

Symmetrische HQ/W-Profile für Leitwerke

Über viele Jahre hat der Autor an verschiedensten Funktions- und Großsegelflugmodellen symmetrische HQ/W-Profile selber verwendet und empfohlen. Die Flugeigenschaften der Modelle waren damit eigentlich meist ganz zufrieden stellend aber nicht immer überzeugend. Wie der Autor heute weiß, lag dies wohl an der falschen Wahl der Profildicken und - geschuldet auch den früher unzulänglichen Profilanalyseprogrammen – an der Unkenntnis über die instabilen Strömungszustände an symmetrischen Profilen bei niedrigen Reynold-Zahlen und Anstellwinkeln.

Eine intensivere Auseinandersetzung mit der „Effizienz und den Aufgaben von Höhenleitwerken“, worüber der Autor 2010 in der Zeitschrift „bauen und fliegen“ (VTH) in fünf Folgen ausführlich berichtet hat, hat aber schließlich zu einigen prinzipiell neueren Erkenntnissen auch über die richtige Profilwahl geführt. Insbesondere ergab sich, dass vor allem die dickeren symmetrischen Profile aus der neuerlich entwickelten HQ/ACRO-Profilserie sich am ehesten für die Leitwerke eignen.

Trotzdem scheint es dem Autor angebracht, auch für die symmetrischen HQ/W-Profile die relevanten Leistungspolaren, die mit dem neuesten Eppler PROFILE07-Programm ermittelt wurden, vorzustellen. Daran werden wohl besonders die Modellbauer interessiert sein, die ihre Modelle mit solchen Profilen ausgerüstet haben oder nach geeigneten Leitwerksprofilen suchen.

Zum Vergleich wurden die Profile mit 12 % und 9 % Dicke gewählt, um den Unterschied in der Effizienz dicker und dünner Profile zu verdeutlichen. Des Weiteren wurden unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten verglichen und es wurden Polaren für unterschiedliche Rudertiefen mit verschiedenen Ruderausschlägen für Leitwerke mit Flosse und Ruder aufgeführt.

Zum besseren Verständnis und zur Interpretation der Polaren soll zunächst im Folgenden ein relevanter Ausschnitt aus oben erwähntem Aufsatz beitragen:

» ...

Pendel oder Flosse mit Ruder? Was uns Henson zu verstehen gab...

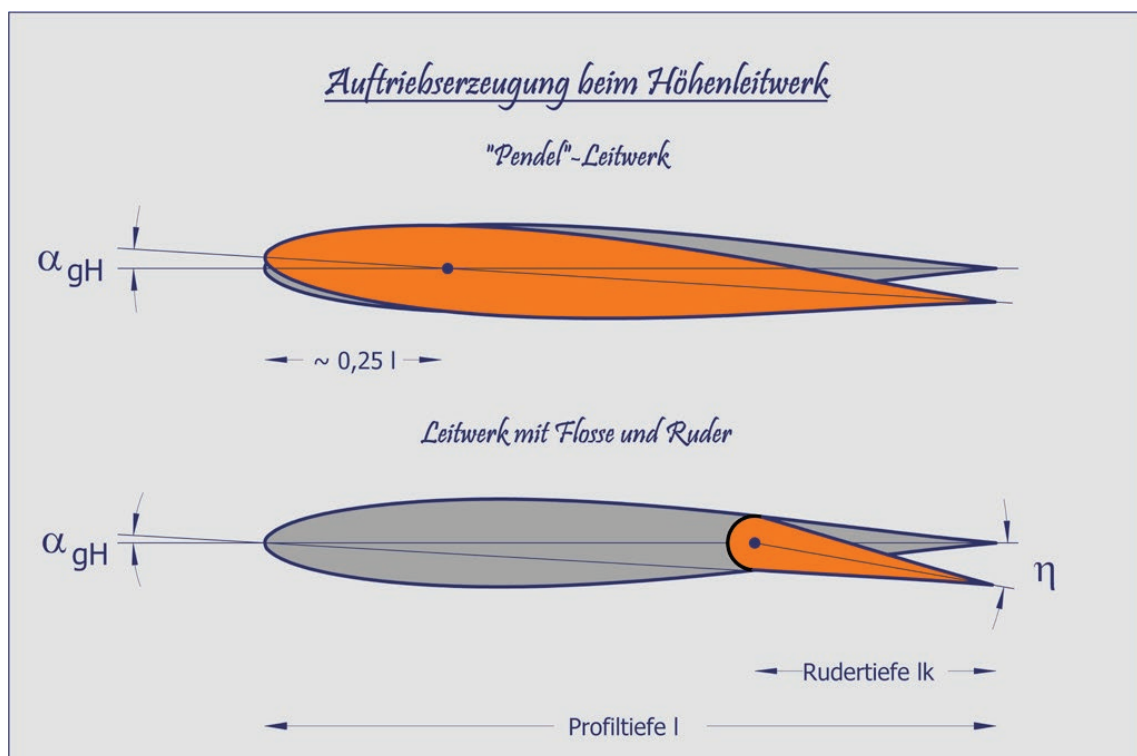


Abbildung 18: Auftrieb am Höhenleitwerk

Grundsätzlich kann man zum Höhensteuern, wie in *Abbildung 18* gezeigt, sowohl das ganze Höhenruder als sogenanntes *Pendelruder* einsetzen oder das Höhenleitwerk aus einer feststehenden Flosse und einem beweglichem *Ruder* aufbauen, das zum Rudern um den Winkel η ausgelenkt wird. In der Regel sind bei einem konventionell gestalteten Flugmodell die zum Steuern etwa gleich hohen erforderlichen Auf- oder Abtriebe am Höhenleitwerk am ehesten mit symmetrischen Profilen zu realisieren. Allerdings gibt es Modellkategorien, - wie z.B. *F3J*-Modelle, bei denen das Höhenleitwerk meist mehr Abtrieb erzeugen muss, um bestmögliche Thermikleistungen zu erzielen -, wo ein leicht konvexes Profil mit Wölbung nach unten an einem Pendelleitwerk durchaus Sinn machen würde.

Bei einem druckpunktfesten symmetrischen Profil ist der Auftrieb direkt proportional zu Anstellwinkel $\alpha = \alpha_g$ und sein Nullmoment ist Null (s. *Abb. 3*). Bei einem Pendelhöhenleitwerk greift somit die Auftriebskraft A_H im Neutralpunkt N_H an. Dieser liegt bei 25% der durchschnittlichen Leitwerkstiefe und ist somit konsequenterweise der beste Drehpunkt für das Pendel, um bei einem ferngesteuerten Flugmodell die seitens eines Höhenruderservos aufzubringenden Steuerkräfte auf das geringstmögliche Maß zu reduzieren. Wie ausführlich erläutert wurde, ist es wenn möglich am besten, den Schwerpunkt und die Neutralpunktlage eines Flugmodells so zu wählen, dass am Höhenleitwerk im stationären Flug mit bestmöglichen Flugleistungen kein Auf- oder Abtrieb erforderlich ist. In diesem Falle hat man beim Pendelleitwerk für das Hoch- und Tiefsteuern den gleichen Auftriebsumfang zur Verfügung. Leider ist dies bei vielen Flugmodellen und besonders bei maßstabsgetreuen Nachbauten von manntragenden Flugzeugen nicht immer möglich. Fürs Höhensteuern stehen dann leider - je nach Schwerpunktlage - nicht mehr gleiche maximale Ausschlagwinkel bis zur kritischen Auftriebsgrenze nach oben und unten zur Verfügung.

