

**FLUGZEUGENTWURF**  
**ENTWURFSSYSTEMATIK, AERODYNAMIK**  
**FLUGMECHANIK UND AUSLEGUNGSPARAMETER**  
**FÜR KLEINERE FLUGZEUGE**

**Neue flugtechnische Reihe: Band 4**

# Inhalt

Kap.	Thema	Seite
1.	<b>Vorwort</b>	1- 1
2.	<b>Einführung</b>	2- 1
3.	<b>Formelgrößen</b>	3- 1
4.	<b>Strömungsmechanische Grundlagen</b>	4- 1
4.1	<b>Vorbemerkung</b>	4- 1
4.2	<b>Die Grundgleichungen</b>	4- 1
4.2.1	KONTINUITÄTS-Gleichung	4- 1
4.2.2	BERNOULLI-Gleichung (Daniel Bernoulli, 1738)	4- 2
4.2.3	REYNOLDS-Zahl (Osborne Reynolds, 1842 - 1912)	4- 2
4.2.3.1	Tendenz des Re-Zahl-Einflusses auf den Widerstands- und Auftriebsbeiwert von Profilen	4- 3
4.2.4	MACH-Zahl (Ernst Mach, 1838 - 1916)	4- 4
4.2.5	FROUDE-Zahl	4- 4
4.3	<b>Zusammenfassung</b>	4- 5
5	<b>Aerodynamische Grundlagen</b>	5- 1
5.1	<b>Einleitung</b>	5- 1
5.2	<b>Grenzschicht – Allgemein</b>	5- 1
5.2.1	Eigenschaften der laminaren Grenzschicht	5- 2
5.2.2	Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht	5- 2
5.2.3	Zusammenfassung	5- 2
5.3	<b>Beeinflussung der Grenzschicht</b>	5- 4
5.3.1	Passive Beeinflussung der laminaren Grenzschicht	5- 4
5.3.1.1	"Natürliche" Laminarhaltung	5- 4
5.3.1.2	Passive Beeinflussung der turbulenten Grenzschicht	5- 5
5.3.2	Aktive Beeinflussung der Grenzschicht	5- 5
5.3.2.1	Beeinflussung der Grenzschicht durch Absaugung	5- 5
5.3.2.2	Selbsttätige Absaugung an der Flügelhinterkante	5- 5
5.3.2.3	Aktive Beeinflussung der Absaugung	5- 6
5.3.2.4	Grenzschichtbeeinflussung durch Ausblasen	5- 6
6	<b>Auftrieb</b>	6- 1
6.1	<b>Allgemeines</b>	6- 1
6.2	<b>Experimentelle Bestimmung des Auftriebs und Untersuchung der zugeordneten Strömungsvorgänge</b>	6- 1
6.3	<b>Theoretische Verfahren (Modelle) zur Berechnung des Auftriebs</b>	6- 1
6.4	<b>Aufgelöste Polare</b>	6- 3
7	<b>Widerstand</b>	7- 1
7.1	<b>Allgemeines</b>	7- 1
7.2	<b>Widerstandsbilanz</b>	7- 2
7.3	<b>Bemerkungen zu den flugphysikalischen Zusammenhängen der Widerstandsbilanz</b>	7- 4
7.4	<b>Beschreibung der Teilwiderstände der Widerstandsbilanz</b>	7- 6

