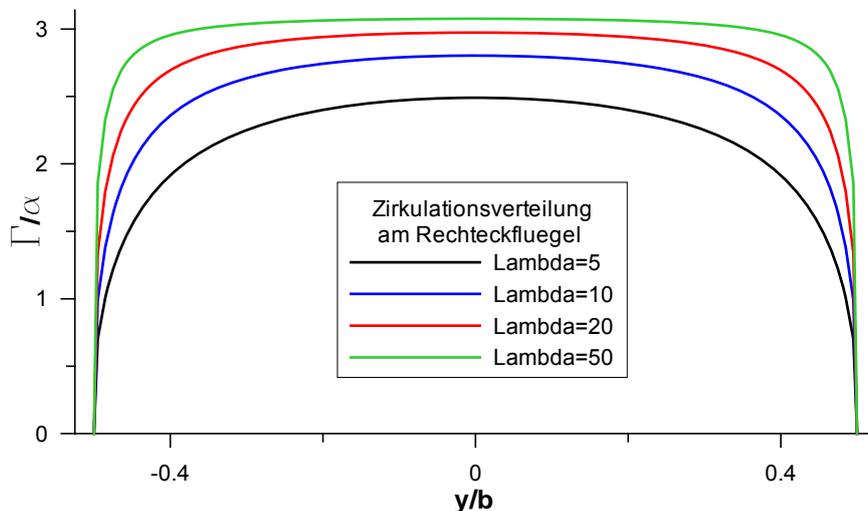
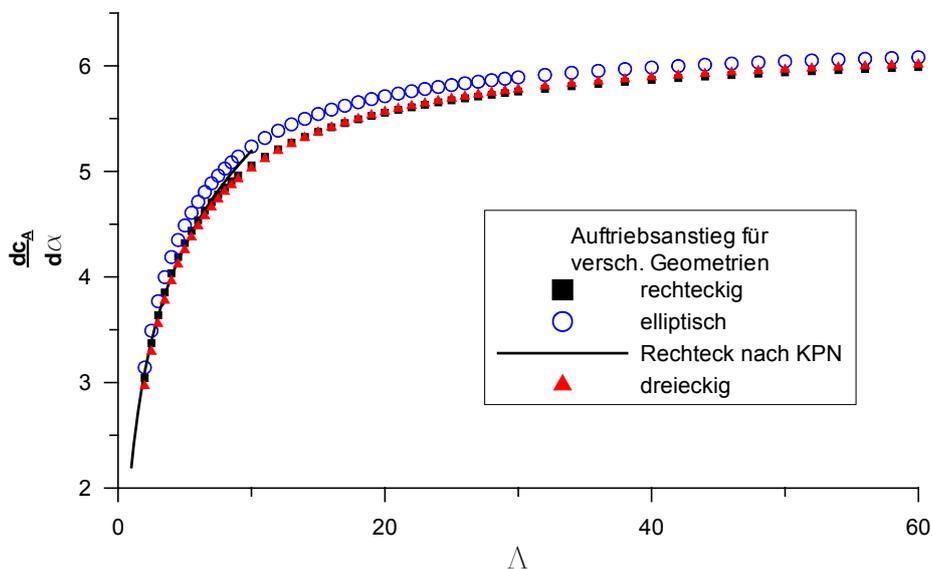


Ausgewählte Lösungen zu Auftriebsanstieg und induziertem Widerstand (ebene, unverwundene Flügel verschiedener Geometrien und Streckungen)

Alle Anstellwinkel sind Differenzen zum jeweiligen Nullauftriebswinkel, gelten also exakt für dünne symmetrische Profile, welche in ihrem Auftriebsverhalten der potentialtheoretischen Lösung für die ebene Platte nahe kommen.