Aerodynamisch liegen die Auftriebsverhältnisse bei einem Höhenleitwerk mit feststehender Flosse und beweglichem Ruder etwas komplizierter. Hat man gemäß Vorhergehendem die optimale Schwerpunktlage relativ zum Neutralpunkt und den erforderlichen Einstellwinkel des Höhenleitwerks für ein Flugmodell in Hinblick auf bestmögliche Flugleistungen ermittelt, so sollte man das neutral gestellte Höhenleitwerk, $\eta = 0$, am besten mit diesem Einstellwinkel montieren, um für die Ruderausschläge nach oben wie nach unten weitgehend gleiche Auslenkungen bis zur kritischen Grenze der Strömungsablösung zur Verfügung zu haben. Ideal ist auch hier, wenn Schwerpunkt und Neutralpunkt so eingestellt werden können, dass dann am Höhenleitwerk Nullauftrieb herrscht.

Bei Ausschlag des Ruders um einen Winkel η tritt eine Änderung der Profilkonturen ein, und zwar derart, dass aus dem ursprünglich symmetrischen Profil ein gewölbttes Profil wird. Nehmen wir zu-nächst der Einfachheit halber an, am Höhenleitwerk herrsche ohne Ruderausschlag Nullauftrieb. Seine Profilsehne hat dann einen Anstellwinkel von Null Grad zur Anströmung. Die Sehne des mit dem Ruderausschlag erzeugten gewölbtten Profils nimmt somit zur Anströmung, wie in der *Abbildung 18* dargestellt, einen geometrischen Anstellwinkel α_g an. Wie anfangs ... erläutert, erzeugen gewölbte Profile in der Regel schon bei einem geometrischen Anstellwinkel von Null Grad Auftrieb, und erst bei einem charakteristischen, negativem geometrischen Anstellwinkel α_o ist der Profilauftrieb Null. Der effektive Anstellwinkel bei Ruderausschlag ist somit

$$\alpha = \alpha_g - \alpha_o \quad (33)$$

Besonders beim Höhensteuern mit einem Ruder ist, dass es für jede Ruderstellung einen eigenen Nullauftriebswinkel gibt. Wie wir noch sehen werden, ist es aber diese Besonderheit, die zu erheblich höheren Auftriebsbeiwerten für die Hoch- und Tiefsteuerung verhelfen kann als ein Pendelleitwerk.

» . . .

Pendelleitwerk – und viele modellfliegende Lemminge hinterher...

... wie in *Abbildung 18* gezeigt, werden mit einem Pendelhöhenleitwerk die notwendigen Auftriebs- oder Abtriebskräfte für die Steuerung durch Änderung des Anstellwinkels bewirkt. Die notwendigen Kräfte können z.B. bei kritischen Fluglagen, beim *F3B*-mäßigen Hochstart oder dynamischen Wenden an der Hangkante recht beträchtlich sein. Die maximal möglichen Kräfte werden dabei durch den kritischen Anstellwinkel begrenzt, der schließlich zum Strömungsabriss am Höhenleitwerk führt. Je höher diese Grenze liegt, umso ungefährdeter wird man die Steuerausschläge erhöhen können.

...wie daraus hervorgeht, erreicht das Profil bei niedrigen *Re*-Zahlen, die im Langsamflug an Höhenleitwerken üblich sind, gerade mal maximale Auftriebsbeiwerte von etwas über $c_a = 0,5$. Man kann sich ausrechnen, was selbst bei einem guten Wirkfaktor der Höhenleitwerksgeometrie von $a_H \approx 0,75$ davon für den Auftrieb des Höhenleitwerks übrig bleibt. Beispiele: bei einem *F3J*-Modell liegen im Langsamflug die durchschnittlichen *Re*-Zahlen bei etwa 50000 - 60000 und bei einem 1:2,5-Großsegler bei etwa 90000 - 120000. Auch kann man am Verlauf der Polaren erkennen, wie instabil die Luftströmung am Höhenleitwerk je nach Anstellwinkel ist; und man kann nur sinnieren, wie sich das dann auswirkt, wenn noch die Turbulenzen der Nachlaufströmung des Tragflügels dazu kommen sollten. ... Erst mit höheren *Re*-Zahlen werden die Strömungsverhältnisse stabiler und die Anstellwinkel bis zum Strömungsabriss deutlich größer. Letzteres macht sich z.B. vorteilhaft bei schnellen Wenden mit *Pylonmodellen* oder solchen der *F3B*- oder *F3F*-Klasse bemerkbar.

Eigentlich sollte man annehmen, dass man ... im Langsamflug insbesondere bei ungünstiger Hochlage des Höhenleitwerks keine vernünftige Höhensteuerung zuwege bringt. Einen Ausweg aus diesem Dilemma liefert, wie es die Theorie aufzeigt und wie es der Autor bei vielen praktischen Versuchen bestätigt fand, das Anbringen von *Turbulatoren*. Turbulatoren bewirken, dass hinter ihnen die Strömung zwar mäßig turbulent, aber nicht ohne wirksamen Druck auf das Höhenleitwerk verläuft. Insbesondere treten dann offensichtlich - zumindest theoretisch - auch keine instabilen Strömungsverhältnisse mehr mit der Anstellwinkeländerung auf. Die Rechnungen mit dem *Eppler*-Programm liefern allgemein im Falle eines symmetrischen Profils beste Ergebnisse, wenn etwas hinter dem Ort der größten Dicke je ein Turbulator sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite des Profils über die ganze Spannweite des Höhenleitwerks angebracht wird. Als Turbulatoren eignen sich erfahrungsgemäß z.B. schmale Streifen von ca. 0,2 x 2 mm eines Tesa-Gewebeband. Theoretisch werden leider auch mit Turbulatoren zum einen keine größeren Maximalauftriebe erreicht und zum anderen wirken sie sich wohl auch etwas nachteilig auf den Profilwiderstand bei höheren *Re*-Zahlen aus. Im Vertrauen auf die Ergebnisse der Profilanalysen ist also je nach geplantem Einsatz eines Modells abzuwägen, ob Turbulatoren von Vorteil sind oder nicht. Wenn ein Flugmodell vorwiegend Höchstleistungen im Schnellflug liefern soll, wie z.B. beim „*Dynamic Soaring*“, sollte man wohl lieber zu Gunsten geringeren Widerstandes auf Turbulatoren verzichten, dagegen scheint ein *F3J*-Modell mit Pendelruder geradezu nach solchen Stolperkanten für die Strömung zu schreien.

