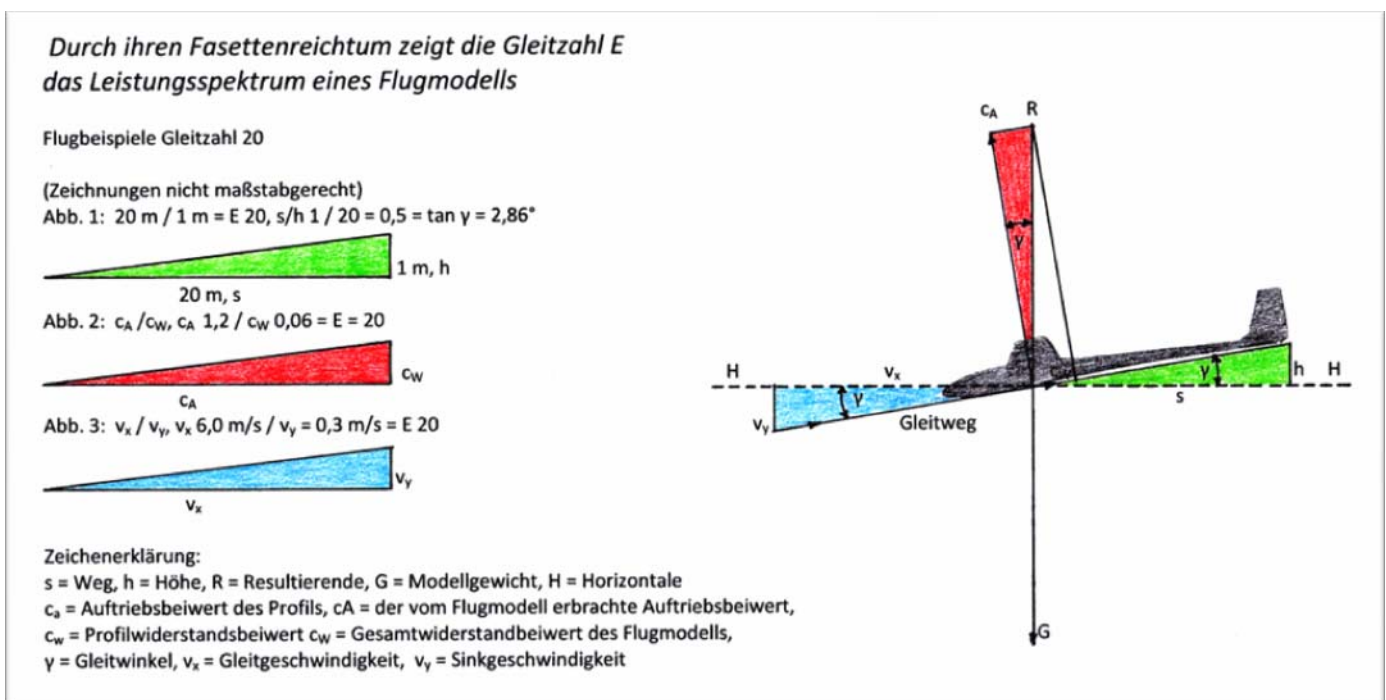


Die Gleitzahl E und ihre Begleiter

Benützen Sie bitte, so weit erforderlich, während des Lesens die am Ende des Artikels angeführten Erläuterungen

Zum Begriff: Die mit dem Buchstaben E gekennzeichnete Gleitzahl (-) sagt aus, wie weit ein Flugmodell aus einer bestimmten Höhe zu gleiten imstande ist. Wie schon ihr Name sagt, geht es bei ihr ums Gleiten und wie noch gezeigt wird, spielt die Gleitgeschwindigkeit bei ihr nur eine Nebenrolle. Eine bestimmte Gleitzahl E kann bei kleiner oder großer Gleitgeschwindigkeit v_x erzielt werden. E ist schlicht und einfach eine Verhältniszahl aus zurückgelegter Strecke und Starthöhe.