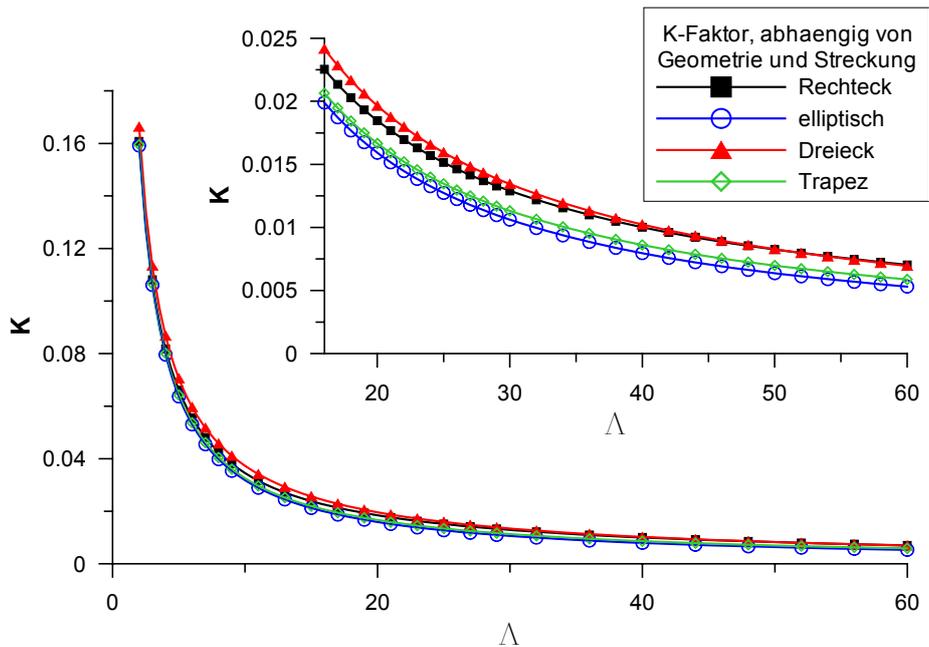


Für geringe Streckungen ist die Auftriebsverteilung relativ unabhängig von der übrigen Geometrie, die großen induzierten Anstellwinkel verschmieren sie immer zu einer nahezu elliptischen Form. Mit steigender Streckung jedoch werden diese geringer und die Zirkulationsverteilung nähert sich der Form des Flügelgrundrisses an.

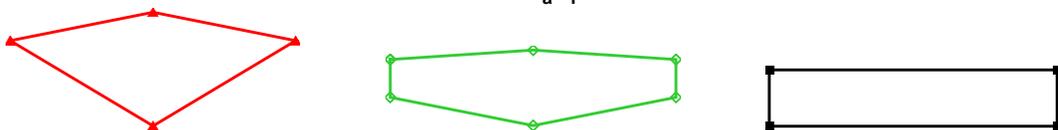
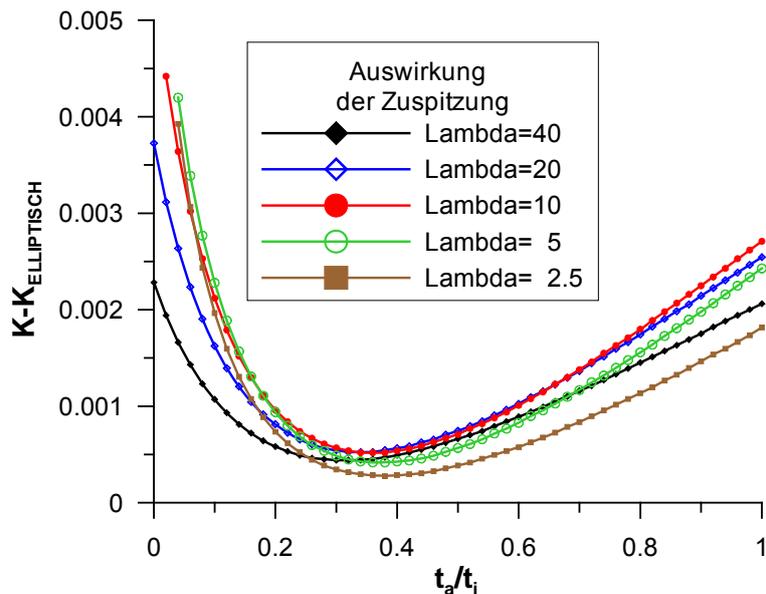


Das hat direkte Auswirkungen auf den Auftriebsanstieg, der zunächst fast nur von der Streckung abhängt, erst bei schlankeren Flügeln treten andere Geometrieparameter in den Vordergrund.