Wenn ein Turbulator so offensichtlich im Langsamflug stabile Verhältnisse für die Strömung am Höhenleitwerk bewirkt, dann drängt sich doch die Frage auf, ob nicht auch eine insgesamt größere Rauigkeit der Oberfläche des Höhenleitwerks eine ähnlich positive Wirkung hat. Im neuen *Eppler*-Programm wurde der Rauigkeit von Oberflächen ein besonderes Augenmerk in Hinblick auf ihren Einfluss auf den laminar-turbulenten Umschlag der Luftströmung in der Grenzschicht zum Profil und ihre

Auswirkung auf den Profilwiderstand geschenkt. Es wurde an früherer Stelle schon von der e^N -Methode gesprochen, die zur Ermittlung des Umschlagpunktes und des Profilwiderstandes angewandt wird. N ist dabei sowohl ein Maß für die Turbulenz der anströmenden Luft als auch für die Oberflächen-rauigkeit eines Flügels, je größer N , umso homogener ist die äußere Luftströmung und/oder umso glatter ist die Oberfläche. Werte von $N = 11$ bis 13 entsprechen etwa der ungestörten Luftströmung an einem glatten Flügel, Werte von $N = 7$ bis 9 sicher etwa der einer leicht turbulenten Strömung an einer nicht so glatten Oberfläche wie z.B. beim Höhenleitwerk. Bei den gezeigten Abbildungen wurde schon von einer nicht ganz glatten Oberfläche der Höhenleitwerke ausgegangen, nämlich von $N = 9$. Leider sind auch dem Autor die Besonderheiten einer rauerer Oberfläche ($N=7$) für Höhenleitwerke erst bei der Beschäftigung mit dem Thema unter Verwendung des neuen *Eppler*-Programms aufgefallen.

» . . .

Flosse, Ruder und ein genügend dickes Profil, ein erfolgreiches Trio...

Nach den ziemlich unbefriedigenden Resultaten, die das Pendelleitwerk für die Höhensteuerung liefert, werden wir sehen, welche erfreulichen charakteristischen Eigenheiten Höhenleitwerke mit Flosse und Ruder bei der Höhensteuerung entwickeln können. Zunächst sei noch einmal daran erinnert, dass bei Ausschlag des Ruders um einen Winkel η , wie in *Abbildung 18* gezeigt, aus dem ursprünglich symmetrischen Profil ein gewölbtes Profil wird und gemäß *Gleichung 33* für den effektiven Anstellwinkel gilt: $\alpha = \alpha_g - \alpha_o \dots$

{ Für den Auftriebsbeiwert c_{aH} gilt damit $c_{aH} = dc_{aH}/d\alpha \cdot (\alpha_g - \alpha_o)$ }

... Zum besseren Verständnis dieser Eigenschaft betrachte man die exemplarischen Polaren des *HQ/ACRO-0/12*-Profils für $Re = 75000$ in *Abbildung 27*. Die blauen Polaren geben die Abhängigkeit des Auftriebsbeiwertes vom Widerstandsbeiwert und vom Anstellwinkel für das Profil ohne Ruderausschlag an, die roten Polaren desgleichen für einen positiven Ruderausschlag von $\eta = 3^\circ$. Im Allgemeinen liegt der Auftrieb des Höhenleitwerks im stationären Gleitflug mit bestmöglicher Leistung nahe beim Nullauftrieb. Für die prinzipiellen Betrachtungen der Auftriebs- und Abtriebseigenschaften eines Höhenleitwerks mit Ruder und feststehender Flosse macht es daher keinen großen Unterschied, wenn im Weiteren Nullauftrieb im optimalen Gleitflug angenommen wird.

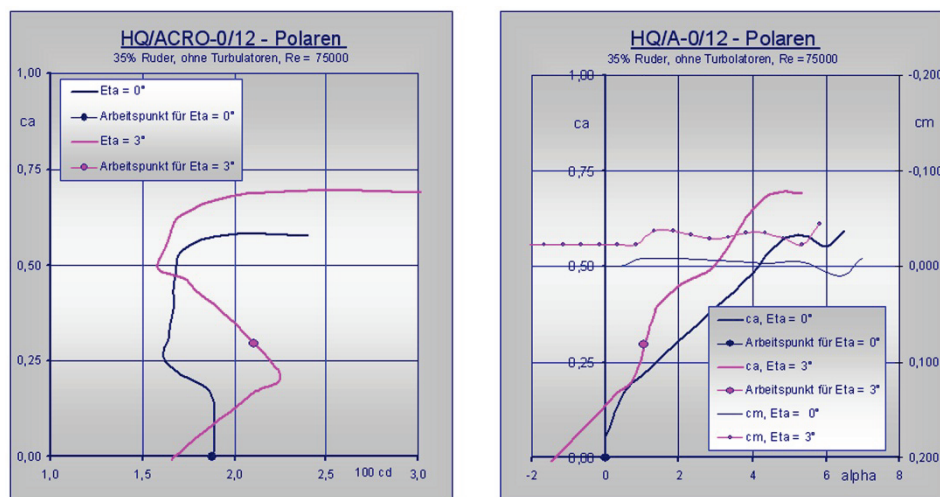


Abbildung 27: Auftrieb und Widerstand beim Höhenleitwerk mit Flosse und Ruder

Gehen wir also von einem Einstellwinkel des Höhenleitwerks aus, bei dem die Ruderneutralstellung $\eta = 0^\circ$ ist, dann stellen sich am Höhenleitwerk im stationären Flug Auftrieb, Widerstand und Anstellwinkel ein, die mit einem blauen Punkt markiert wurden. Einen solchen Punkt wollen wir im Weiteren als *aerodynamischen Arbeitspunkt* des Höhenleitwerks bezeichnen. Bei einem Ruderausschlag von $\eta = 3^\circ$ entsteht ein Profil mit den rot dargestellten Polaren. Der Nullauftriebswinkel ist dafür etwa $\alpha_0 \approx -1,5^\circ$, der geometrische Anstellwinkel $\alpha_g \approx 1,6^\circ$ und der Auftriebsbeiwert $c_a \approx 0,3$, diese Werte sind als Arbeitspunkt auf der roten Polaren eingezeichnet. Bei Festhalten dieses Ruderausschlages wird das Modell in einen stationären Gleitflug mit entsprechendem Gleitwinkel übergehen. Bei dynamischen, instationären Nickbewegungen um die Querachse des Modells mit annähernd konstanter Fluggeschwindigkeit, z.B. bei den schnellen *F3B*-Wenden, können sich natürlich auch die geometrischen Anstellwinkel am Höhenleitwerk bei gegebenem Ruderausschlag ändern, wobei sich je nach momentanem Anstellwinkel kurzzeitig andere Arbeitspunkte auf der Polaren einstellen. Selbstverständlich treten auch mit Ruderausschlag vor allem im Langsamflug Instabilitäten bei der Luftströmung am Leitwerk auf.

Fügt man alle wie in der vorgehenden Weise quasistationär gefundenen Arbeitspunkte für gegebene *Re-Zahlen* als Funktion der Ruderausschläge η im Auftriebsbereich bis zum maximalen Anstellwinkel, bei dem Strömungsabriss eintritt, zusammen, so erhält man wie in *Abbildung 28a* die entsprechenden Auftriebs-Widerstandspolaren und in *Abbildung 28b* die Abhängigkeit des Auftriebs vom Ruderwinkel η . Einerseits kann man höchsterfreulich festhalten, dass die mit einem Ruder erzeugten Auftriebswerte erheblich größer sind als beim Pendelruder, deren Polare mit eingezeichnet sind, zum andern ist zu konstatieren, dass leider auch beim Höhenleitwerk mit Ruder im Langsamflug je nach Ruderausschlag die Strömung instabil werden kann und dabei die Profilwiderstände erheblich zunehmen können. Dies ist keine Besonderheit des betrachteten Profils, solche Instabilitäten treten auch bei ähnlichen Profilen mit Ruderklappen auf.