<b>Kap.</b>	<b>Thema</b>	<b>Seite</b>
7.4.1	Reibungswiderstand	7- 8
7.4.2	Druckwiderstand	7-12
7.4.3	Profilwiderstand	7-12
7.4.4	Induzierter Widerstand	7-15
7.4.4.1	Induzierter Widerstand	7-15
7.4.4.2	Induzierter Anstellwinkel	7-16
7.4.4.3	Induzierter Zusatzwiderstand durch Flügelverwindung	7-17
7.4.4.4	Widerstand und Fluggeschwindigkeit	7-19
7.4.4.5	Widerstand nicht planarer Flügel-Systeme	7-21
7.4.5	Trimmwiderstand	7-21
7.4.6	Interferenzwiderstand	7-22
<b>7.5</b>	<b>Einfluss von Regen und Vereisung auf Aerodynamik und Flugmechanik</b>	<b>7-24</b>
7.5.1	Einfluss von Regen	7-24
7.5.2	Einfluss von Eisansatz	7-25
<b>7.6</b>	<b>Darstellung von Auftrieb und Widerstand in Polaren</b>	<b>7-26</b>
7.6.1	Widerstandspolare	7-26
7.6.2	Aufgelöste Polare	7-27
7.6.3	Geschwindigkeitspolare	7-27
<b>7.7</b>	<b>Methoden der Widerstandsbestimmung</b>	<b>7-28</b>
7.7.1	Messmethoden	7-28
7.7.2	Rechenmethoden	7-28
<b>8</b>	<b>Entwurf und Auslegung</b>	<b>8- 1</b>
<b>8.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8- 1</b>
8.1.1	Entwurfsgrundsätze	8- 2
8.1.2	Entwurfsziel	8- 3
<b>8.2</b>	<b>Entwurfsablauf</b>	<b>8- 5</b>
8.2.1	Zusammenfassung der Ideen und Vorstellungen	8- 5
8.2.2	Spezifikation	8- 5
8.2.3	Datensammlung	8- 5
8.2.4	Auftragen und Auswerten der Daten	8- 6
8.2.4.1	Detaillierte Ausarbeitung und Verfeinerung des Entwurfs	8- 9
8.2.4.2	Endgültiger Entwurf und Dokumentation	8- 9
8.2.5	Hauptauslegungsparameter, Geometrie und Leistungsbedarf für den ersten Entwurf	8- 9
8.2.6	Wahl der Konfiguration	8- 10
8.2.7	Wahl der Bauweise	8- 11
8.2.8	Übersichtszeichnung	8- 13
8.2.9	Erste Gewichts-(Massen-) und Schwerpunktsrechnung	8- 13
8.2.10	Abschätzung/Berechnung der Flugzeugpolare und des Schubverlaufs	8- 14
8.2.11	Berechnung der Flugleistungen	8- 15
8.2.12	Berechnung der statischen Längsstabilität	8- 15
8.2.13	Detaillierte Ausarbeitung und Verfeinerung des Entwurfs	8- 15
8.2.14	Entwurfsdokumentation	8- 16
8.2.15	Entwurfsablaufplan	8- 16

