19.9 Reynoldszahl (Kutter)

Widerstandsbeiwert laminar:

$$c_{f\text{ lam}} = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}$$

Widerstandsbeiwert turbulent:

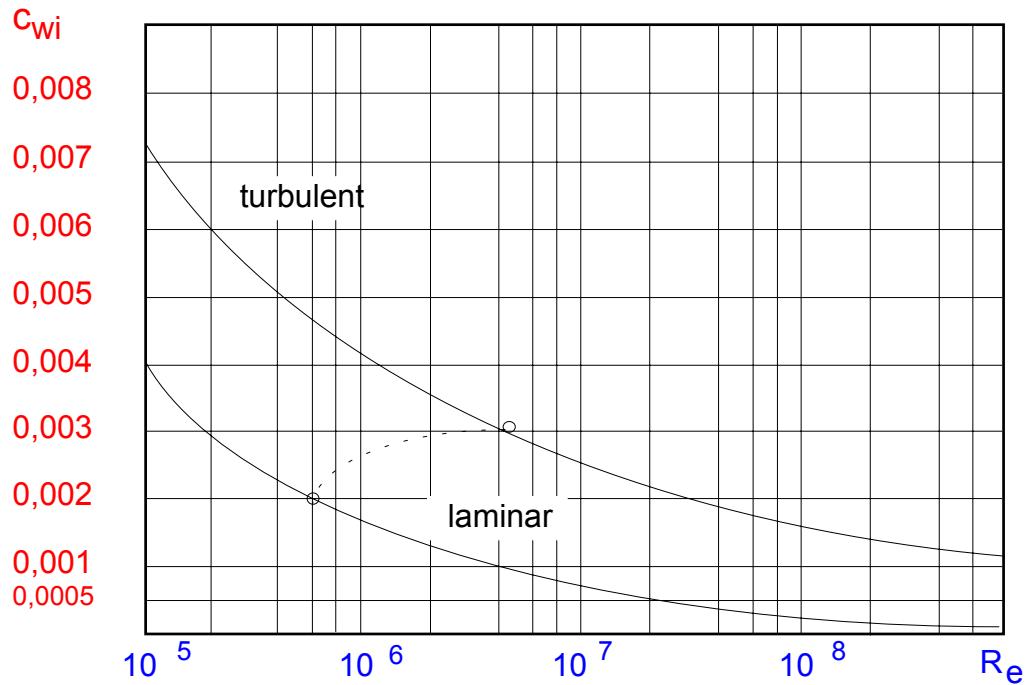
$$c_{f\text{ tu}} = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}}$$

Widerstandsbeiwert Übergang:
($Re_{xu} = 3 \cdot 10^6$)

$$c_f = c_{f\text{ tu}} - \frac{8700}{Re}$$

19.10 Widerstandsbeiwerte und Interferenzwiderstand

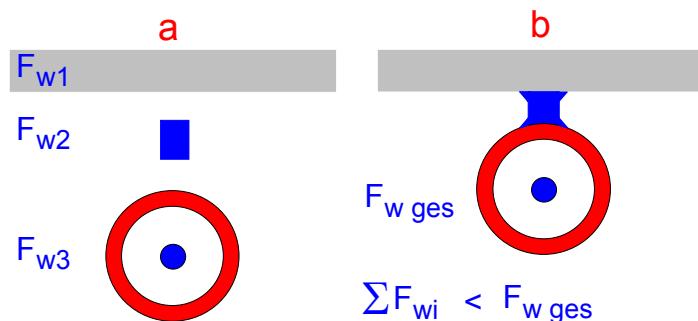
Reibungswiderstand:



der Reynoldschen Zahl (nach Dubs).

Interferenzwiderstand:

der Interferenzwiderstand ist die Differenz zwischen dem Gesamtwiderstand und der Summe der Einzelwiderstände.



Interferenzwiderstand:

$$\Delta F_{int} = F_{w \text{ ges}} - \sum_{i=1}^n F_{w_i}$$

20 Tragflächen- und Profilgrößen



20.1 Tragflächengeometrie

Begriffsbestimmung:

b = Spannweite

t = Profiltiefe (mittlere Segmenttiefe)

t_w = Flügelwurzeltiefe

t_{Sp} = Flügelspitzentiefe

A = Flügelfläche

KP = Kraftangriffspunkt

n = Anzahl der Segmente

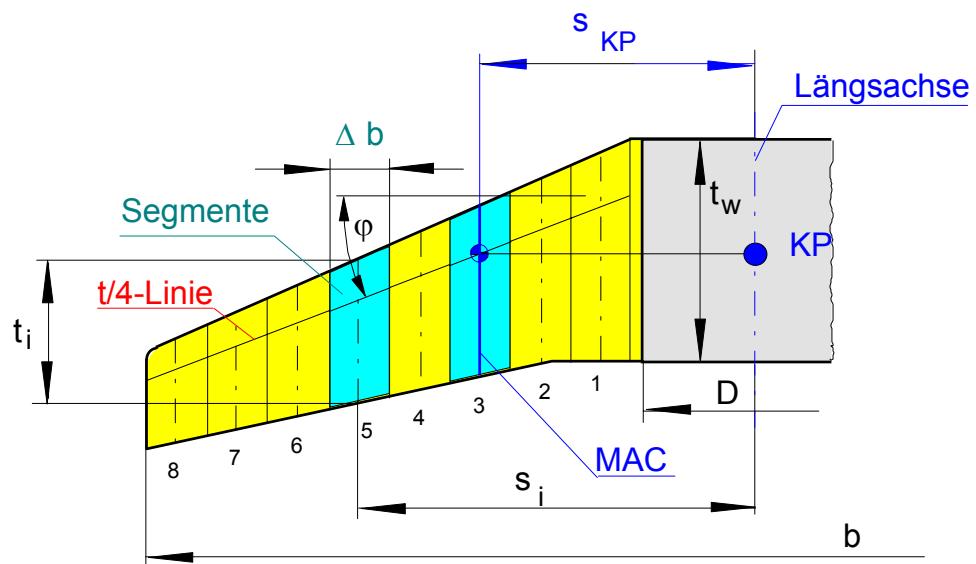
MAC = Mittlere aerodynamische Flügeltiefe

φ = Pfeilungswinkel

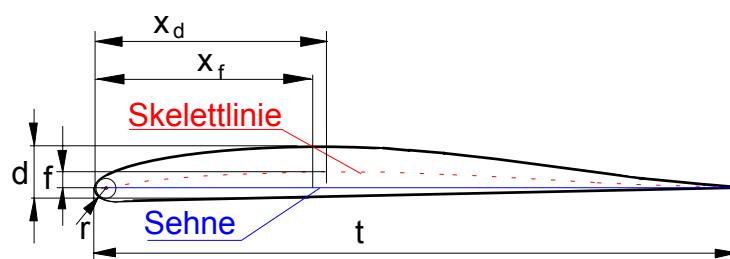
s_{KP} = Abstand zum Kraftangriffspunkt

Δb = Segmentbreite

c_{ai} = Auftriebsbeiwert der Segmente



t = Profiltiefe f = Wölbung d = Profildicke r = Nasenradius
 x_d = Dickenrücklage x_f = Wölbungsrücklage



20.2 Flügelstreckung, Seiten-, Dicken-, und Wölbungsverhältnis

Flügelstreckung Λ :

Flügelstreckung:

$$\Lambda = \frac{b^2}{A}$$

Seitenverhältnis λ :

Seitenverhältnis:

$$\lambda = \frac{1}{\Lambda}$$

Dickenverhältnis δ :

Dickenverhältnis:

$$\delta = \frac{d}{t}$$

Wölbungsverhältnis ω :

Wölbungsverhältnis:

$$\omega = \frac{f}{t}$$

20.3 Kraftangriffspunkt und Auftriebsbeiwert

mittlerer Auftriebsbeiwert c_A :

mittlerer Auftriebsbeiwert:

$$c_A = \frac{\Delta b \sum (c_{ai} t_i)}{A}$$

Abstand zum Kraftangriffspunkt s_{KP} :

Abstand zum Kraftangriffspunkt:

$$s_{KP} = \frac{\Delta b \sum (c_{ai} t_i s_i)}{A c_A}$$

20.4 Profiltiefe und mittlere aerodynamische Flügeltiefe

Profiltiefe t_i :

mittlere Profiltiefe:

$$t_i = \frac{t_w - t_{sp}}{n \cdot \Delta b} \cdot \left(\frac{b}{2} - s_i \right) + t_{sp}$$

mittlere aerodynamische Flügeltiefe MAC:

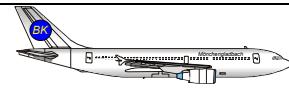
mittlere aerodyn. Flügeltiefe:

$$MAC = \frac{t_w - t_{sp}}{n \cdot \Delta b} \cdot \left(\frac{b}{2} - s_{KP} \right) + t_{sp}$$

20.5 Meßprotokoll (empfohlen)

Nr.	c_{ai}	$t_i \text{ in m}$	$c_{ai} \cdot t_i$	$s_i \text{ in m}$	$c_{ai} \cdot t_i \cdot s_i$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
			Σ		