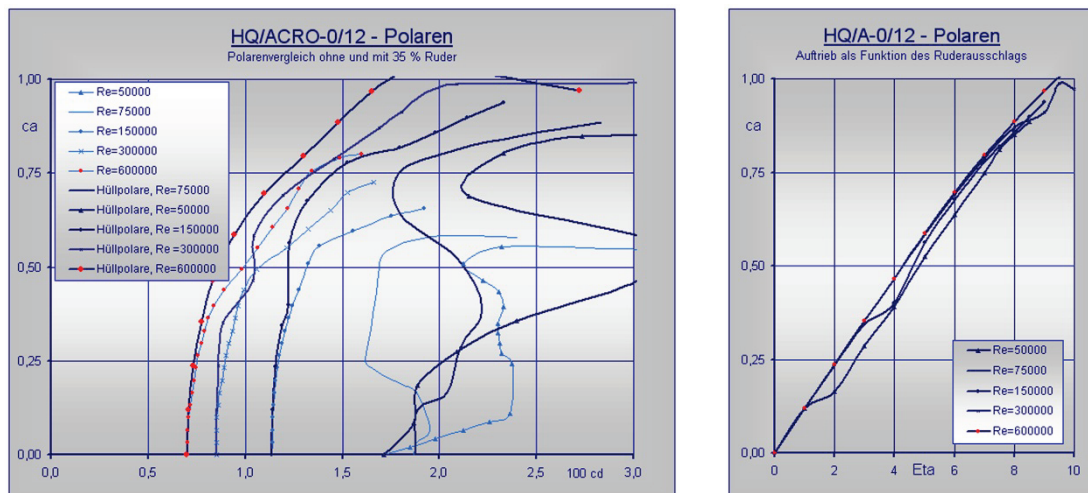


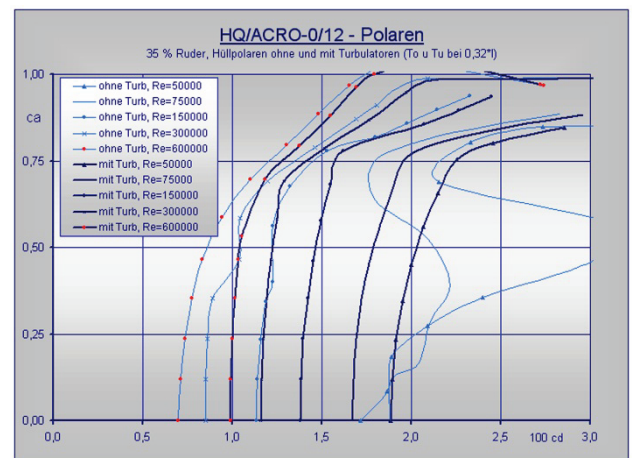
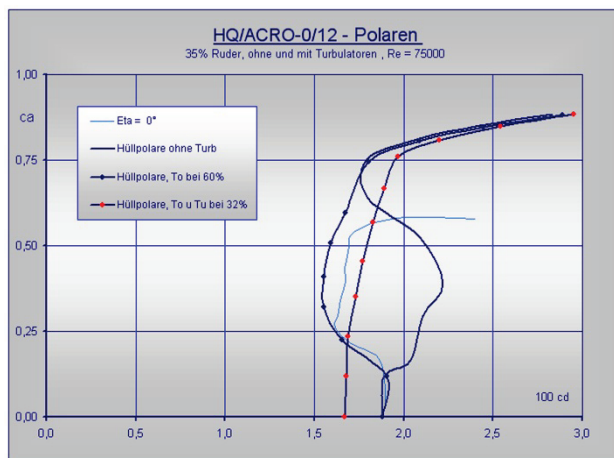
Abbildung 28a,b: HQ/ACRO-0/12-Polaren bei Rudereinsatz

Die wiedergegebenen Polaren wurden, wie in den Abbildungen angemerkt, für Ruderklappentiefen von 35 % der Profiltiefen ermittelt. Nach etlichen theoretischen Rechnungen, die der Autor durchgeführt hat, sind für den Bereich der niedrigen *Re-Zahlen* an Flugmodellen offenbar Rudertiefen von 30 % bis 40 % für Flugmodelle optimal. Geringere Tiefen erfordern zum Erzielen gleicher Auftriebs- bzw. Abtriebswirkung größere Ruderwinkel η , was zu noch mehr Instabilitäten der Strömung am Höhenleitwerk besonders bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten führt. Es ist also vor allem bei maßstabsgetreuen

Nachbauten von Großseglern, die sich im Original aufgrund der hohen Re-Zahlen an ihren Höhenleitwerken schmale Ruderklappen leisten können, angeraten, beim Modell die Rudertiefen etwas größer zu wählen.

Nun lehren uns erfreulicherweise viele Flugexperimente mit unterschiedlichsten Modellen und die theoretischen Rechnungen mit dem *Eppler*-Programm, dass man mit Turbulatoren auch an einem Höhenleitwerk mit Ruder erhebliche Verbesserungen hinsichtlich der Strömungsstabilität erzielen kann. Schauen wir uns die *Abbildungen 29a,b* an, so bedarf es nicht vieler Worte, um zu erkennen, welche segensreiche Wirkung Turbulatoren offensichtlich für die Strömungsstabilität und damit für die Effizienz des Höhenleitwerks im gesamten zulässigen η -Bereich haben.

In der *Abbildung 29a* ist für $Re = 75000$ neben der Polare des ungewölbten Profils einen Vergleich der Polaren ohne Turbulator, mit einem Turbulator kurz vor der Ruderanlenkung und mit beidseitigen Turbulatoren bei der größten Dicke des Höhenleitwerks wiedergegeben. *Abbildung 29b* zeigt für den ganzen praktisch relevanten Re-Zahlbereich, wie sich durch beidseitigen Einsatz von Turbulatoren wie beim Pendelleitwerk auch beim Höhenleitwerk mit Ruder die Strömung stabilisieren lässt. Leider führt die Verwendung von Turbulatoren wie zuvor beim Pendelleitwerk bei höheren Re-Zahlen (Geschwindigkeiten) zu einer Erhöhung des Widerstandes und es gilt, je nach Einsatzzweck eines Modells, abzuwägen, ob Turbulatoren dabei hilfreich sind oder nicht. Die größten Probleme mit Strömungsabrissen erzeugen sich die Modellflieger meist selber, weil sie fast immer dazu tendieren, beim langsamen Thermikkreisen durch „Nachziehen“ bis an die Grenze des Strömungsabrisse zu gehen, - egal, wie leistungsfähig die Höhenleitwerke dafür sind.