Fliegt ein Modell aus einem Meter Höhe 20 m weit, dividiert man die Strecke durch die Höhe, also $20 \text{ m} / 1 \text{ m}$ und erhält damit die Gleitzahl $E = 20$. Oder bei $s = 20 \text{ m} / h = 2 \text{ m}$ ist $E = 10$ usw. Je weiter ein Modell aus einer bestimmten Höhe fliegt, umso größer wird E . Hinter E versteckt sich auch der Gleitwinkel γ , ein in der Fliegersprache gerne benützter Ausdruck, denn mit $E = 20$ ist er der \arctan aus Höhe / Strecke; $1 / 20 = 0,05 = 2,86^\circ$. Das Modell gleitet also unter einem „Bahnneigungswinkel“ (so der Fachausdruck für Gleitwinkel) von $2,86^\circ$ zur Erde. Die Gleitzahl 20 aus diesem Beispiel stellt im Bereich Modellflug schon einen sehr guten Wert dar. Beim manntragenden Segelflugzeug wäre es die Gleitzahl 50 mit dem Gleitwinkel von $1,14^\circ$.



Die Gleitzahl E stellt sich nicht nur durch das eben genannte, simple Verhältnis aus Flugstrecke und Starthöhe dar, sondern ist auch ein Vexierbild der Flugmechanik: Mit c_A / c_w , z. B.: $1,2 / 0,06 = E = 20$. Oder mit v_x / v_y , z. B.: $6,0 \text{ m/s} / 0,3 \text{ m/s} = E = 20$. Ihre engsten Begleiter sind also die **Gleitgeschwindigkeit v_x** , die **Sinkgeschwindigkeit v_y** , der **Flächenauftriebsbeiwert c_A** (im Gegensatz zum c_a des Profils, mit großem A als vom Grundriss abhängigen Mittelwert) und c_w , mit großem W für den **Gesamtwiderstandsbeiwert**.

Wie weit all diese Begleiter mit der Gleitzahl E verknüpft sind oder sie beeinflussen und bei welchem Gleitertyp eine gute (hohe) Gleitzahl wünschenswert erscheint, sei nachstehend untersucht. Dafür und vorab noch 2 Beispielrechnungen für v_x und v_y :

Die **Gleitgeschwindigkeit v_x** wird durch die Formel $v \sqrt{1,65 \cdot (p / c_A)}$ (1) ausgedrückt; mit p als Flächenbelastung G/F (Gewicht G durch Fläche F), dem Wert $1,65$ für einen mittleren Luftzustand und c_A als dimensionslosem Beiwert des Flächenauftriebs. Für ein einfaches Beispiel zu v_x sei die Flächenbelastung ($G = 0,9 \text{ kg} / F = 0,45 \text{ m}^2$) oder $9 \text{ N} / 0,45 \text{ m}^2 = 20 \text{ g/dm}^2$ oder 20 N/m^2 und $c_A = 1,0$. Dann ergibt sich aus Formel (1) eine Gleitgeschwindigkeit v_x von $5,74 \text{ m/s}$.

Die **Sinkgeschwindigkeit v_y** ergibt sich aus der Formel $v \sqrt{1,65 \cdot p \cdot (c_w^2 / c_A^3)}$ (2). Zu den Größen der Formel (1) scheint in (2) noch der Gesamtwiderstand c_w auf. Er setzt sich aus den drei Widerständen c_w , c_{wi} , c_{wr} , = Profil-, Induzierter- und Restwiderstand zusammen. Für folgende Rechnungen und ein gut durchkonstruiertes und gebautes Modell, sei vorläufig für c_w als sicherer Mittelwert, $0,06$ (-) gewählt. Damit und den Werten aus (1), ist $v_y = 0,344 \text{ m/s}$ und mit den so errechneten Beispielergebnissen ergibt sich v_x / v_y die Gleitzahl $E = 16,68$. Als

Nebenaussagen: Die Gleitgeschwindigkeit v_x beträgt das 16,68fache der Sinkgeschwindigkeit v_y und der Auftrieb c_A das 16,68fache des Gesamtwiderstandes c_w .

In beiden Formeln hat man es neben einer Konstanten, mit dem am Messtag herrschenden Luftzustandswert, aber auch mit variablen und veränderlichen Größen zu tun. Variabel durch die Wahl des Konstrukteurs, veränderlich aus aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten.

(I) Auswirkungen auf die Gleitgeschwindigkeit v_x , durch Vergrößerung der Flächenbelastung p :

Baut man ein Flugmodell vorgegebener Größe schwerer, erhöht sich die Flächenbelastung – oder umgekehrt. Hierzu zwei Rechenreihen mit obigen Werten aus Formel (1), bei gleichbleibendem c_A 1,0:

$p =$	10	20	30	40	50	N/m^2 , (bei $c_A = 1,0$) dann ist die Gleitgeschwindigkeit
$v_x =$	4,06	5,74	7,03	8,12	9,08	m/s, dann ist der Prozentanstieg von z. B. 4,06 auf 5,74 m/s
gleich		41,37%	22,47%	15,5%	11,8%	

Bei jeweiliger Vergrößerung von p um 10 N, wächst v_x prozentuell nicht linear. Im niedrigen Flächenbelastungsbereich führt eine Erhöhung von p zu einer höheren Geschwindigkeit um 41,37%. Mit zunehmendem p wird der Prozentanteil immer kleiner. Bei einer Erhöhung von p von 40 auf 50 N/m^2 beträgt er nur mehr 11,8%!