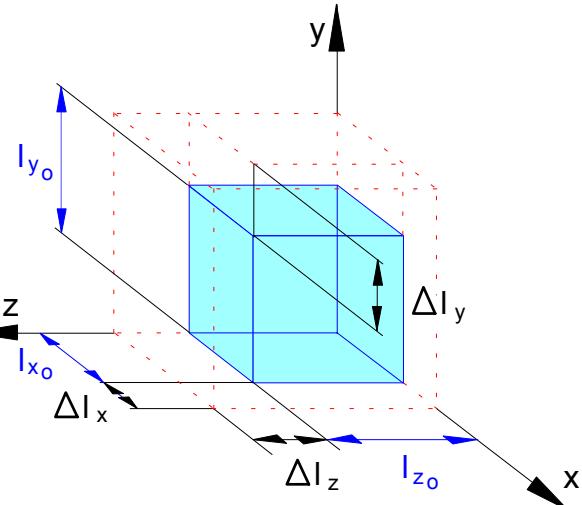
21 Thermodynamik



21.1 Wärmedehnung

Länge, Fläche, Volumen:

x, y, z = Koordinaten
 l_{x,y,z_0} = Ausgangslängen
 Δl = Verlängerung
 $\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz
 α = Wärmedehnungszahl
 γ = Wärmedehnungszahl



Länge:

Längendehnung:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta\vartheta$$

Neue Länge:

$$l = l_0 + \Delta l$$

Fläche:

Flächendehnung:

$$\Delta A = A_0 2 \alpha \Delta\vartheta$$

Neue Fläche:

$$A = A_0 + \Delta A$$

Volumen:

Volumendehnung:

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta\vartheta$$

Neues Volumen:

$$V = V_0 + \Delta V$$

21.2 Wärme, Energie

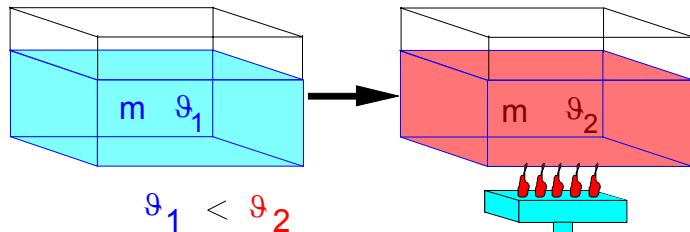
Wärme ist eine Energieform. Wärmemenge ist die Energiemenge zum Erwärmen einer Materialmenge.

Wärmemenge:

Q = zu- bzw. (abgeföhrte) Wärmemenge

$c_{p,v}$ = spezifische Wärmekapazität (bei konst. Druck bzw. Volumen)

m = Masse



$\Delta\theta$ = Temperaturdifferenz

θ_1 = Temperatur vor der Erwärmung

θ_2 = Temperatur nach der Erwärmung

T = absolute Temperatur in K

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

Wärmemenge:

$$q = c \cdot \Delta\theta$$

Wärmestromdichte:

Wärmestromdichte:

$$U = m \cdot c_v \cdot T$$

Innere Energie:

innere Energie:

$$u = c_v \cdot T$$

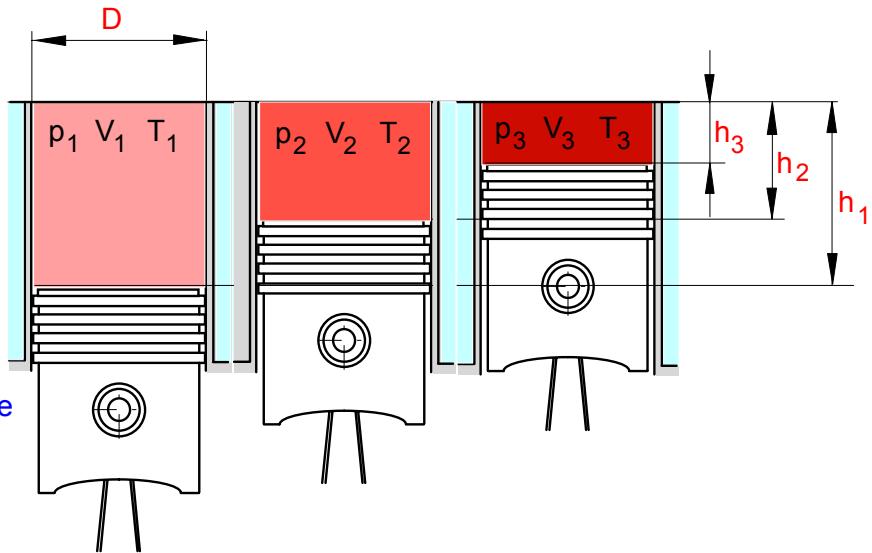
spezifische innere Energie:

innere Energie:

Enthalpie:

Enthalpie ist die Energiemenge, die nötig ist, um eine Materialmenge in den durch p , V und T gekennzeichneten Zustand zu bringen.

D = Durchmesser
 A = Querschnitt
 $h_{1,2,3}$ = Hub
 $p_{1,2,3}$ = Druck
 $V_{1,2,3}$ = Volumen
 $T_{1,2,3}$ = Temperatur
 R_s = Gaskonstante
 κ = Isentropen-exponent



Enthalpie:

Enthalpie:

$$H = m \cdot c_p \cdot T$$

spezifische Enthalpie:

innere Enthalpie:

$$h = c_p \cdot T$$

Gaskonstante R_s :

Gaskonstante:

$$R_s = c_p - c_v$$

Isentropenexponent (Adiabatenexponent):

Isentropenexponent:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Zustandsänderungen:

allgemeine Zustandsgleichung:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$$

Gasgleichung:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$

oder:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Isobare Zustandsänderung ($p = \text{konstant}$):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

isotherme Zustandsänderung ($T = \text{konstant}$):

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Isochore Zustandsänderung ($V = \text{konstant}$):

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Stoffe	R in $\frac{J}{kg \cdot K}$	c_p in $\frac{J}{kg \cdot K}$	c_v in $\frac{J}{kg \cdot K}$
Wasserstoff	4123,0	14250	10125
Stickstoff	296,7	998	743
Sauerstoff	260,0	920	660
Luft	287,0	1005	718
CO	269,9	1010	743
CO ₂	188,8	835	646
Methan	518,6	2180	1662
Helium	2078,0	5200	3123

Stoffwerte einiger Gase

21.3 Wärmemischung

Begriffsbestimmung:

- $p_{1/2}$ = absoluter Luftdruck (Leitungsdruck) (Pa)
 R = Gaskonstante der Luft ($R_L = 287 \text{ Nm/kg K}$)
 $T_{1/2}$ = absolute Temperatur (K)
 ρ_{Luft} = Dichte der Luft [$f(p, T)$]
 ϑ_m = Temperatur nach der Mischung ($^{\circ}\text{C}$)
 ϑ_1 = Temperatur der heißen Luft ($^{\circ}\text{C}$)
 ϑ_2 = Temperatur der kalten Luft ($^{\circ}\text{C}$)
 c_p = spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck (kNm/K)
 $Q_{1/2}$ = Volumenstrom m^3/s (heiße/kalte Luft)
 $m_{1/2}$ = Massenstrom kg/s (heiße/kalte Luft)

Gasgleichung zur Bestimmung der Dichte siehe Seite 104

Mischungstemperatur:

$$\vartheta_m = \frac{\sum (m \cdot c \cdot \vartheta)}{\sum (m \cdot c)}$$

Mischungstemperatur:

$$\vartheta_m = \frac{\sum (m \cdot \vartheta)}{\sum (m)}$$

oder:

$$\vartheta_m = \frac{m_1 c_1 \vartheta_1 + m_2 c_2 \vartheta_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

Massenstromverhältnis:

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_2}$$

Volumenstromverhältnis:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\rho_1 (\vartheta_1 - \vartheta_m)}{\rho_2 (\vartheta_m - \vartheta_2)}$$

Temperatur der heißen Luft:

$$\vartheta_1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} (\vartheta_m - \vartheta_2) + \vartheta_m$$

Temperatur der kalten Luft:

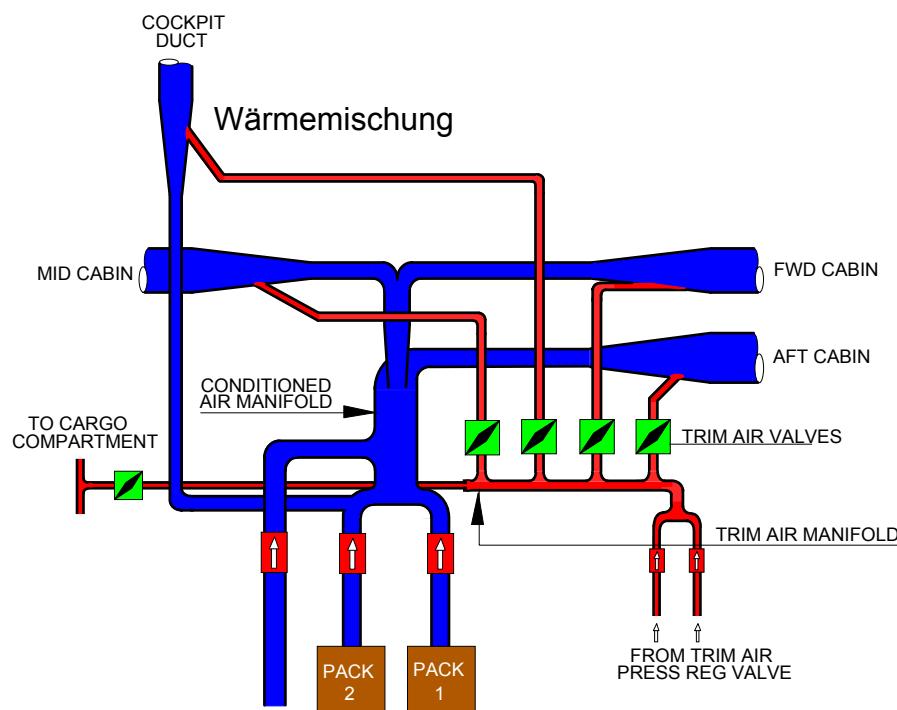
$$\vartheta_2 = \vartheta_m - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} (\vartheta_1 - \vartheta_m)$$

Mittlerer Druck nach der Mischung:

$$p_m = \frac{p_1 Q_1 + p_2 Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

Kritisches Druckverhältnis :

$$p_h \leq 1,89 p_k$$



21.4 Luftfeuchtigkeit

Begriffsbestimmung:

p = realer Luftdruck (Kabinendruck, Leitungsdruck)

p_D = Wasserdampfdruck

p_{DS} = Sättigungsdampfdruck

p_D = Dichte des Wasserdampfs in der Luft

p_{DS} = Sättigungskonzentration (Dichte)

φ = relative Luftfeuchtigkeit

x = Wassermasse je kg Luft

Wassermasse:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{DS}}{p - \varphi \cdot p_{DS}}$$

oder:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

relative Luftfeuchtigkeit

$$\varphi = \frac{x}{0,622 + x} \cdot \frac{p}{p_D}$$

oder:

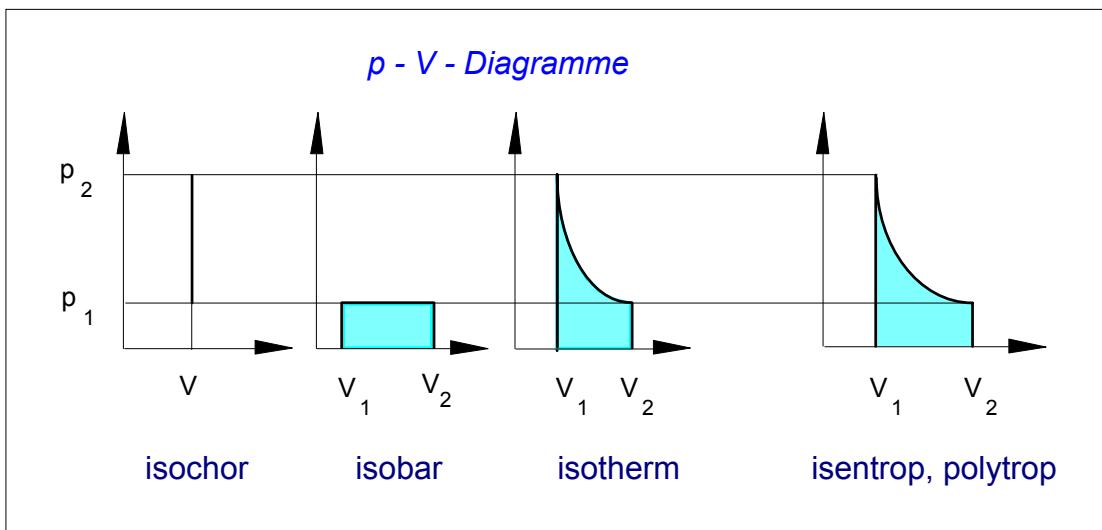
$$\varphi = \frac{p_D}{p_{DS}}$$

oder:

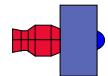
$$\varphi = \frac{p_D}{p_{DS}}$$

Zustandsänderungen (bezogen auf 1 kg):

	isochor	isobar	isotherm	isentrop	polytrop
ohne T	$V_1 = V_2$	$p_1 = p_2$	$p_1 V_1 = p_2 V_2$	$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa$	$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$
ohne p	$V_1 = V_2$	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$T_1 = T_2$	$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1}$	$T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1}$
ohne V	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	$p_1 = p_2$	$T_1 = T_2$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{n-1}}$
Änderung der inneren Energie	$q = c_v(T_2 - T_1)$	$c_v(T_2 - T_1)$	0	$-W = c_v(T_2 - T_1)$	$c_v(T_2 - T_1)$
zugeführte Wärme	$\Delta U = c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	W	0	$\frac{\kappa - n}{\kappa - 1} W$
Arbeit W	0	$p (V_2 - V_1)$ $R (T_2 - T_1)$	$R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ $R T \ln \frac{p_2}{p_1}$ $p V \ln \frac{p_2}{p_1}$ $p V \ln \frac{V_2}{V_1}$	$\frac{R}{\kappa-1} (T_2 - T_1)$ $p_1 V_2 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$ $\frac{1}{\kappa-1} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$	$\frac{R}{n-1} (T_2 - T_1)$ $p_1 V_2 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$ $\frac{1}{n-1} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$
technische Arbeit W_t	$V_1 (p_2 - p_1)$	0	W	κW	$n W$



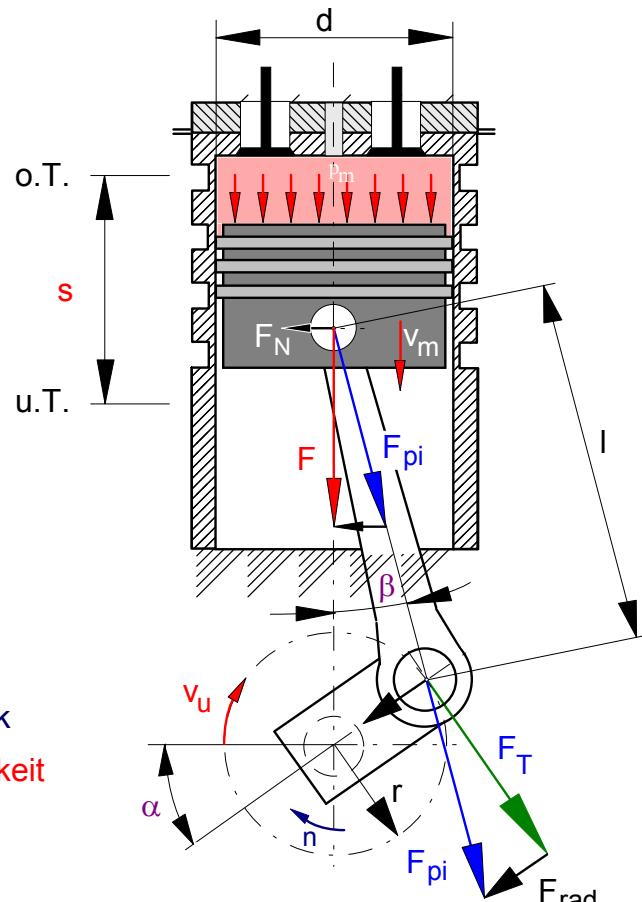
22 Triebwerke



22.1 Kolbentriebwerke

Begriffsbestimmung:

d = Zylinderdurchmesser
 z = Zylinderzahl
 s = Hub
 F = Kolbenkraft
 F_{pi} = Pleulstangenkraft
 F_N = Seitenkraft (Normalkraft)
 F_T = Tangentialkraft
 F_{rad} = Radialkraft
 l = Pleulstangenlänge
 r = Kurbelradius
 α = Kurbelwinkel
 β = Pleulstangenwinkel
 λ_{PI} = Pleulstangenverhältnis
 n = Drehzahl
 p_m = mittlerer Verbrennungsdruck
 v_m = mittlere Kolbengeschwindigkeit



Abmessungen des Motors:

Pleulstangenverhältnis:

$$\lambda_{PI} = \frac{r}{l}$$

Kurbelwinkel:

$$\sin \alpha = \frac{l \sin \beta}{r}$$

oder:

$$\sin \alpha = \frac{\sin \beta}{\lambda_{PI}}$$

Pleulwinkel:

$$\sin \beta = \frac{r \sin \alpha}{l}$$

Kolbenhub:

$$s = \frac{30 V_m}{n}$$

Kolbenweg vom OT:

$$s_K = r(1 - \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta)$$

Kräfte, Momente:

Kolbenkraft:

$$F = p A$$

Pleulstangenkraft:

$$F_{Pl} = \frac{F}{\cos \beta}$$

Seitenkraft:

$$F_N = F \tan \beta$$

Tangentialkraft:

$$F_T = \frac{F \sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

Radialkraft:

$$F_{rad} = \frac{F \cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

Drehmoment:

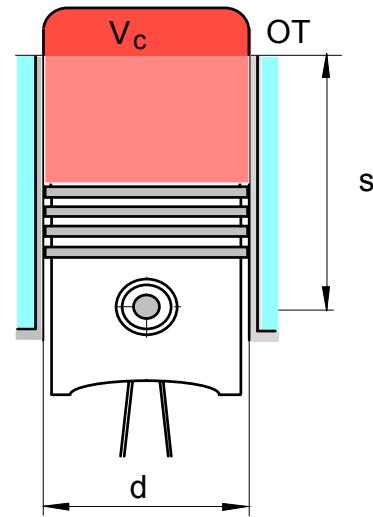
$$M = F_T r$$

maximales Drehmoment:

$$M_{max} = \frac{F_{max} r}{\cos \beta}$$

Begriffsbestimmung :

d = Zylinderdurchmesser
 z = Zylinderzahl
 s = Hub
 V_h = Hubvolumen je Zylinder
 V_H = Gesamtvolumen
 V_c = Verdichtungsraum
 n = Drehzahl
 ε = Verdichtungsverhältnis
 P_L = Hubraumleistung
 P_i = induzierte Leistung
 P_e = effektive Leistung
 L = Luftbedarf in kg Luft/ kg Kraftstoff
 F_F = Kraftstofffluss in kg/h
 b_e = spezifischer Kraftstoffverbrauch
 η = Wirkungsgrad
 η_m = mechanischer Wirkungsgrad



Leistung des Viertaktmotors:

induzierte Leistung:

$$P_i = \frac{V_H \rho_m n}{1200}$$

effektive Leistung:

$$P_e = P_i \eta_m$$

Hubraumleistung:

$$P_L = \frac{P_e}{V_H}$$

Weitere Kenngrößen:

Liefergrad:

$$\lambda_L = \frac{m_{zu}}{m_{th}}$$

oder:

$$\lambda_L = \frac{V_{zu} \rho_{zu}}{V_h \rho_{th}}$$

Luftverhältnis:

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}}$$

Leistungsgewicht:

$$P_G = \frac{F_G}{P_e}$$

Verdichtungsverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_C}{V_C}$$

Gesamtvolumen:

$$V_H = \frac{d^2 \pi}{4} s z$$

spezifischer Kraftstoffverbrauch:

$$b_e = \frac{F_F}{P_e}$$

22.2 Strahltriebwerke

Begriffsbestimmung und Größen:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| $N_{1/2}$ = Drehzahlen | n = Anzahl der Verdichterstufer |
| A = Stirnfläche (Heißluft) | ε = Nebenstromverhältnis |
| \dot{m}_0 = Massendurchsatz ($v = 0$) in kg/s | \dot{m} = Massendurchsatz in kg/s |
| Δp = Differenzdruck (Düse-Umgebung) | |
| π_i = Stufendruckverhältnis (Mittelwert) | |

Massenstrom:

Massenstrom ZTL:

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_K + \dot{m}_H$$

Nebenstromverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_H}$$

Heißstrom:

$$\dot{m}_{H0} = \frac{\dot{m}_0}{1 + \varepsilon}$$

bzw.:

$$\dot{m}_H = \frac{\dot{m}}{1 + \varepsilon}$$

Kaltstrom:

$$\dot{m}_{K0} = \frac{\dot{m}_0 \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

bzw.:

$$\dot{m}_K = \frac{\dot{m} \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

Staustrahleffekt:

$$\dot{m} = \dot{m}_0 (1 + 0,2 M^2)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Druckverhältnis:

Druckverhältnis:

$$\pi = \pi_i^n = \frac{p_3}{p_1}$$

Schubkraft:

Schubkraft TL:

$$F_s = \dot{m}_{(0)} (c - v)$$

Schubkraft ZTL:

$$F_s = \dot{m}_{H(0)}^* (c_H - v) + \dot{m}_{K(0)}^* (c_K - v)$$

oder:

$$F_s = \frac{\dot{m}^{(0)}}{1 + \varepsilon} [(c_H - v) + \varepsilon (c_K - v)]$$

statischer Schub:

Ist das Druckverhältnis p_6 zu p_0 größer oder gleich 1,8 ,so wird auch statischer Schub erzeugt.

statischer Schub:

$$F_{s\ st} = \Delta p \ A$$

Gesamtschubkraft:

Gesamtschub:

$$F_{Ges} = F_{s\ st} + F_s$$

spezifischer Schub:

spezifischer Schub:

$$F_{sp} = \frac{F_{Ges}}{\dot{m}_0}$$

22.3 Wirkungsgrade

- η_v = Verbrennungswirkungsgrad
- η_{th} = thermischer Wirkungsgrad
- η_{Auf} = Aufheizgrad
- η_{Vad} = Verdichterwirkungsgrad (bezogen auf adiabatischen Kreisprozeß)
- η_{Tad} = Turbinenwirkungsgrad (bezogen auf adiabatischen Kreisprozeß)
- η_G = Gütegrad
- η_{in} = innerer Wirkungsgrad
- η_{Gb} = Gebläsewirkungsgrad
- η_a = äußerer Wirkungsgrad
- η_m = mechanischer Wirkungsgrad

thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$$

oder:

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Aufheizgrad:

$$\eta_{Auf} = \frac{T_4}{T_3}$$

Gütegrad:

$$\eta_G = \frac{\eta_{Auf} \eta_{Tad} - \left(\frac{1}{\eta_{Vad}}\right)}{\eta_{Auf} - 1}$$

innerer Wirkungsgrad:

$$\eta_{in} = \eta_{th} \eta_m \eta_{Vad} \eta_{Tad} \eta_v$$

äußerer Wirkungsgrad (TL):

$$\eta_a = \frac{2}{\left(\frac{c}{V}\right) + 1}$$

äußerer Wirkungsgrad (ZTL):

$$\eta_a = \frac{2}{\left(\frac{c_K}{v} + 1\right) + \frac{1}{\varepsilon v} \left(\frac{c_H^2 - v^2}{c_K - v}\right)} + \frac{2}{\left(\frac{c_H}{v} + 1\right) + \frac{\varepsilon}{v} \left(\frac{c_K^2 - v^2}{c_H - v}\right)}$$

Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_{in} \cdot \eta_a$$

optimale Geschwindigkeit (ZTL):

$$v = \frac{\sqrt{\varepsilon + 1} \cdot \sqrt{\varepsilon c_K^2 + c_H^2} \cdot \left(\sqrt{\varepsilon + 1} \cdot \sqrt{\varepsilon c_K^2 + c_H^2} - \sqrt{\varepsilon (c_H - c_K)^2} \right)}{\varepsilon^2 c_K + \varepsilon (c_H + c_K) + c_H}$$

22.4 Kreisprozeß

Verdichterarbeit:

Verdichterarbeit (technische):

$$W_{tV} = W \cdot \kappa$$

oder:

$$W_{tV} = c_p T_2 \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

Verdichteraustrittstemperatur:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Verdichterarbeit:

Verdichterarbeit (Gasarbeit):

$$W = \frac{p_2 V_2}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

oder:

$$W = \frac{R}{\kappa-1} (T_3 - T_2)$$

Verdichterleistung:

$$P_V = \dot{m}_H W_{tv}$$

Leistungsbedarf:

$$P_{Vind} = \frac{P_V}{\eta_{Vad}}$$

Leistungsbedarf des Gebläses (Fan) wird mit den gleichen Formel berechnet.

Brennkammer:

I_u = Heizwert

I_u = 42700 kJ/kg

Kraftstoffbedarf:

$$\dot{m}_{Krst} = \frac{\dot{m}_H c_p}{I_u} (T_4 - T_3)$$

Turbine:

Leistungsbedarf:

$$P_T = P_{Vind} + P_{Gbind}$$

oder:

$$P_T = \dot{m}_H W_{tT} \eta_{Tad} \eta_m$$

Turbinenarbeit:

Turbinenarbeit:

$$W_{tT} = \frac{P_T}{\dot{m}_H \eta_{Tad} \eta_m}$$

Turbinenarbeit ist die Arbeit, die dem Verdichter, Gebläse, Pumpen usw. zugeführt wird.