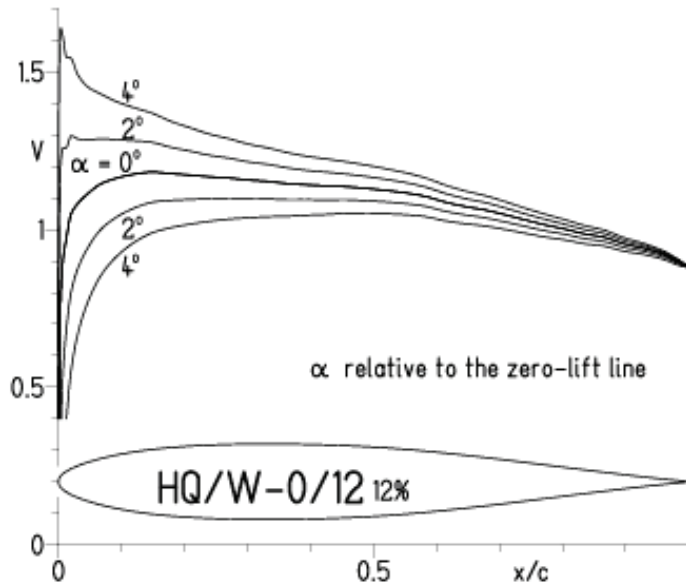


Abbildungen 29a,b: Einfluss von Turbulatoren beim Höhenleitwerk mit Ruder

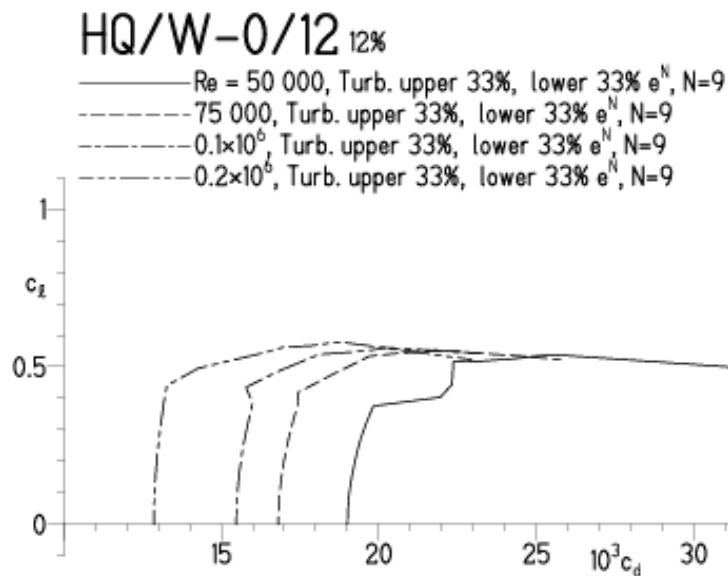
★ ★ ★

HQ/W-0/12, N=9, Turbulatoreffekt (Turbulatoren bei der größten Dicke)
 Erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Höhenleitwerkstiefen

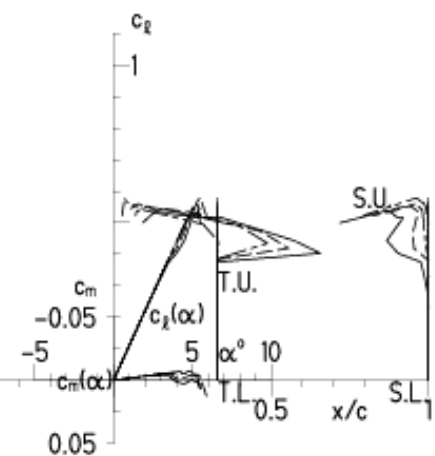
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:37



EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:

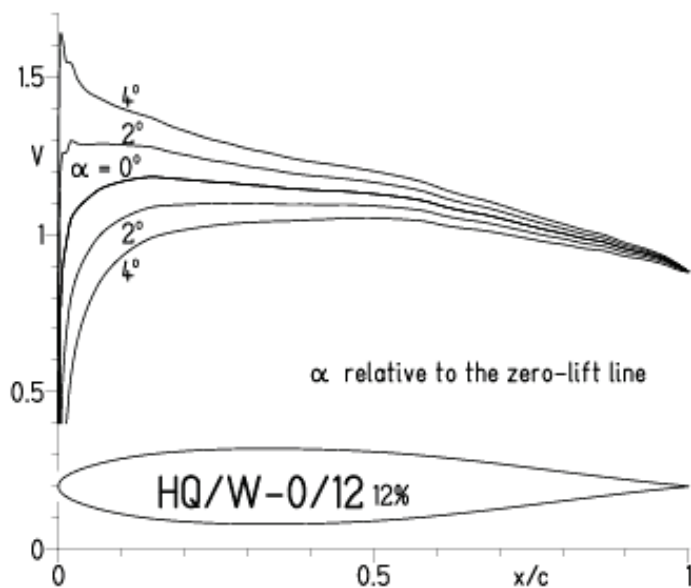


- T. boundary layer transition
- S. boundary layer separation
- U. upper surface
- L. lower surface