(II) Auswirkungen auf die Sinkgeschwindigkeit v_y , durch Vergrößerung der Flächenbelastung p , bei

$P =$	10	20	30	40	50	N/m^2 , ist
$v_y =$	0,24	0,34	0,42	0,48	0,54	m/s. Der Prozentzuwachs von v_y
ist gleich		41,6%	23,5%	14,28%	12,5%	

Beim Vergleich von (I) und (II) fällt sofort auf: *Vorausgesetzt*, dass auch bei kleiner Flächenbelastung (kleinen Gleitgeschwindigkeiten) überkritische Strömung herrscht, wird bei steigenden Flächenbelastungen p die Gleitgeschwindigkeit v_x größer und die Sinkgeschwindigkeit v_y schlechter (höher).

Auffällig, aber wenig beachtet ist, dass bei **Änderung der Flächenbelastung p , keine Änderung der Gleitzahl E** eintritt. Mit steigender Flächenbelastung fliegt das Modell wohl immer *schneller: jedoch horizontal, wie auch vertikal (Gleiten/Sinken)*! Die zurückgelegte Strecke aber bleibt immer gleich. Eine Überprüfung aller v_x / v_y – Ergebnisse ergibt immer eine Gleitzahl E von 18,81!

Bei manchem Modellflieger mag dies Kopfschütteln hervorrufen. Bedenkt man jedoch, dass seit Anbeginn der Modellfliegerei immer gepredigt wurde, dass höhere Flächenbelastung p mit schlechterer Flugleistung einhergeht, scheint dies nicht verwunderlich. Gleitwinkel oder Gleitzahl sind lediglich Vergleichsgrößen. Aussagekräftige Größen eines Flugmodells sind die Gleitgeschwindigkeit v_x und die Sinkgeschwindigkeit v_y .

Die klassenspezifischen Zusammenhänge seien zunächst am Beispiel „Freiflugmodell“ erörtert. Bei diesen Modellklassen kommt es ausschließlich auf beste Sinkgeschwindigkeit v_y an. Das Modell soll möglichst lange oben bleiben und das erreicht man eben **nur** mit *bester Sinkgeschwindigkeit* v_y und diese wiederum, neben großem c_A , vor allem mit **geringer** Flächenbelastung p . Wie schnell sich das Modell vom Startplatz entfernt, entscheidet **hier** der Wind und wie schnell es seine Kreise dreht, ist dem Wettbewerber völlig egal. Mit welcher Geschwindigkeit sich das Modell fortbewegt, spielt keine Rolle. Ein F1A-Segler gleitet bei $p = 12 N/m^2$ und einem $c_A = 1,2$ mit gemächlichen 4,06 m/s dahin. Theoretisch, also bei Windstille, würde er zum Durchfliegen einer geraden Strecke von 100 m, 24,6 Sekunden benötigen. Mit Ausnahme der Klasse F1E ist also bei den Freiflugmodellen der **Leistungsträger die Sinkgeschwindigkeit v_y !**

Bei den Magnetseglern (F1E) müsste vor jedem Flug die Gleitgeschwindigkeit v_x der herrschenden Windgeschwindigkeit durch Flächenbelastungskorrektur angepasst werden. Bei Windstille sollte p der Mindestgrößenvorschrift [12 g/dm^2] entsprechen, also dem Optimum für beste Sinkgeschwindigkeit v_x .

Konträr hierzu ein Extrembeispiel der Fernsteuer-Klasse F3F. Hier gilt es, festgelegte Strecken in kürzest möglicher Zeit, also mit hoher Geschwindigkeit zu durchfliegen. Dafür, aber auch um den extrem hohen Windgeschwindigkeiten Paroli bieten zu können, benötigen die F3F-Piloten besonders schnelle Segler. Dies gelingt ihnen im Wesentlichen durch **hohe** Flächenbelastungen p . Als Beispiel sei ein Segler mit 0,5 m^2 Flügelfläche bei einem Gewicht von 5 kg angeführt, der bei einem c_A von 0,8 eine Gleitgeschwindigkeit v_x von 14,36 m/s entwickelt.