Kap.	Thema	Seite
<b>8.3</b>	<b>Konfigurationsgruppen</b>	<b>8- 19</b>
8.3.1	Einleitung	8- 19
8.3.2	Schema der Konfigurationsgruppen	8- 19
8.3.3	Kommentar zum Schema der Konfigurationsgruppen	8- 23
8.3.4	Diskussion einiger interessanter Entwurfs- und Entwicklungsbeispiele aus Verschiedenen Bereichen der Luftfahrt	8- 25
8.3.4.1	Zur Enten-(Canard-)Konfigurations-Variante	8- 26
8.3.4.2	Zur Normal-KonfigurationsVariante	8- 26
8.3.4.3	Zur Doppeldecker-NormalKonfigurationsVariante	8- 26
8.3.4.4	Zur Endform der OV-10 A	8- 26
8.3.5	Spezifische Eigenschaften der Konfigurationsgruppen	8- 31
8.3.5.1	NORMAL-Konfiguration als Eindecker	8- 31
8.3.5.2	ENTEN-(CANARD)Konfiguration	8- 35
8.3.5.3	DREI-FLÄCHEN-Konfiguration	8- 38
8.3.5.4	TANDEM-Konfiguration	8- 38
8.3.5.5	HALL-WARREN-, JOINED-WING- und KASTENFLÜGEL-Konfigu- ration	8- 42
8.3.5.6	NURFLÜGEL-Konfigurationen	8- 44
8.3.6	Parametrischer Vergleich der aerodynamischen Eigenschaften von Zwei- und Drei-Flächen-Systemen	8- 63
8.3.7	Zusammenfassung und Hinweise zur Wahl einer Konfiguration	8- 67
8.3.8	Einige unkonventionelle aerodynamische Konzepte und Konfigurationen	8- 68
<b>8.4</b>	<b>Gesamtentwurf, dessen Aspekte, Problembereiche und Möglichkeiten</b>	<b>8- 75</b>
8.4.1	Vorwort	8- 75
8.4.2	Zu den Bauvorschriften und zum V-n-Diagramm	8- 75
8.4.3	Aspekte und Probleme von "kleinen" und "leichten" Flugzeugen	8- 81
8.4.3.1	Spezifische Problembereiche des KLEINEN und LEICHTEN Flugzeugs	8- 81
8.4.4	Aspekte und Probleme des effizienten Langsam- und Schnellflugs	8- 85
8.4.5	Aspekte und Problematik der Aerolastik	8- 91
8.4.5.1	Ursachen des Flatterns bzw. der Neigung zum Flattern	8- 92
8.4.5.2	Maßnahmen zur Flattervorbeugung	8- 93
8.4.6	Aspekte der Flügelhochlage	8- 97
8.4.6.1	Hochdecker	8- 97
8.4.6.2	Mitteldecker	8- 98
8.4.6.3	Tiefdecker	8- 98
8.4.6.4	Doppeldecker	8- 99
8.4.6.5	Grundsatzuntersuchungen zum Einfluss der Flügelhochlage auf die Polare	8-100
8.4.7	Aspekte und Probleme des Rumpf-Flügel-Übergangs, der Querschnitts- verteilung und der gespülten Oberfläche	8-105
8.4.7.1	Aspekte des Widerstandsverhaltens	8-105
8.4.7.2	Querschnittsverteilung und gespülte Oberfläche des Rumpfes	8-106
8.4.8	Aspekte der Propeller- und Triebwerks-Anordnung	8-111
8.4.8.1	Einbauwirkungsgrad des Propellers	8-111
8.4.8.2	Direkte Effekte des Propellers	8-112
8.4.8.3	Indirekte Effekte des Propellers	8-112
8.4.8.4	Zusammenfassung der Eigenschaften von Zug- und Druckpropelleranord- nungen	8-113
8.4.9	Modelle und Attrappen als Entwurfshilfen	8-119
8.4.9.1	Stationäre Modelle	8-119

<b>Kap.</b>	<b>Thema</b>	<b>Seite</b>
8.4.9.2	Fliegende Modelle	8-121
8.4.9.3	Zu den Modellen	8-121
8.4.9.4	Zum Modellbau	8-122
8.4.9.5	Die "Flugerprobung" der Modelle	8-122
8.4.9.6	Das Anschauungsmodell	8-122
8.4.9.7	Die Attrappe und das Detailfunktionsmodell	8-123
8.4.10	Zu den Zusammenhängen und Einflüssen der Entwurfsgrößen und Aerodynamik, Stabilität, abhängigen geometrischen Größen und die Komponenten-Gewichte (-Massen)	8-131
8.4.10.1	Flügelstreckung $\Lambda = b^2/s$	8-131
8.4.10.2	Flügelzuspitzung $l_a/l_i$	8-132
8.4.10.3	Flügelpfeilform $\varphi_{25}$	8-132
8.4.10.4	Flügel-Profilwölbung $f$	8-133
8.4.10.5	Relative Profildicke $d/l$ des Flügels	8-133
8.4.10.6	Flügel-V-Form	8-133
8.4.10.7	Flügelhochlage, generell	8-134
8.4.10.8	Freitragender Flügel	8-134
8.4.10.9	Abgestrebter Flügel	8-135
8.4.10.10	Verspannte Flügel	8-135
8.4.10.11	Flügelhochlage und Längsstabilität	8-136
8.4.10.12	Höhenleitwerkshebelarm $r_H$	8-136
8.4.10.13	Seitenleitwerkshebelarm $r_s$	8-136
8.4.10.14	Relative Rumpfdicke $D^*/L_R$	8-136
8.4.10.15	Zusammenfassung der Entwurfsgrößen und ihrer gegenseitigen Einflüsse	8-136
8.4.10.16	Flugeigenschaften	8-137
8.4.11	Entwurfsdaten und Parameter	8-141
8.4.11.1	Sehr kurze Startstrecken	8-141
8.4.11.2	Große Steiggeschwindigkeiten	8-141
8.4.11.3	Große Maximalgeschwindigkeiten	8-142
8.4.11.4	Sehr kleine Landstrecken	8-142
8.4.11.5	Flugphasen und Parameter-Statistiken	8-143
8.4.11.6	Zusammenfassung	8-145
8.4.11.7	Geometrische Entwurfsdaten	8-146
8.4.11.8	Geometrische Entwurfsdaten der anderen Konfigurationen	8-148
8.4.11.9	Darstellung der Form-, Parameter- und Leistungsentwicklung anhand der Verschiedenen Flugzeugkategorien der Bauvorschriften	8-152
<b>8.5</b>	<b>Komponentenentwurf und -auslegung</b>	<b>8-173</b>
8.5.1	Tragflügel	8-173
8.5.1.1	Allgemeines zur Flügelauslegung	8-173
8.5.1.2	Bestimmung der Flügelfläche	8-177
8.5.1.3	Wahl der Flügelform	8-177
8.5.1.4	Wahl des Flügelprofils	8-195
8.5.1.4.1	"Turbulenz"- oder "Laminar"-Profil	8-196
8.5.1.4.2	Profildicke	8-196
8.5.1.4.3	Profilwölbung	8-197
8.5.1.4.4	Profile für Nurflügel-Flugzeuge	8-198
8.5.1.5	Endscheiben, Winglets, besondere Randbogenformen	8-208
8.5.1.5.1	Prinzipielle Funktion von Endscheiben, Winglets und besonderen Randbogenformen	8-208