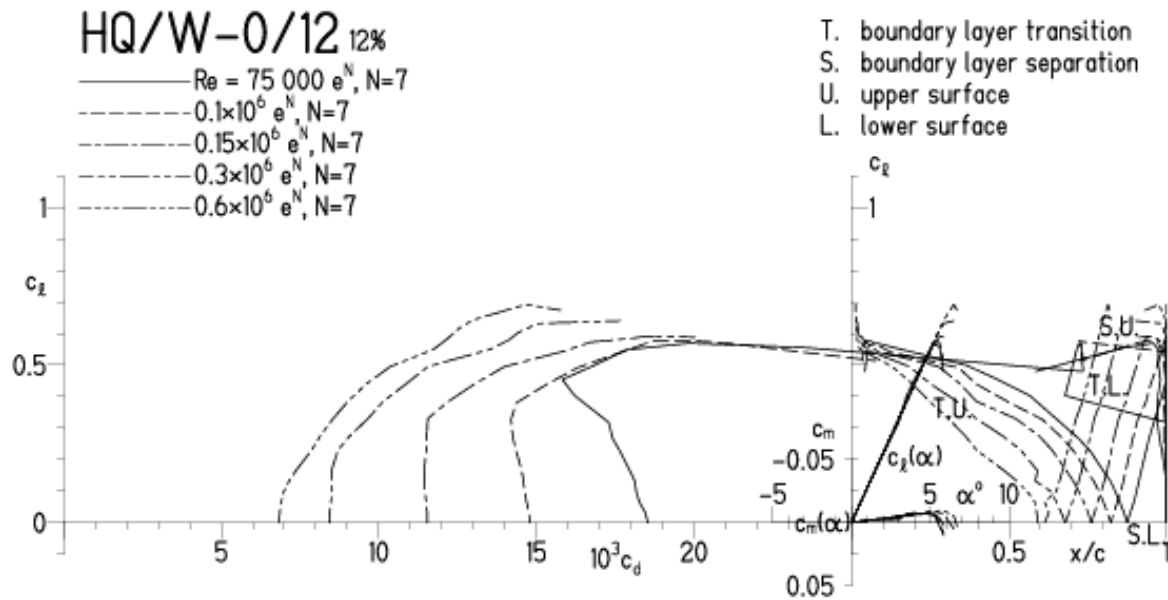


HQ/W-0/12, N=7

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:19

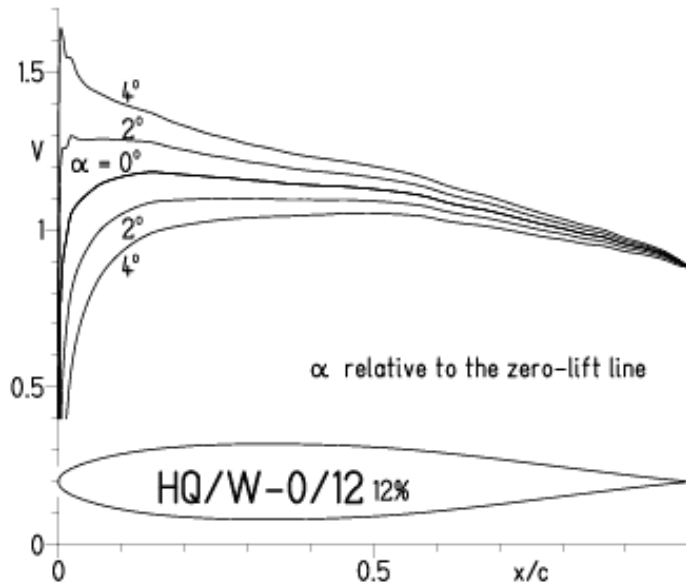


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:19

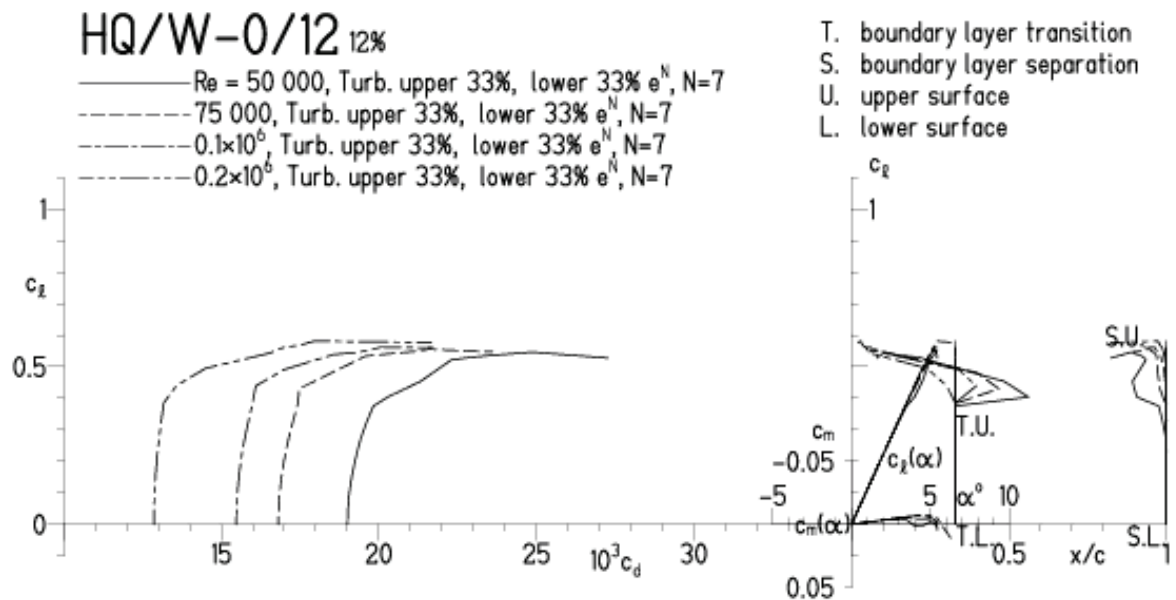


HQ/W-0/12, N=7, Turbulatoreffekt (Turbulatoren bei der größten Dicke)
 Erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Höhenleitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:48

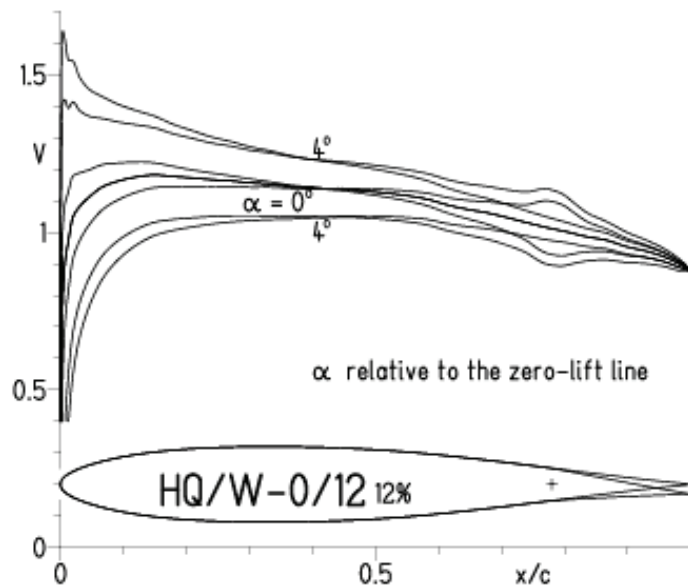


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 12:48

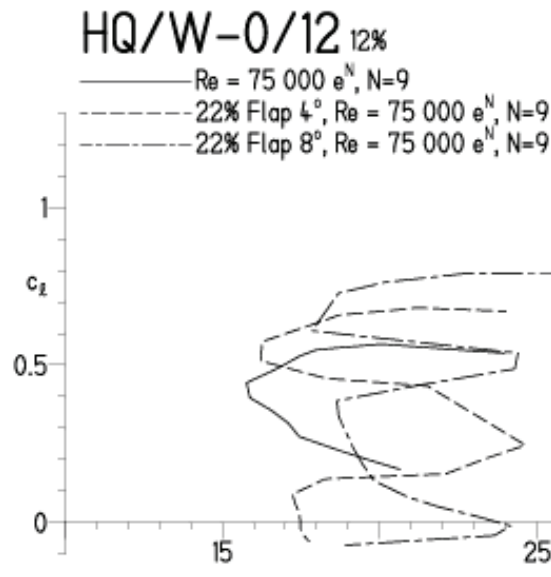


HQ/W-0/12, N=9, Ruder mit 22% von I, niedrige Re

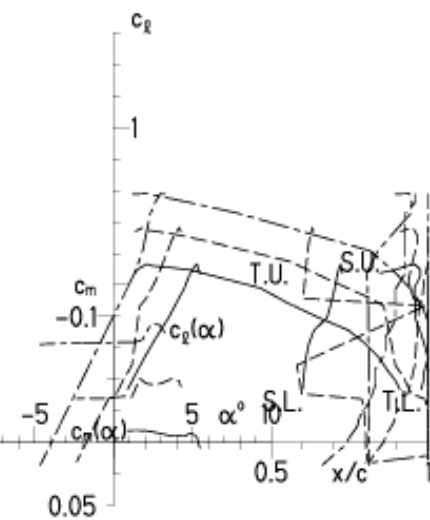
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 18:19



EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 18:19

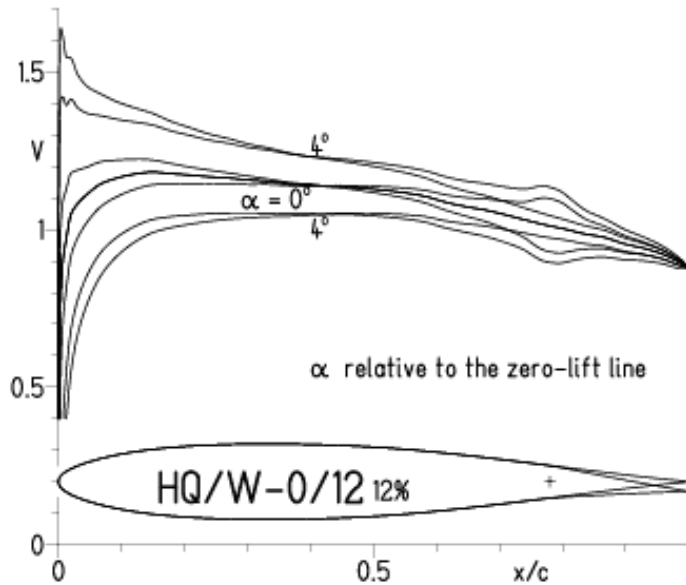


T. boundary layer transition
S. boundary layer separation
U. upper surface
L. lower surface

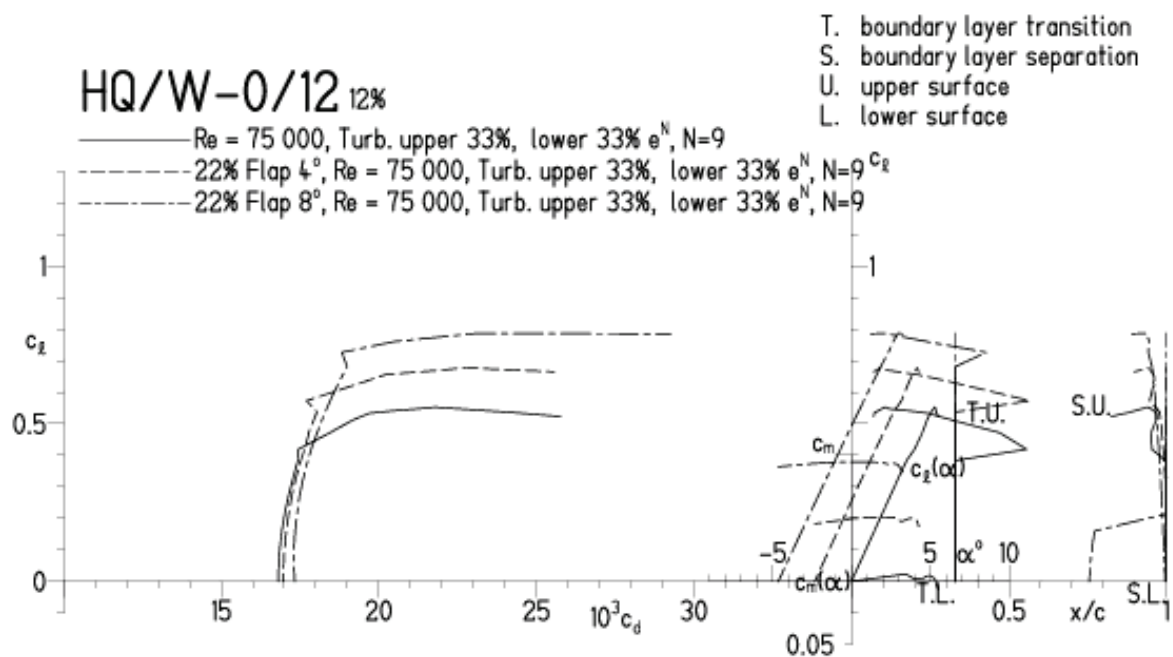


HQ/W-0/12, $N=9$, $Re = 75\,000$, Ruder mit 22% von I, Turbulatoreffekt,
Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 18:45

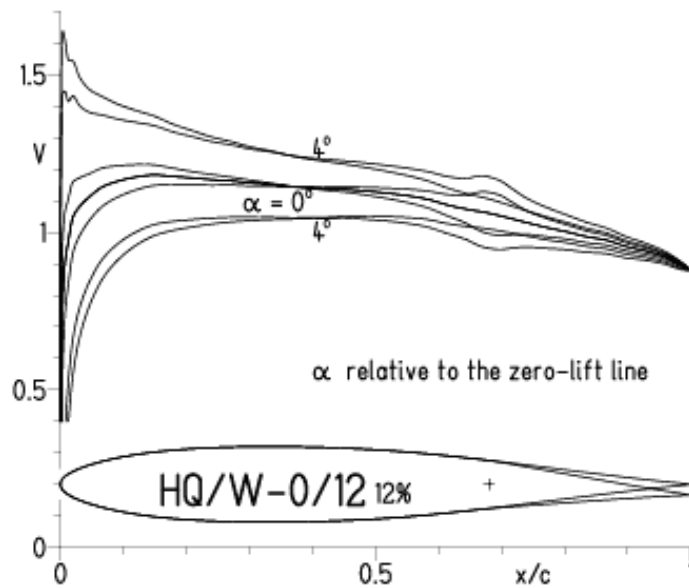


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 5.6.11 18:45

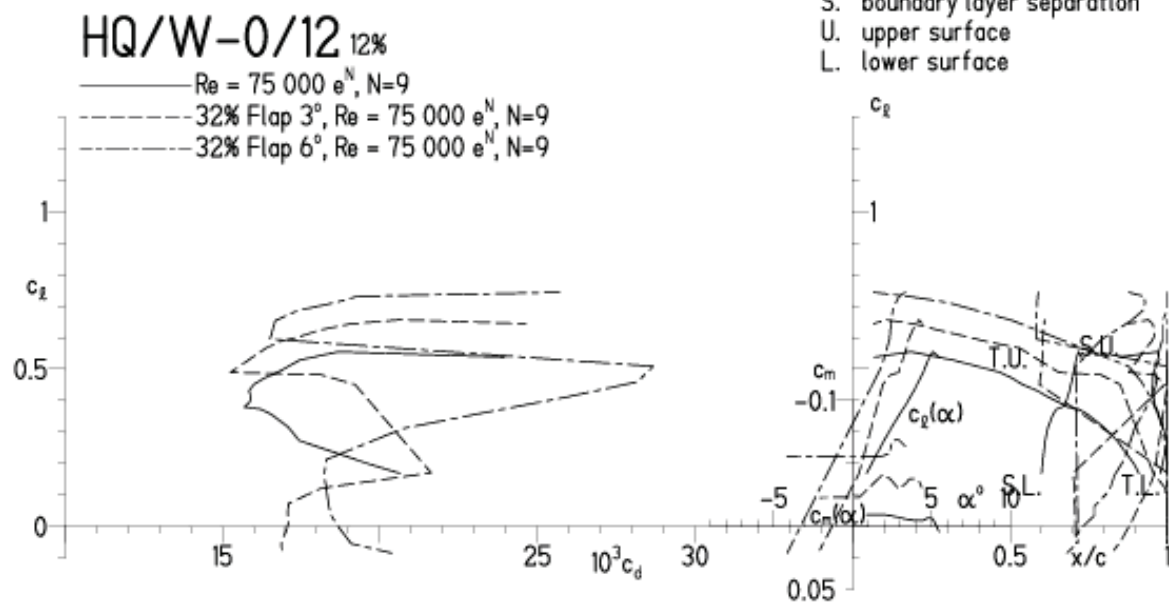


HQ/W-0/12, N=9, Ruder mit 32% von I, niedrige Re

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 11:39



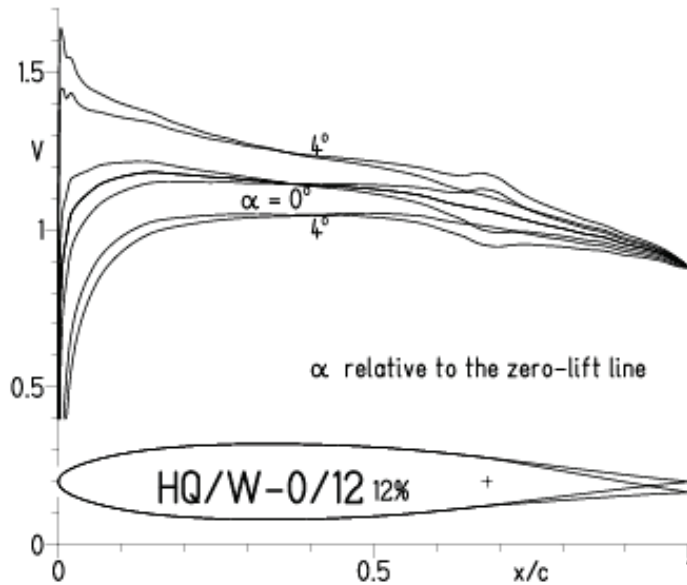
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 11:39