Das verwendete Profil spielt dabei natürlich auch mit. Würde bei gleicher Flächenbelastung ein nur um 0,25% dickeres Profil Verwendung finden, das nun bei bester Profilgleitzahl ein c_A von 1,0 erreicht, verringert sich die Gleitgeschwindigkeit v_x um immerhin 1,52 m/s auf 12,84 m/s. Natürlich verbessert sich die Sinkgeschwindigkeit, aber auf die wird hier nicht Wert gelegt. Den benötigten Auftrieb besorgt ja bereits der Hangaufwind. Daher findet man bei diesen Modellen meist dünne, widerstandsarme, wenig Auftrieb liefernde Flügelprofile. Berechnet man die Sinkgeschwindigkeit v_y für oben genanntes Modell bei einer Fluggeschwindigkeit v_x von 14,36 m/s, dann ist v_y bei einem c_w von 0,05 = 0,897 m/s, was einer Gleitzahl E von 16,5 entspricht. Aber auch die interessiert den F3F-Piloten wenig, denn hohe Gleitzahlen erreicht man, wie eingangs zu ersehen, mit hohen c_A -Werten, bzw. und

kleinen Sinkgeschwindigkeiten. Der F3F-Pilot ist ausschließlich auf Fluggeschwindigkeit v_x erpicht. Die 100 m-Strecke durchfliegt er im Gegensatz zu obigem Freiflug-Beispiel in 6,9 Sekunden. Hier ist der **Leistungsträger allein die Gleitgeschwindigkeit v_x !**

Noch sind aber nicht alle Parameter auf ihre Auswirkungen näher betrachtet worden. Wie wirkt z. B. die variable Größe c_A auf v_x und v_y ein?

(III) Auswirkung auf v_x durch Vergrößerung von c_A : (bei $p = 20 \text{ N/m}^2$)

$c_A =$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,	dann ist
$v_x =$	6,86	6,42	6,05	5,74	5,47	m/s. Die prozentuelle Abnahme von v_x bei c_A - Erhöhung beträgt
		6,85%	5,76%	5,40%	4,93%	

Man erkennt mit größer werdendem c_A eine mäßige Geschwindigkeitsabnahme. Erhöht man c_A 0,7 auf c_A 1,0, also um 42,8%, beträgt die Geschwindigkeitsabnahme insgesamt lediglich 25,4 %. Der **negative Einfluss** von c_A auf die **Fluggeschwindigkeit v_x und die Gleitzahl E** durch Geschwindigkeitsabnahme, ist eher mäßig.

(IV) Auswirkung auf v_y durch Vergrößerung von c_A : (bei $p = 20 \text{ N/m}^2$)

$c_A =$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	dann ist
$v_y =$	0,588	0,481	0,403	0,344	0,298	m/s. Die prozentuelle Verringerung von v_y beträgt
		22,2%	19,35%	17,15%	15,43%	

Gegenüber dem Vergleich (III) ist bei (IV) eine starke Einflussnahme auf v_y bemerkbar.

Dazu eine Gleitzahl-Vergleichsrechnung (bei konstanter Flächenbelastung p (20 N/m^2)) für fünf c_A -Werte von c_A 0,7 bis c_A 1,1: dann ist $E = 11,66, 13,34, 15,01, 16,68$ und $18,35!!!$ Eine Nachrechnung zeigt die gleichen E-Werte auch bei anderen Flächenbelastungen! **Eine Vergrößerung von c_A wirkt sich nicht nur positiv auf die Sinkgeschwindigkeit v_y aus, sondern verbessert auch die Gleitzahl E beträchtlich!!!** Daher ist es nur logisch, dass extrem langsam fliegende Segler, trotz geringer Flächenbelastungen, sehr hohe Gleitzahlen erreichen können.