Kap.	Thema	Seite
8.5.1.5.2	Besondere Randbogenformen	8-211
8.5.1.5.3	Variable Flügelenden	8-213
8.5.1.6	Flügel-Endkanten-, Nasen-Klappen und Vorflügel als Auftriebshilfen	8-219
8.5.1.6.1	Zu den spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Klappen	8-221
8.5.1.7	Ruder, Spoiler und Bremsklappen	8-237
8.5.1.7.1	Ruder allgemein	8-237
8.5.1.7.2	Querruder	8-237
8.5.1.7.3	Spoiler	8-238
8.5.1.7.4	Bremsklappen	8-239
8.5.2	Höhenleitwerk	8-247
8.5.2.1	Allgemeines zur Höhenleitwerksfunktion	8-247
8.5.2.2	Gesamtauslegung	8-247
8.5.2.3	Höhenleitwerksstreckung	8-248
8.5.2.4	Ruderauslegung	8-250
8.5.3	Seitenleitwerk	8-259
8.5.3.1	Allgemeines zur Seitenleitwerksfunktion	8-259
8.5.3.2	Gesamtauslegung	8-259
8.5.3.2	V-Leitwerk	8-260
8.5.4.	Rumpf	8-263
8.5.4.1	Gesamtauslegung	8-263
8.5.4.2	Cockpit-/Kabinenauslegung	8-263
8.5.4.3	Rumpfwurf	8-264
8.5.4.4	Äußere Triebwerksaerodynamik	8-268
8.5.4.5	Innere Triebwerksaerodynamik	8-270
8.5.5	Fahrwerk	8-283
8.5.6	Propellerauslegung	8-289
8.5.6.1	Vorbemerkung	8-289
8.5.6.2	Zur Aerodynamik und Physik des Propellers	8-289
8.5.6.3	Blatt-Geometrie	8-290
8.5.6.4	Propellerauslegung	8-292
8.5.6.5	Sonderformen des offenen Propellers	8-294
8.5.6.5.1	Propeller mit "Proplets"	8-294
8.5.6.5.2	Bi-Propeller	8-294
8.5.6.5.3	Mantel-Propeller und Vielblattpropeller	8-294
8.5.6.6	Propellerlärm	8-295
8.5.6.7	Einfluss von Eisansatz auf den Propellerwirkungsgrad	8-295
<b>8.6</b>	<b>Gewichts-(Massen-)Statistik und einige Hinweise zum Strukturaufbau kleiner Flugzeuge</b>	<b>8-309</b>
<b>8.7</b>	<b>Schwerpunktbestimmung</b>	<b>8-333</b>
<b>9</b>	<b>Praktische Entwurfsaerodynamik (analytische und vergleichende Verfahren)</b>	<b>9- 1</b>
<b>9.1</b>	<b>Allgemeines zum Problem der Widerstandsbestimmung</b>	<b>9- 1</b>
<b>9.2</b>	<b>Abschätzung des Nullwiderstands nach dem analytisch-additiven Verfahren</b>	<b>9- 1</b>
<b>9.3</b>	<b>Rückrechnung des Nullwiderstands ausgeführter Flugzeuge über die Leistungsangaben der Hersteller und Vergleich mit dem eigenen Entwurf</b>	<b>9- 18</b>