Turbinenarbeit:

$$W_{tT} = c_p T_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Turbinenaustrittsdruck:

$$p_5 = p_4 \left(1 - \frac{W_{tT}}{c_p T_4} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Turbinenaustrittstemperatur:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

Düse:

Energie in der Düse:

$$\frac{c_H^2}{2 c_p} = T_5 \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Düsenaustrittsdruck:

$$p_6 = p_5 \left(1 - \frac{c_H^2}{2 c_p T_5} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

Düsenaustrittstemperatur:

$$T_6 = T_5 \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

Geschwindigkeiten:

mittlere Kolbengeschwindigkeit:

$$v_m = \frac{s \cdot n}{30}$$

maximale Kolbengeschwindigkeit:

$$v_{max} \approx 1,6 \cdot v_m$$



23 Instrumente

23.1 Temperatur, Höhe und Geschwindigkeit

Begriffsbestimmung:

TAT = Total Air Temperature
SAT = Static Air Temperature
 $\Delta\vartheta_T$ = Temperaturdifferenz
 H_T = tatsächliche Höhe
 H_o = gemessene Höhe
 ϑ_{ISA} = Standardtemperatur

a = Schallgeschwindigkeit
IAS = Indicated Airspeed
CAS = Calibrated Airspeed
EAS = Equivalent Airspeed
TAS = True Airspeed

ISA-Standardwerte:

Normaldruck $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$
 Normaldichte $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$
 Normaltemperatur $\vartheta_0 = 15^\circ\text{C}$

Höhenformeln s. Seite 58-59

Temperaturen:

Gemessene Temperatur:

$$\text{TAT} = \text{SAT} (1 + 0,2 M^2)$$

Gemessene Temperatur:

$$\text{TAT} = \text{SAT} + \Delta\vartheta_T$$

Temperaturerhöhung:

$$\Delta\vartheta_T = \frac{V^2}{2 c_p}$$

Temperaturfehler des Höhenmessers:



tatsächliche Höhe:

$$H_T = H_o (1 - \frac{1}{273} \Delta\vartheta_H)$$

Temperaturabweichung:

$$\Delta\vartheta_H = \vartheta_{ISA} - \vartheta_T$$

Machzahl:



Machzahl:

$$M = \frac{TAS}{a}$$

oder:

$$M = \sqrt{\frac{2}{a}} - \sqrt{\frac{\Delta p}{p_H}}$$

Schallgeschwindigkeit:

$$a = \sqrt{\kappa R T}$$

oder:

$$a = 20,1 \sqrt{T}$$

Geschwindigkeiten:

Indicated Airspeed:

$$IAS = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{p_H}}$$

Calibrated Airspeed:

$$CAS = IAS - \text{Systemfehler}$$

Equivalent Airspeed:

$$EAS = CAS - \text{Kompressibilitätsfehler}$$

Equivalent Airspeed:

$$EAS = CAS \sqrt{\frac{1}{1 + 0,25 M^2}}$$

True Airspeed:

$$TAS = EAS - \text{Dichtefehler}$$

True Airspeed:

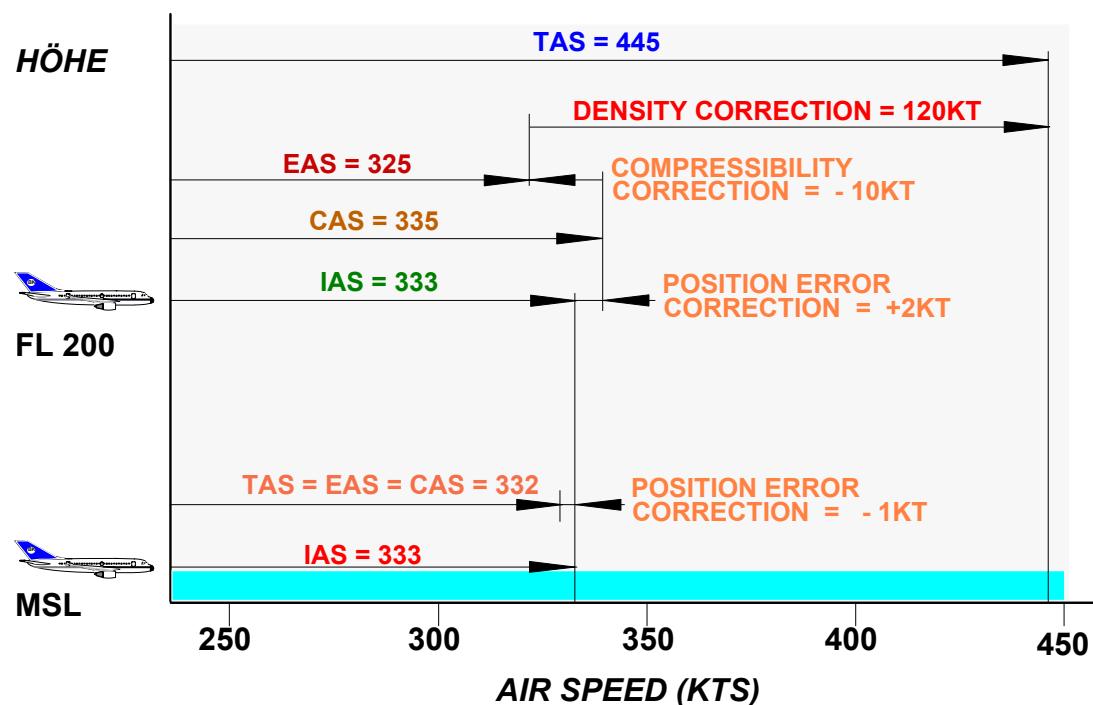
$$TAS = EAS \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_H}}$$

oder:

$$TAS = K \sqrt{\frac{\Delta p}{p_H} T_H}$$

Faktor:

$$K = \sqrt{2 R} = 23,96$$

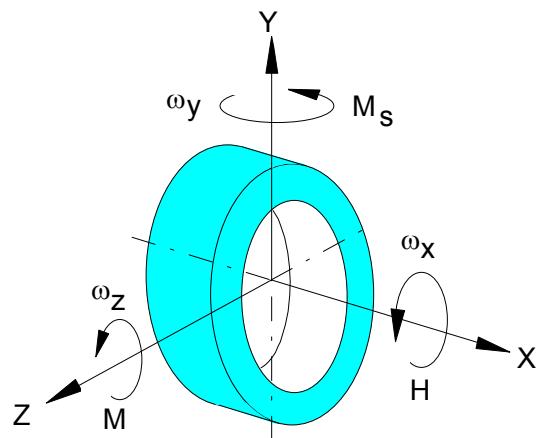


23.2 Kreisel

Begriffsbestimmung :

H = Drehimpuls des Rotationskörpers
 M = Moment, mit dem der Kreisel präzidiert
 M_s = Störmoment

ω_x = Winkelgeschwindigkeit des Rotationskörpers
 ω_y = Winkelgeschwindigkeit des Störmoments
 ω_z = Winkelgeschwindigkeit, mit der der Rotationskörper präzidiert



Drehimpuls:

$$H = M_x \cdot t$$

oder:

$$H = J \cdot \omega_x$$

Trägheitsmoment: (Kreisscheibe)

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2$$

Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega_x = 2 \pi \cdot n$$

Rotationsenergie:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_x^2$$

Kreiselgleichung:

Kreiselgleichung:

$$M = \omega_y \times H$$

M = Kreuzprodukt ($M = \omega_y$ kreuz H)

Moment:

x - Komponente

$$x = i (y_1 z_2 - y_2 z_1)$$

y - Komponente

$$y = j (x_1 z_2 - x_2 z_1)$$

z - Komponente

$$z = k (x_1 y_2 - x_2 y_1)$$

23.3 Driften, Kippen

Driftwinkel und Kippwinkel durch Zeitveränderung:

Driftwinkel:

$$\sin \varphi = \frac{\sin \gamma \sin \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta \sin^2 \beta (1 - \cos \gamma)^2}}$$

Kippwinkel:

$$\sin \kappa = \frac{\sin \beta \cos \beta (1 - \cos \gamma)}{\sqrt{(1 - \sin \beta)^2 (\sin \gamma)^2}}$$

λ = Längengrad

$\Delta \lambda$ = Differenz der Längengrade

β_M = mittlerer Breitengrad

φ° = zulässige Abweichung

mittlerer Breitengrad:

$$\beta_M = \frac{\beta_A + \beta_B}{2}$$

Vorzeichenregel:

$$\lambda = +\lambda \text{ von West nach Ost}$$

$$\lambda = -\lambda \text{ von Ost nach West}$$

Driftwinkel durch Zeitveränderung und Ortsveränderung:

Zeit- und Ortswinkel:

$$\gamma = t \cdot 15^\circ + (\pm \Delta \lambda)$$

Zeit- und Ortswinkel in die obige Gleichung Driftwinkel einsetzen.