Aus all dem ist ersichtlich:

- Hohe Auftriebs- und geringe Widerstandsverhältnisse, aber auch geringe Gleit- und niedrige Sinkgeschwindigkeit bewirken optimale Gleitzahlen. Im Bereich Modellflug mit Gleitzahlen um 20, beim bemannten Segelflug jedoch, wegen des viel günstigeren Auftriebs- und Widerstandsverhältnisses, Gleitzahlen um 50. Für den Streckenflug sind hohe Gleitzahlen ein Muss. Die Flächenbelastung nimmt auf die Gleitzahl keinen Einfluss. Hohe Gleitzahlen kann man bei extrem langsam, als auch schnell gleitenden Flugmodellen erreichen.
- Der auf Speed (v_x) Bedachte ist ausschließlich auf Geschwindigkeit aus. Er treibt die Flächenbelastung p in die Höhe, vernachlässigt aber die Sinkgeschwindigkeit v_y , unter Berücksichtigung möglichst geringer Gesamt-Widerstände. Den erforderlichen Auftrieb liefert ja der Hangaufwind. Die Profilform zeigt moderate Auftriebswerte und ihre Dicke wird von der Tragflächen-Festigkeit bestimmt. Die Gleitzahl ist hier ein Mitläufer.
- Der Freiflieger hingegen, wird zunächst all sein Augenmerk auf gute Sinkgeschwindigkeit v_y richten, die er durch hohe c_A -Werte und geringste Gesamtwiderstandswerte c_w erzielt. Flugmechanisch befindet sich im Bereich besten Sinkens glücklicherweise auch der vom Optimum nur geringfügig kleinere Gleitzahlwert. Der RC-Pilot der ähnliche Schleicher-Typen fliegt, muss jedoch trotz guter Gleitzahl zur Erreichung des Landeplatzes bei der Landeinteilung auf die geringe Gleitgeschwindigkeit v_x achten, bzw. macht es wenig Sinn, bei Windgeschwindigkeiten zu fliegen, die v_x überschreiten!
- Der Alltagsmodellflieger, der bei windigerem Wetter lange oben bleiben möchte, sich beim Thermikkurbeln weit von der Startstelle entfernt und bei einem Absauser diese noch erreichen möchte, sollte einen Kompromiss aus v_x und v_y wählen. Dabei sollte die Flächenbelastung G/F mindestens 30 N/m^2 betragen, auch wenn jedes Gramm Mehrgewicht auf die Steiggeschwindigkeit beim Motorflug Einfluss nimmt. Ansonsten siehe Freiflug.
- Eine Gleitzahl 20 besagt schließlich auch noch, dass das Flugmodell aus 100 m Höhe 2 km weit fliegen kann, seine Gleitgeschwindigkeit dabei das 20 fache seiner Sinkgeschwindigkeit und sein Auftrieb das 20fache des Modell-Gesamtwiderstandes beträgt. © Oskar Czepa

Erläuterungen:

c_a : Polardiagramme von Profilen lassen erkennen: der Auftrieb ändert seinen Wert mit der Profilform, dem Ein(An)stellwinkel und der Anström(Flug)geschwindigkeit! c_a und c_w sind dimensionslose Beiwerte, um Auftrieb und Widerstand, insbesondere ihrer Profilform entsprechend, genauer bestimmen zu können. (Von der Hohlkugel bis zum Stromlinienkörper reduzieren sich diese Formwerte von c_w 1,4 bis auf c_w 0,012).

c_A : Durch diese Schreibung mit dem Großbuchstaben A wird eine weitere Verfeinerung des Profil-Auftriebsbeiwertes c_a vorgenommen. Es wird damit der vom Flugmodell erbrachte und vom *Flügelgrundriss* abhängige mittlere Auftriebsbeiwert dargestellt. Er findet bei Flugmodellleistungsrechnungen Anwendung.

Hier kommt auch die **Profilgleitzahl** ins Spiel. Sie ist der Quotient aus c_a / c_w . Durch geschickte Formgebung ist es möglich, Profile mit hohen c_a - und kleinen c_w -Werten, also mit hohen Profilgleitzahlen zu erstellen, auch für relativ kleine, also Modellflug- Re-Zahlen (siehe unter letzte Bilder bei „Der Modellflieger...“ für E-Motorsegler „Mungo“).

Profilform: dünne symmetrische Profile erzeugen wenig Auftrieb, zeichnen sich aber durch sehr kleine Widerstände aus. Im Vergleich dazu bringen dickere Profile mit konkaver Unterseite, hohe c_a , jedoch auch höhere c_w -Werte. Man beachte also: **Für den Entwurf eines bestimmten Modelltyps und den damit verbundenen Eigenheiten ist die Profiwahl entscheidend!**

An(Ein)stellwinkel: Aus dem Polardiagramm erkennt man aber auch, bei welchem c_a -Werten das beste Gleiten oder das geringste Sinken ein Profil liefert. Diese Alternativwerte sind bei der Flugmodellberechnung für Schwerpunkt und EWD (Einstellwinkeldifferenz) bestimmend.