Kap.	Thema	Seite
<b>9.4</b>	<b>Abschätzung des Null- oder Minimalwiderstands mit dem <math>C_{w0}</math>-S/O-Verfahren für Entwurfszwecke</b>	<b>9- 20</b>
<b>9.5</b>	<b>Verfahren zur Abschätzung/Berechnung des anstellwinkel- bzw. auftriebsabhängigen Widerstands</b>	<b>9- 31</b>
9.5.1	Vorbemerkung	9- 31
9.5.2	Zum Verfahren	9- 31
<b>9.6</b>	<b>Polaren ausgeführter Flugzeuge</b>	<b>9- 32</b>
9.6.1	Generelles	9- 35
9.6.2	Zu den Abbildungen	9- 35
9.6.3	Zum OSWALD-Faktor $e$	9- 36
9.6.4	Zu den Einzeldarstellungen	9- 37
<b>10</b>	<b>Flugmechanik</b>	<b>10- 1</b>
<b>10.1</b>	<b>Flugleistung</b>	<b>10- 1</b>
10.1.1	Grundlagen der Flugleistungsrechnung	10- 1
10.1.2	Leistungsgleichungen	10- 4
10.1.3	Startstrecke	10- 7
10.1.4	Landung	10- 8
10.1.5	Reichweite und Flugdauer	10- 9
10.1.6	Besondere Punkte der Widerstandskurve über der Fluggeschwindigkeit	10- 9
<b>10.2</b>	<b>Flugeigenschaften</b>	<b>10 17</b>
10.2.1	Allgemeines zu den Flugeigenschaften	10-17
10.2.1.1	Zur Entwicklung der Flugeigenschaften	10-17
10.2.1.2	Zu den Flugeigenschaften	10-17
10.2.1.3	Grundsätzliches zur Flugmechanik und den Flugeigenschaften	10-18
10.2.2	Längsstabilität	10-20
10.2.2.1	Grundlage der Längsstabilität	10-20
10.2.2.2	Definition der Längsstabilitätsgradienten	10-21
10.2.2.3	Einfluss des Abwinds auf die statische Längsstabilität	10-21
10.2.2.4	Bestimmung (Berechnung) der Längsstabilität	10-22
10.2.2.5	Einfluss der Propellerposition in X-Richtung	10-22
10.2.2.6	Einfluss der Flügelhochlage auf die Längsstabilität	10-23
10.2.3	Quer- und Seitenstabilität	10-33
10.2.3.1	Querstabilität	10-33
10.2.3.2	Seitenstabilität (Windfahnenstabilität)	10-34
10.2.3.3	Wechselwirkung zwischen Quer- und Seitenbewegung	10-35
10.2.4	Trudeln	10-39
10.2.5	Steuerbarkeit und Beurteilung der Flugeigenschaften	10-43
10.2.5.1	Zur Steuerbarkeit	10-43
10.2.5.2	Zur Trimmbarkeit	10-45
10.2.5.3	Abschließende Bemerkungen zur Stabilität und Steuerbarkeit	10-45
10.2.6	Zur Beurteilung der Flugeigenschaften	10-47
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>11- 1</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>12- 1</b>
<b>13</b>	<b>Schlagwortverzeichnis</b>	<b>13- 1</b>