Nachstellzeit:

Nachstellzeitraum in min:

$$t_n = \varphi^\circ \frac{4}{\sin \beta}$$

Kardanfehler (Neigungsfehler):

Begriffsbestimmung:

κ = wahrer Kurs

κ' = angezeigter Kurs

$\Delta \kappa$ = Kardanfehler

γ = Querneigungswinkel

Fehleranzeige durch Querneigung:

Fehleranzeige:

$$\tan \Delta \kappa = \frac{\tan \kappa \cdot (1 - \cos \gamma)}{1 + \tan^2 \kappa \cdot \cos \gamma}$$

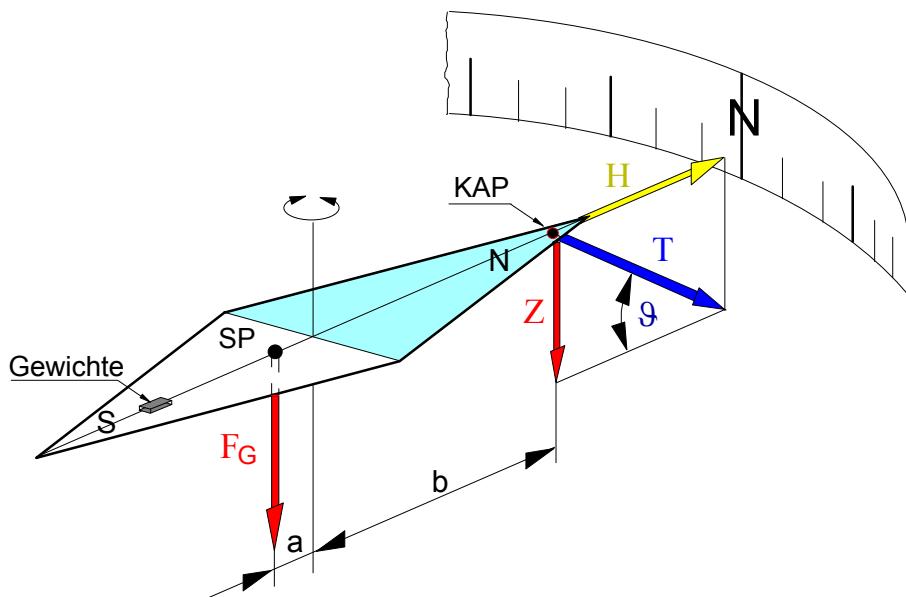
Wahrer Kurs bei Querneigung:

$$\tan \kappa = \sqrt{\left(\frac{1 - \cos \gamma}{2 \cos \gamma \cdot \tan \Delta \kappa} \right)^2 - \frac{1}{\cos \gamma}} + \left(\frac{1 - \cos \gamma}{2 \cos \gamma \cdot \tan \Delta \kappa} \right)$$

23.4 Kompaß, Kompaßfehler

Begriffsbestimmung:

- T = Totalintensität (der Erdfeldlinien)
 ϑ = Inklination (Ein- bzw. Austrittswinkel der Feldlinien zur Erdoberfläche) $H =$
 Horizontalintensität (Horizontalkomponente)
 Z = Vertikalintensität (Vertikalkomponente)
 Z_H = Komponente von Z quer zur geneigten Kompaßnadel
 Z_V = Komponente von Z senkrecht zur geneigten Kompaßnadel
 F_G = Gewichtskraft
 F_F = Fliehkraft
 a = Abstand Schwerpunkt-Drehachse
 b = Abstand Angriffspunkt-Drehachse
 γ = Querneigungswinkel der Kompaßnadel
 φ = Kompaßabweichung
 ω = Winkelgeschwindigkeit des Kurvenfluges
 v = Bahngeschwindigkeit



Momentengleichgewicht:

$$a F_G = b Z$$

Vertikalkomponente Z :

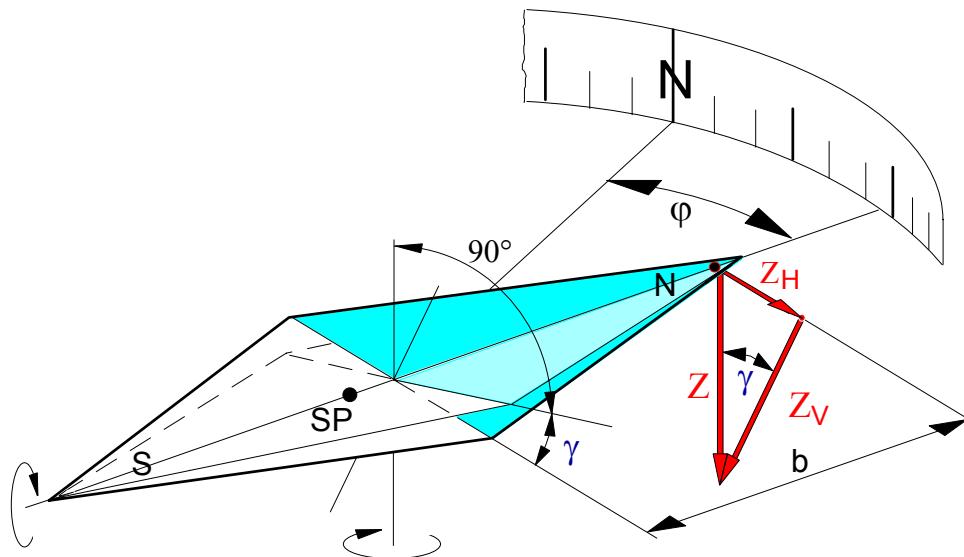
$$Z = T \sin \vartheta$$

Abstand a :

$$a = \frac{b T \sin \vartheta}{F_G}$$

Querneigungsfehler:

Durch eine Querneigung des Flugzeuges (im Kurvenflug) kommt die sonst unwirksame Vertikalkomponente Z auf der Totalintensität T zur Wirkung und übt auf die Kompaßnadel ein ablenkendes Drehmoment aus. Man setzt voraus, daß die Drehachse der Kompaßnadel parallel zur Hochachse des Flugzeugs liegt, was im Kurvenflug immer der Fall ist, da sich das Kompaßsystem nach dem Scheinlot einstellt.



Querneigungskomponente Z_H :

$$Z_H = Z \sin \gamma$$

mit:

$$Z = T \sin \vartheta$$

Querneigungskomponente Z_H :

$$Z_H = T \sin \vartheta \sin \gamma$$

Drehmoment:

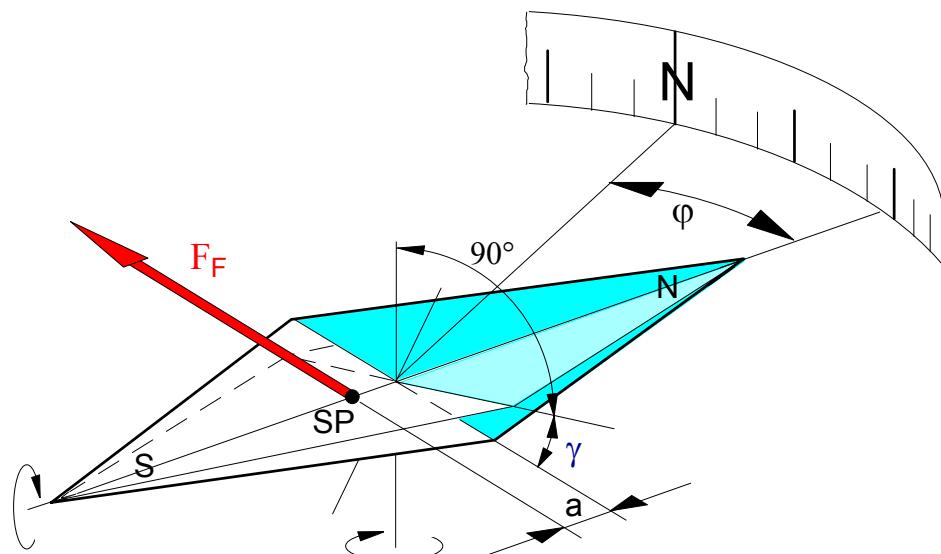
$$M = Z_H b$$

Die Vertikalkomponente Z_V hat keinen Einfluß auf die Magnetnadeln, da sie mit der Drehachsenrichtung des Magnetsystems übereinstimmt.

Fliehkräftefehler:

Die beim Fliegen einer Kurve auftretende Fliehkraft wirkt auch auf das Magnetsystem des Kompasses. Sie greift im Schwerpunkt (SP) der Nadel an und ist stets, vom Kurvenkrümmungsmittelpunkt ausgehend, nach außen gerichtet. Die Fliehkraft übt ein Drehmoment auf die Nadel aus.

Der Fliehkräftefehler tritt nur bei Kompassen auf, bei denen das Inklinationsmoment durch Verlagerung des Schwerpunktes kompensiert wurde.