Anströmgeschwindigkeit: Hier ist die **Reynold'sche Zahl Re** das Um und Auf. Sie nimmt im Größenbereich des Flugmodells eine besondere Stellung ein. Vereinfacht beschrieben ist sie das Produkt aus Fluggeschwindigkeit v_x , Flügeltiefe t , und der Hilfszahl 70 für den Luftzustand. Ist die Anströmgeschwindigkeit (v_x) oder Flügeltiefe, oder gar beides, zu gering, stellt sich am Tragflügel ein unterkritischer Strömungszustand ein. Erst durch v_x - Erhöhung oder größere Flügeltiefen gelangt die Tragfläche in den überkritischen Re-Zahlbereich. Dies bewirkt eine bis zu 3-mal! günstigere Gleitzahl, als im unterkritischen Flugzustand!!!

Jeder Flugmodelltyp verlangt also seine aerodynamischen und flugmechanischen Eigenheiten. Wer immer sich der Mühe unterzieht, ein Flugmodell zu entwerfen und sei es nur ein einfaches Anfänger-RC-Segelflugmodell, sollte **grundlegend** beachten, dass die vom ihm entworfene Tragfläche mit dem ausgewählten Flügelprofil, mittels entsprechender Flächenbelastung p , die erforderliche Re-Zahl bzw. Fluggeschwindigkeit erzielt, um im überkritischen Flugzustand zu arbeiten! Sonst ist alles Vorhergesagte für die Katz!

Zusammengefasst: im Bereich von bester Gleitzahl c_a / c_w max (etwas kleinerer Anstellwinkel) oder bester Sinkleistung c_w^2 / c_a^3 max (etwas größerer Anstellwinkel) sind die Unterschiede von c_a gering. **Durch Re-Zahländerung** (im überkritischen Bereich) findet im **Modellflugbereich** durch c_a **keine nennenswerte Änderung und Beeinflussung der Gleitzahl** statt.

Damit sei dem Auftriebsbeiwert c_a (c_A) Genüge getan und schließlich der Widerstandsbeiwert c_w behandelt.

c_w : Im Vergleich zu c_a geht der Profilwiderstandsbeiwert c_w andere Wege. Betrachtet man die Messwerte eines Mehrfachpolardiagramms, das die Polaren eines Profilstyps bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und damit auch Re-Zahlen zeigt, fällt sofort auf, dass die Profil c_w -Werte mit größer werdender Re-Zahl, also bei **größeren Flügeltiefen** und (oder) **steigenden Fluggeschwindigkeiten** (Anströmgeschwindigkeiten) **beträchtlich** kleiner werden! **Daraus leitet sich die Leistungsüberlegenheit größerer Flugmodelle, und erst recht mantragender Flugzeuge ab.**

c_{wi} : die Formel des entweder vom elliptischen oder trapezförmigen Tragflügelumriss abhängigen **induzierten Widerstandes** c_{wi} lautet $c_a^2 / (\pi * \Lambda)$. Bei Rechteckgrundriss wird das Formelergebnis noch mit 1,05 multipliziert. Unter dem Bruch steht Λ (Lambda) für die Flügelstreckung b^2/F , mit b der Flügelspannweite. c_{wi} wächst also mit dem Quadrat von c_a und verkleinert sich, umso größer die Streckung wird. Erstmals zeigt c_a einen negativen Einfluss und will man c_{wi} bei großem c_a klein halten, erreicht man dies nur durch große Streckung.

c_{wr} : der Restwiderstand wird durch Bauteile verursacht, die keinen Auftrieb erzeugen, aber auch durch Interferenzwiderstände der ineinander übergehenden Bauteile. Eine Erklärung, wie man c_{wr} klein hält, erübrigt sich wohl.

Aus diesen drei Widerständen, dem Profilwiderstand c_w , dem induzierten Widerstand c_{wi} und dem Restwiderstand c_{wr} setzt sich der Gesamtwiderstand c_w (verschiedentlich auch c_w' geschrieben) zusammen. Im Gegensatz zum Auftrieb, der kein Freund der Gleitgeschwindigkeit ist, nimmt der Gesamtwiderstand c_w für sich in Anspruch, durch Verbesserung der Gleitgeschwindigkeit v_x und der Sinkgeschwindigkeit v_s , der Garant für ansprechende Gleitzahlen E zu sein.

Luftzustand-Mittel in Bodennähe: 1,225 (kg/m³) für die Luftdichte ρ und für $\rho/2$ (sprich rho halbe) = 0,6125, bei 15° C.