Vor allem beim induzierten Widerstand ist der Einfluss der Streckung dominant gegenüber allen anderen Geometrieparametern. Als eine direkte Folge der Auftriebsverteilung reagiert er erst bei großen Streckungen auf Zuspitzung und andere Merkmale.

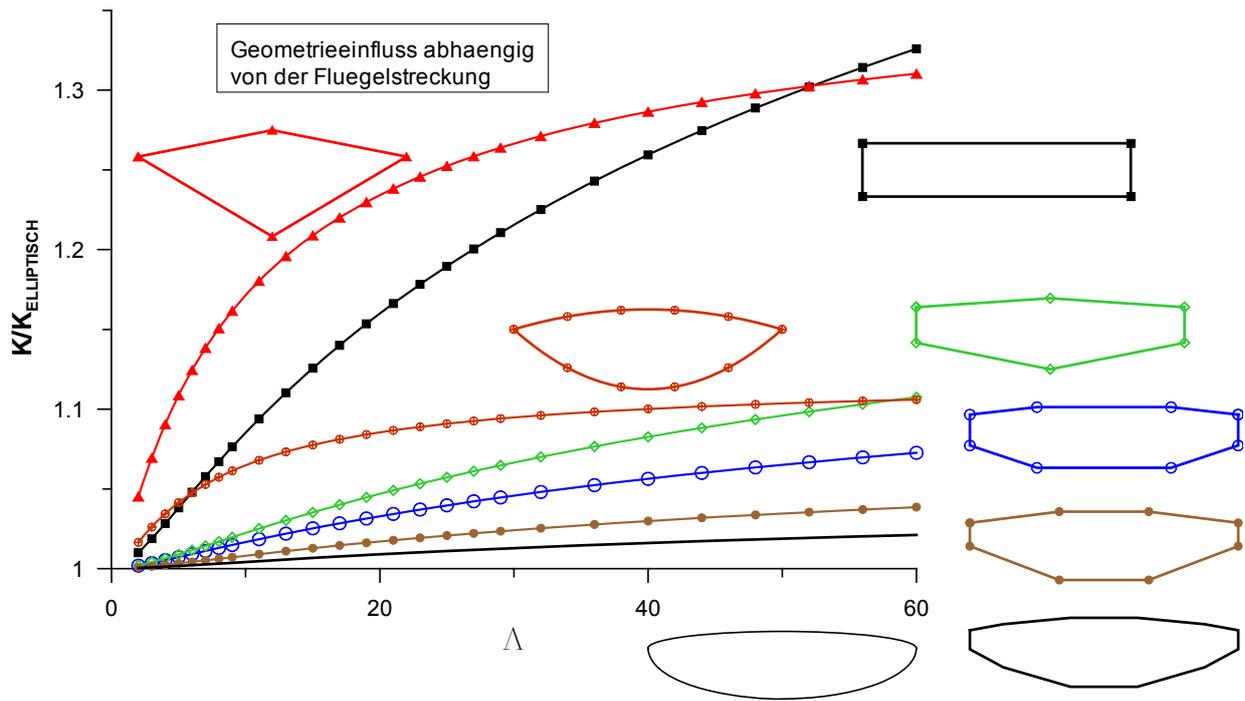


Soll der Einfluss der Geometrie von dem der Streckung separiert werden, ist es sinnvoll, sich auf einen Referenzzustand zu beziehen. Dazu soll hier der optimale elliptische Flügel dienen.



Es zeigt sich, dass die absoluten Differenzen zum elliptischen Flügel nahezu unabhängig von der Streckung sind, ihr Einfluss also für schlanke Flügel stärker wird (s.o.). Rechteck- und vor allem Dreieckflügel sind stets ungünstiger als die dazwischenliegenden Trapezformen. Man kann Optima finden, die sich mit steigender Streckung zu mehr Zuspitzung verschieben.