Fliehkraft F_F :

$$F_F = m \omega^2 r \cos \gamma$$

oder:

$$F_F = m \omega v \cos \gamma$$

oder:

$$F_F = F_G \sin \gamma$$

Neigungswinkel:

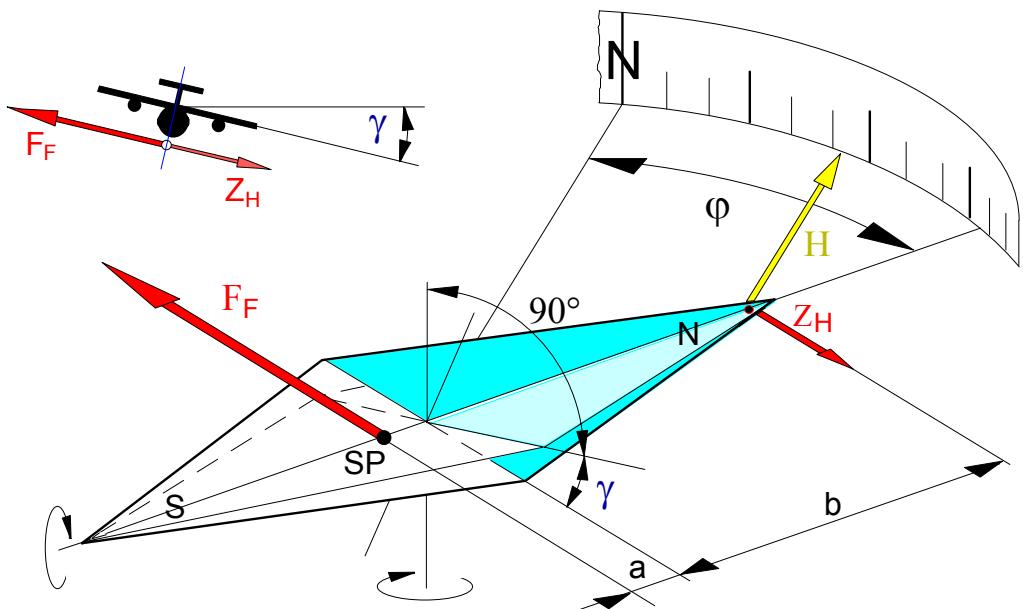
$$\tan \gamma = \frac{v \omega}{g}$$

Drehmoment:

$$M = F_F a$$

Summenfehler:

Bei jedem Kurvenflug, der richtig geflogen wird, wirken Querneigungs- und Fliehkraftfehler gleichzeitig. Die Summe dieser beiden Fehler nennt man Summenfehler, oder allgemein Kompaßdrehfehler.



Bei voller Kompensation des Inklinationsmoments durch Gewichte sind folgende Momente gleich:

Drehmoment:

$$F_E \ a = Z_H \ b$$

Mit

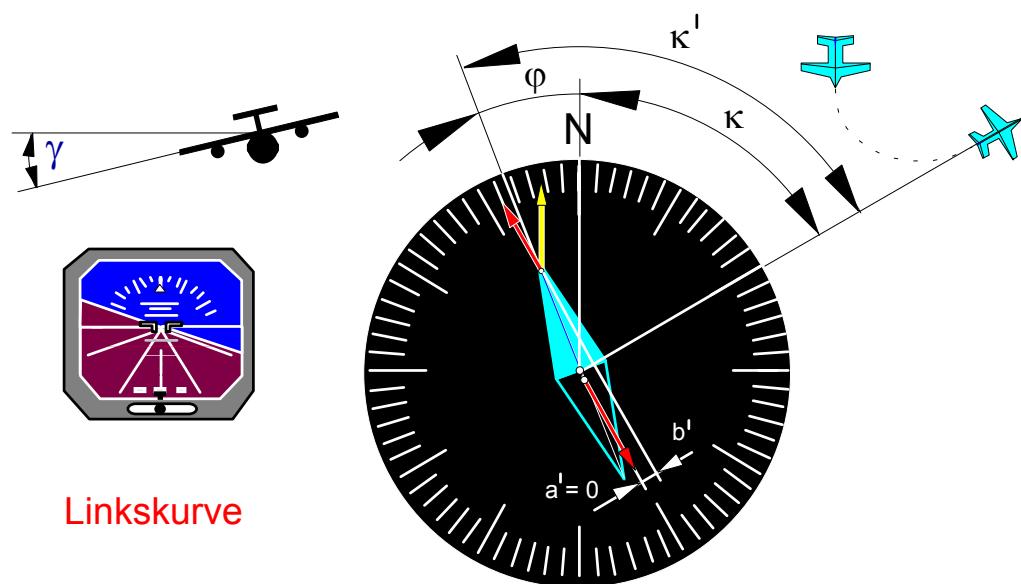
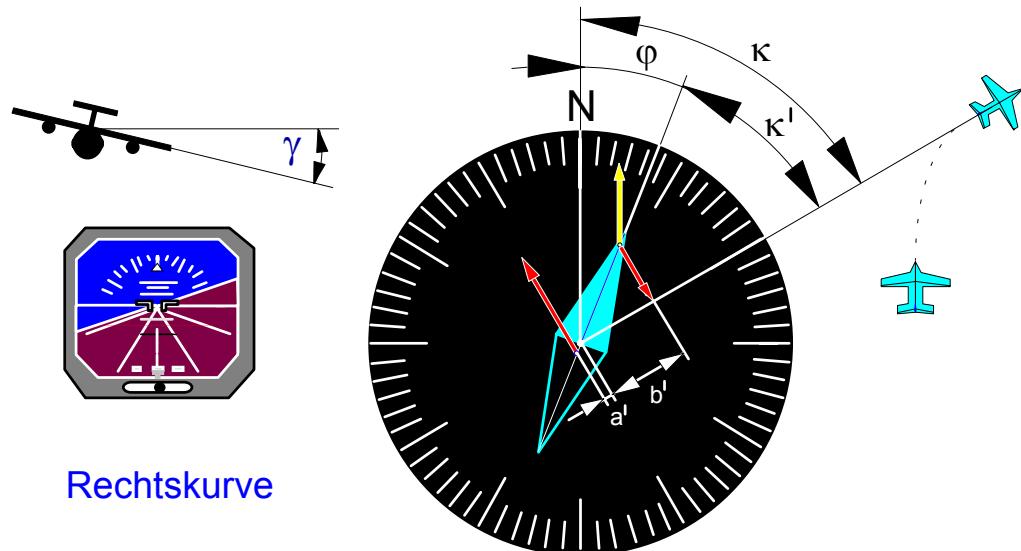
Rechtskurve: $\gamma = +\gamma$ und Linkskurve: $\gamma = -\gamma$

Summenfehler:

$$\tan \varphi = - \frac{2 \sin \vartheta \sin \gamma \cos \kappa}{\cos \vartheta - 2 \sin \vartheta \sin \gamma \sin \kappa}$$

Kurskorrektur:

Ist der Fehler φ bekannt, so kann der Beendungswinkel (für nördliche Kurse) bestimmt werden.



Beendungswinkel:

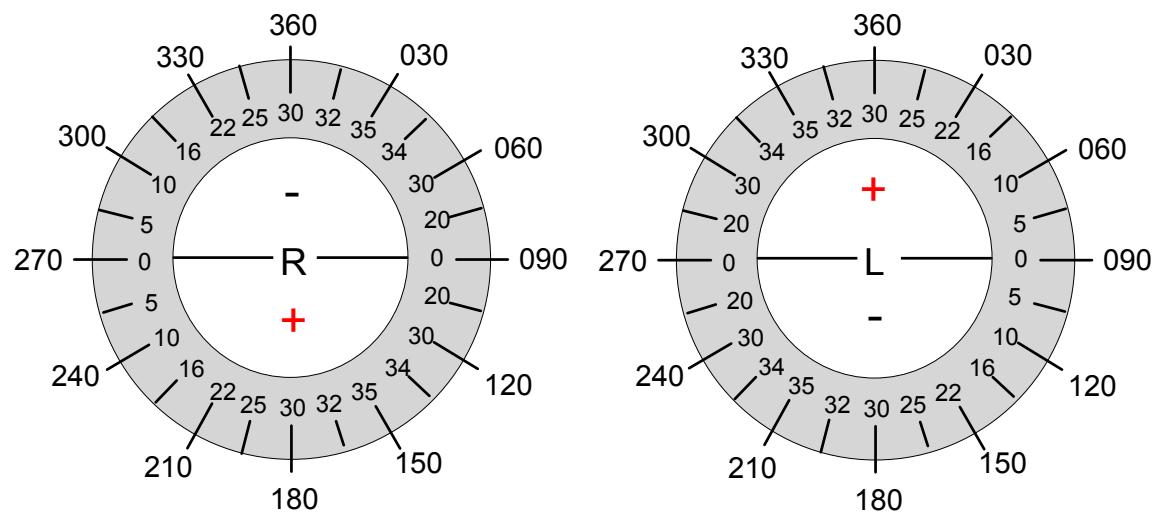
$$\kappa' = \kappa \pm \varphi$$

Bei φ Vorzeichen beachten !

Kurskorrektur mittels eines Nomogramms:

Inklination $\vartheta = 66,5^\circ$

Querneigungswinkel $\gamma = 7,5^\circ$



Beendungswinkel:

$$\kappa^l = \kappa \pm \varphi$$

Achtung: Für südliche Kurse ändern sich die Vorzeichen.