Im nächsten Diagramm ist der relative Unterschied ausgewählter Geometrien über der Streckung aufgetragen. Auch hier wird deutlich, dass sich die Optima hin zu stärkeren Zuspitzungen verschieben. Ab etwa $\Lambda=50$ wäre ein dreieckiger Flügel sogar besser als ein Rechteck.



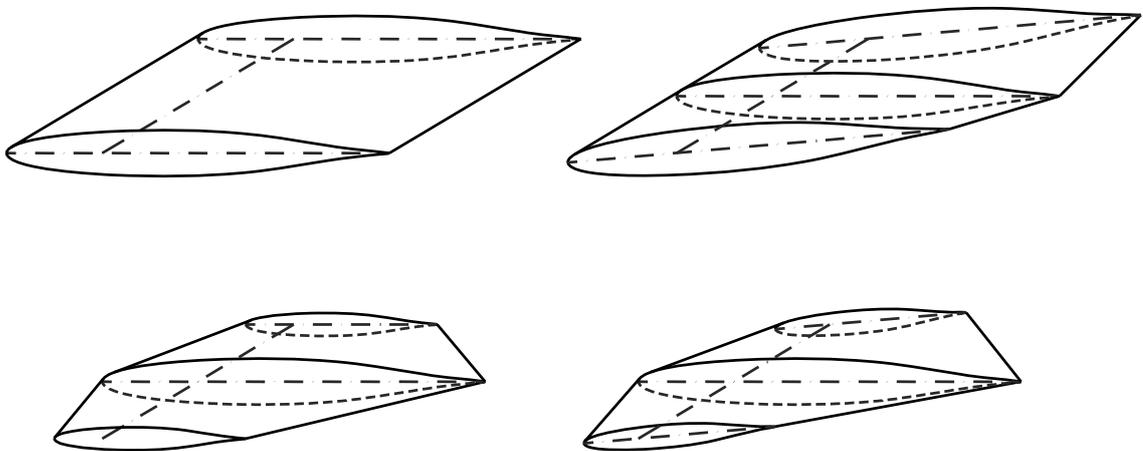
Deswegen werden bei Flugzeugen mit geringer Spannweite (und Streckung) oft einfache Rechteckflügel verbaut, da sie nur sehr wenig zusätzlichen Widerstand verursachen, aber für gutmütige Flugeigenschaften sorgen und technologisch leichter beherrschbar sind.

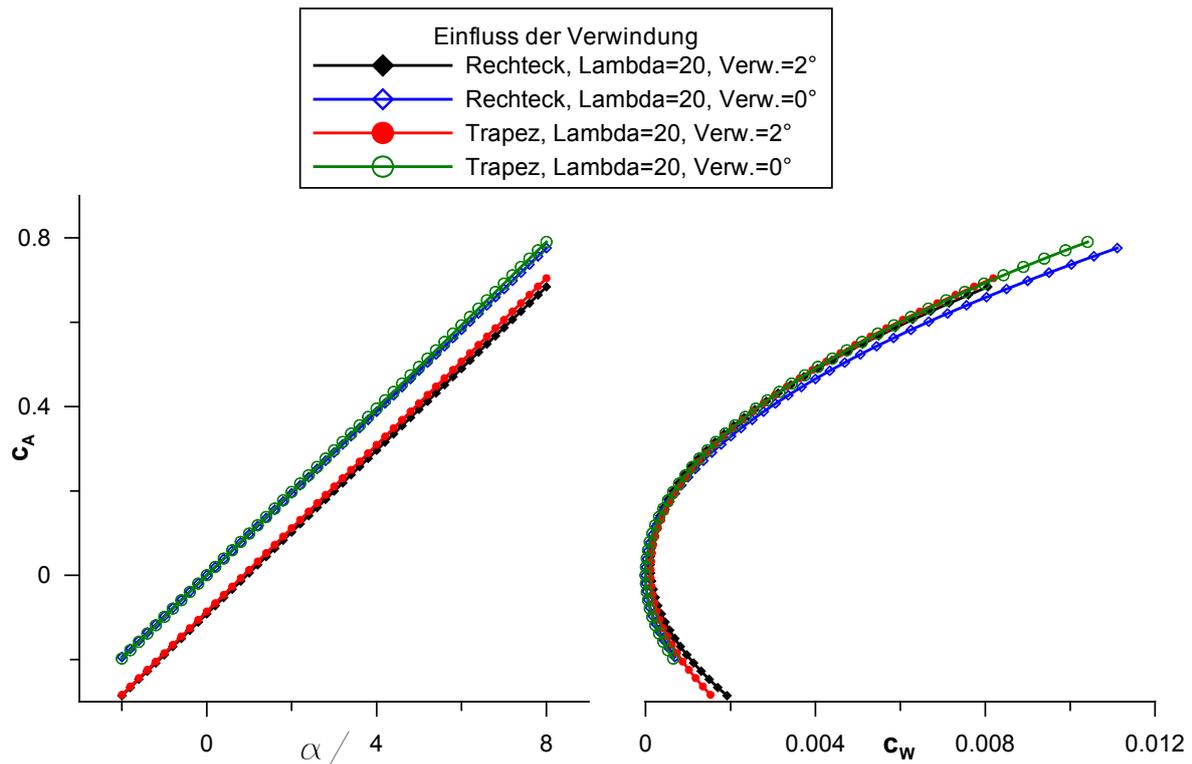
Verwundene Flügel

Eine zusätzliche Verwindung kann bei einem nicht oder nur schwach zugespitzten Flügel eine widerstandsarme Auftriebsverteilung mit weiter verbesserten Flugeigenschaften verbinden. Allerdings wird der K-Faktor dann vom Anstellwinkel abhängig und der Flügel auch bei Nullauftrieb induzierten Widerstand verursachen (der K-Faktor wäre dann unendlich). Die Widerstandsparabel wird hin zu positiven Auftrieben verlagert.

Besonders bei älteren Kunststoffsegelflugzeugen (z.B. ASW-15) lässt sich beobachten, dass sich die Außenflügel als Folge der Verwindung im Schnellflug nach unten biegen.

Für eine Streckung von $\Lambda=20$ werden im folgenden ein rechteckiger mit einem Trapezflügel ($t_A/t_i=0.5$) bei Verwindungen von 0° und 2° verglichen. Es zeigt sich, dass bei dem zugespitzten Flügel kein erkennbarer Widerstandsvorteil der verwundenen gegenüber der ebenen Form erzielbar ist, wohingegen der Rechteckflügel ab etwa $c_A=0.3$ mit Verwindung besser ist als ohne.





Verwindung bezieht sich hier immer auf den Verlauf der Nullauftriebsrichtung über der Spannweite, bezieht also die sog. aerodynamische Verschränkung, also eine spannweiteige Änderung der Profilwölbung, mit ein. Oftmals werden zur Anpassung an unterschiedliche Re-Zahlen innen und außen verschiedene Profile verwendet. Es ist dann z. B. möglich, am Außenflügel Profile mit höherem maximalen Auftriebsbeiwert einzusetzen und so auch bei optimiertem Grundriss gutmütiges Überziehverhalten zu erreichen.

Oft wurde auch der umgekehrte Weg beschritten (Minimoa .. Eta): Eine im Querruderbereich größere Flügeltiefe wird mittels geringerer Wölbung oder Anstellung kompensiert. Da sich hier ein recht spitzes Optimum für den induzierten Widerstand einstellt, kann die Wölbungsverteilung nur durch differenzierte Klappenausschläge dem jeweiligen Flugzustand angepasst werden.

Ganz an der Flügelspitze, wo die Zirkulation Null werden muss und mit ihr der effektive Anstellwinkel, wird oft nochmals auf ein symmetrisches Profil umgestrakt. __