Sink- und Steigfehler:

Mit steigen: $\alpha = +\alpha$ und sinken: $\alpha = -\alpha$

Sink- und Steigfehler:

$$\tan \varphi = \frac{\sin \vartheta \sin \alpha \cos \kappa}{\cos \vartheta - \sin \vartheta \sin \alpha \sin \kappa}$$

23.5 Flugzeugmagnetismus bzw. Deviation

Jedes Flugzeug besitzt einen Eigenmagnetismus und das dazugehörige magnetische Feld, das die Kompaßanzeige stört, wenn keine geeigneten Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

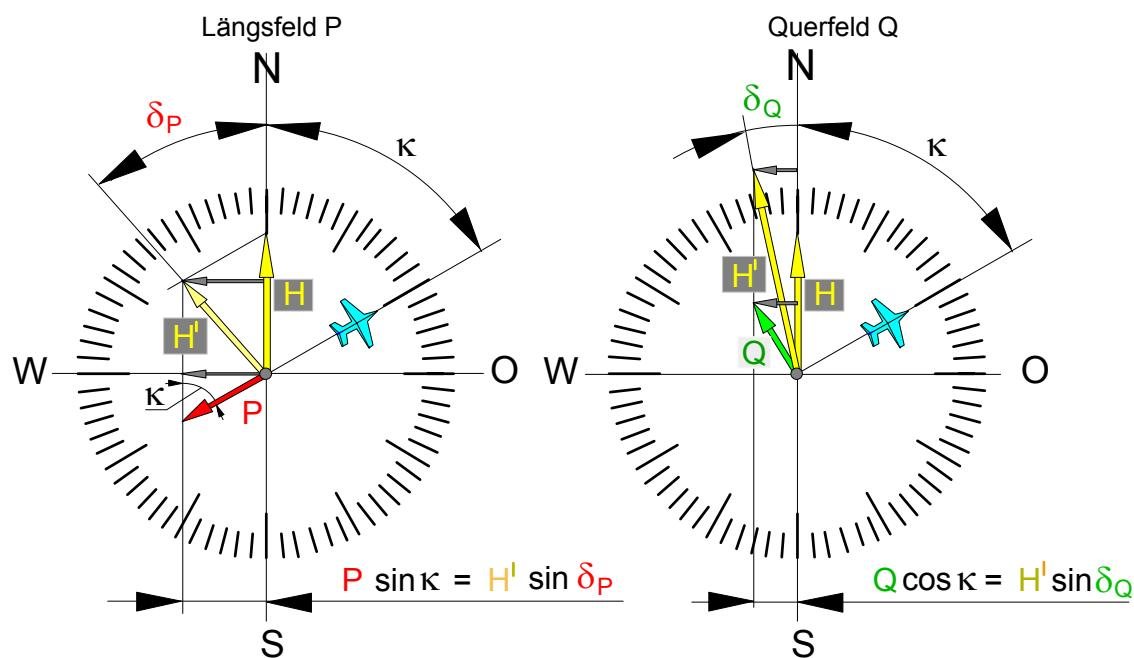
Begriffsbestimmung:

P	=	Längsfeld	wirkt parallel zur Flugzeulgängsachse
Q	=	Querfeld	wirkt parallel zur Flugzeugquerachse
R	=	Hochfeld	wirkt parallel zur Flugzeughochachse
δ	=	Ablenkung	(Deviation)
δ_P	=	Längsfeldfehler	
δ_Q	=	Querfeldfehler	
δ_R	=	Hochfeldfehler	(bei Quer- und Längsneigung)

Gemessene Fehler bei Ausrichtung des Lfz :

δ_N	=	nach Norden
δ_S	=	nach Süden
δ_O	=	nach Osten
δ_W	=	nach Westen
A	=	Einbau und Aufstellungsfehler
B	=	Beiwert der magnetischen Längswirkung
C	=	Beiwert der magnetischen Querwirkung
D	=	Beiwert der magnetischen Hochwirkung (bei Quer- und Längsneigung)

Komponenten der Feldlinien



Kräfte im Längsfeld:

$$P \sin \kappa = H' \sin \delta_P$$

Kräfte im Querfeld:

$$Q \cos \kappa = H' \sin \delta_Q$$

Winkelumrechnung von ° in rad:

$$\delta \text{ (rad)} = \frac{1}{57,3} \delta^\circ$$

Da die Ablenkung selten größer als 5° ist, kann der Sinus vom Winkel δ gleich dem Winkel δ gesetzt werden:

Gleichsetzung:

$$\sin \delta = \delta \text{ (rad)}$$

Ist der Winkel δ klein, so kann auch H' gleich H gesetzt werden. Dadurch ändert sich das Kräftegleichgewicht.

Kräfte im Längsfeld:

$$P \sin \kappa = H \frac{1}{57,3} \delta^\circ_P$$

Kräfte im Längsfeld:

$$Q \sin \kappa = H \frac{1}{57,3} \delta^\circ_Q$$

Umstellung nach δ°_Q ergibt:

Längsfeldfehler:

$$\delta^\circ_P = 57,3 \frac{P}{H} \sin \kappa$$

Querfeldfehler:

$$\delta^\circ_Q = 57,3 \frac{Q}{H} \cos \kappa$$

Beiwerte:

Beiwert C:

$$C = 57,3 \frac{Q}{H}$$

Beiwert B:

$$B = 57,3 \frac{P}{H}$$

Einbau-, Längsfeld- und Querfeldfehler zusammen:

Gesamtfehler ohne Hochfeld:

$$\delta^\circ = A + B \sin \kappa + C \cos \kappa$$

Bestimmung der Beiwerte:

Einbau- oder Aufstellfehler:

$$A = \frac{(\delta N) + (\delta S) + (\delta W) + (\delta O)}{4}$$

Beiwert B:

$$B = \frac{(\delta W) - (\delta O)}{2}$$

Beiwert C:

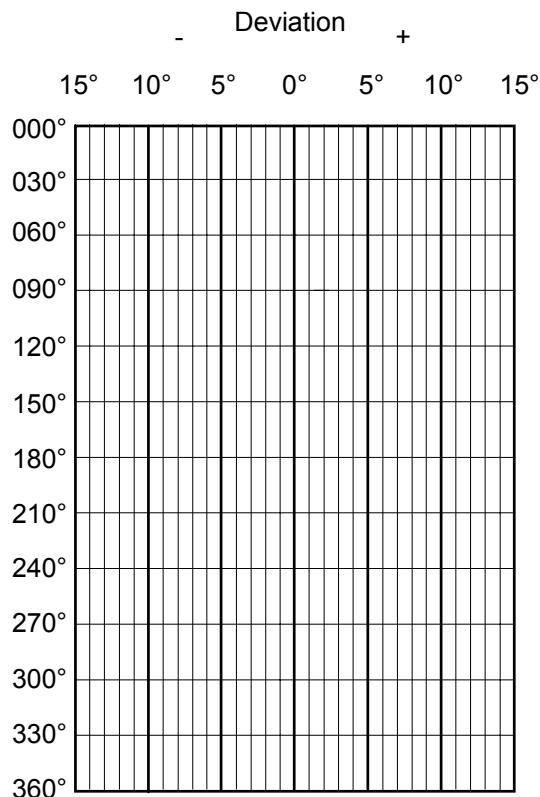
$$C = \frac{(\delta N) - (\delta S)}{2}$$

Gesamte Deviation:

$$\delta^\circ = A + (B + D \sin \alpha) \sin \kappa + (C + D \sin \gamma) \cos \kappa$$

Kompensierbericht

Flugzeug-Kennzeichen: D - EABC
 Kompaß-Muster: Magnet
 Flugzeuglage: Rollage
 Kompensiert am: 4.05.99



mw Kurs	Deviation	Kompaß Kurs
000°		
030°		
060°		
090°		
120°		
150°		
180°	-	
210°		
240°		
270°		
300°		
330°		

$$A = \frac{\delta(N) + \delta(S) + \delta(O) + \delta(W)}{4}$$

$$A = \frac{\delta(\) + \delta(\) + \delta(\) + \delta(\)}{4}$$

$$A =$$

$$B = \frac{\delta(O) - \delta(W)}{2}$$

$$B = \frac{\delta(\) - \delta(\)}{2}$$

$$B =$$

$$C = \frac{\delta(N) - \delta(S)}{2}$$

$$C = \frac{\delta(\) - \delta(\)}{2}$$

$$C =$$

23.6 Elektromagnetische Wellen

Begriffsbestimmung :

C = Ausbreitungsgeschwindigkeit

λ = Wellenlänge

f = Frequenz

ε_0 = elektrische Feldkonstante ($\varepsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$)

μ_0 = magnetische Feldkonstante ($\mu_0 = 1,26 \text{ } \mu\text{H/m}$)

ε_r = Permittivitätszahl

μ_r = Permeabilitätszahl

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$c = f \lambda$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}}$$

Feldstärke:

$$E = \frac{380 \text{ } h \text{ } l}{\lambda \text{ } r} \sin \vartheta$$

oder:

$$E = E_{\max} \sin \vartheta$$

23.7 Entfernungsmessung DME

Begriffsbestimmung :

R = Schrägentfernung

H = Höhe

D = Bodenentfernung

T = Laufzeit (μ s)

t = Rücklaufzeit (μ s)

t_t = Verzögerungszeit μ s ($t_t = 50 \mu$ s)

Laufzeit:

$$T = 2t + 50t$$

Entfernung:

$$R = \frac{c}{2} (T - 50)$$

Entfernung:

$$D = \sqrt{R^2 - H^2}$$

Meßfehler:

$$F = R - \sqrt{R^2 - H^2}$$

23.8 Frequenzbereiche