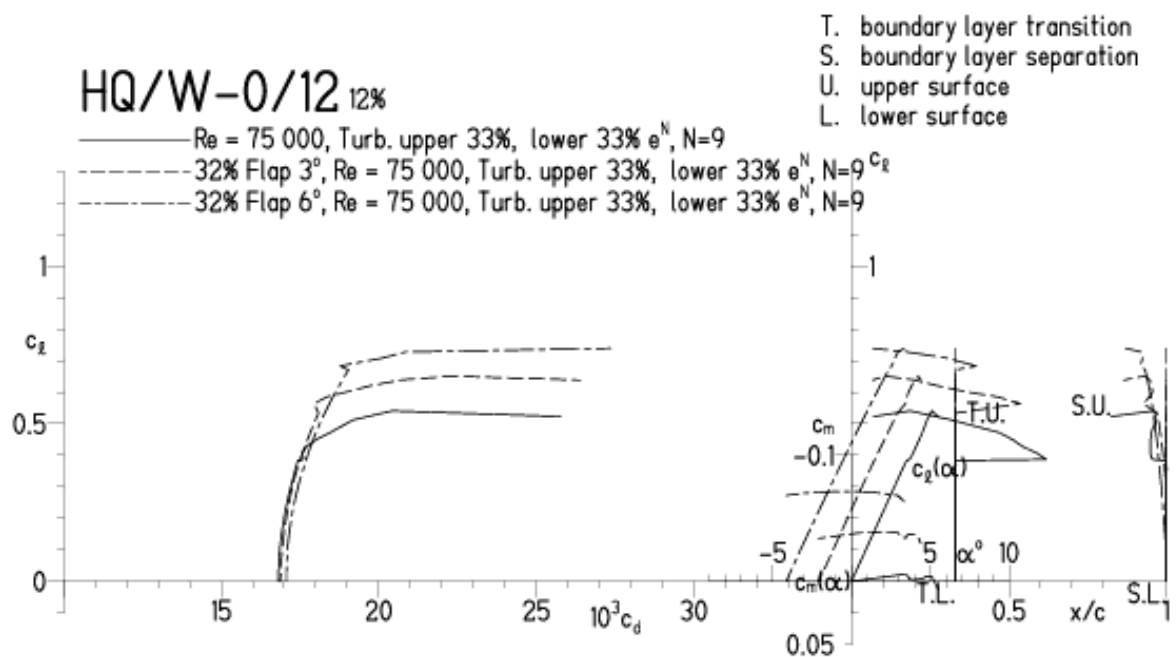
HQ/W-0/12, $N=9$, $Re = 75\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 11:58

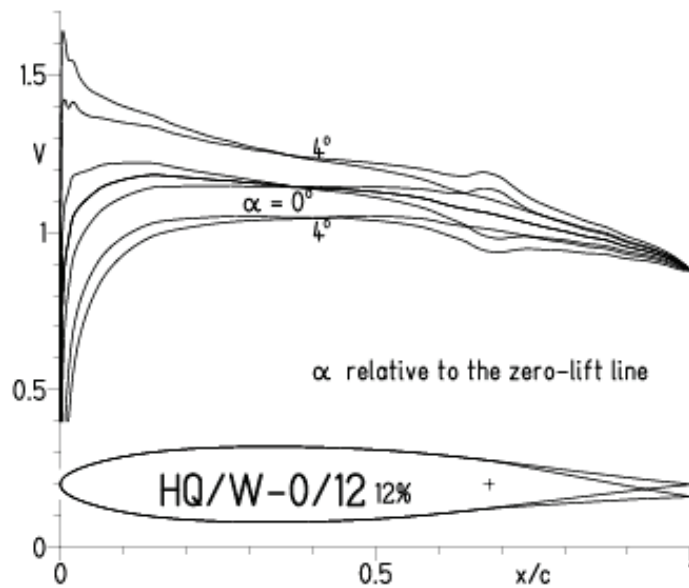


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 11:58

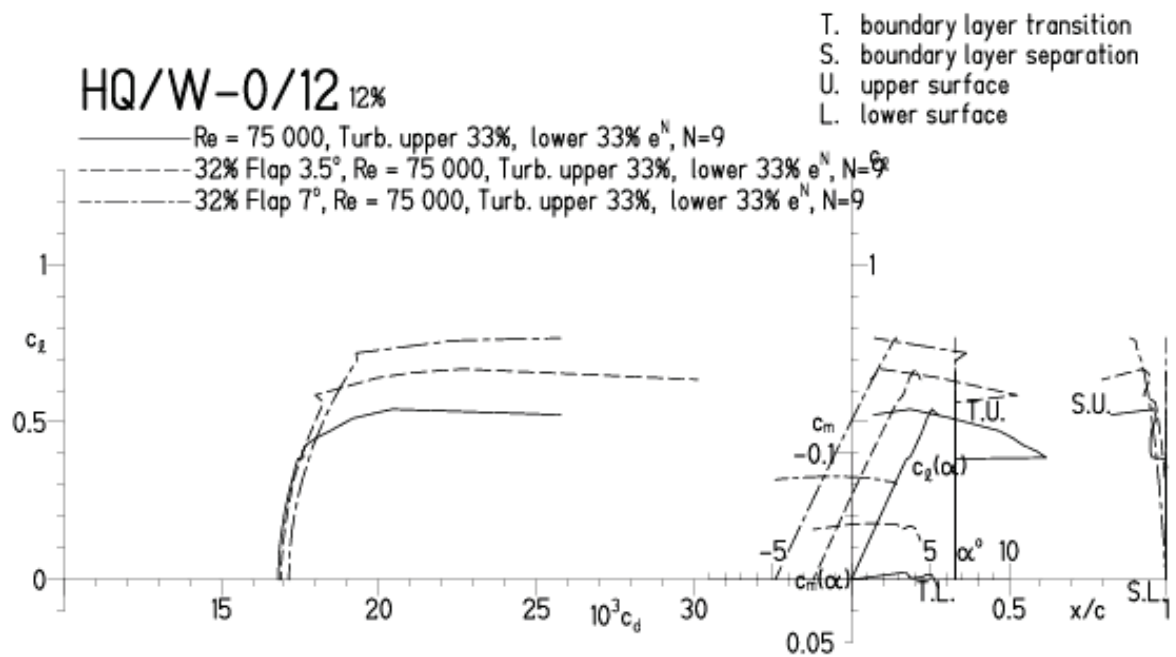


HQ/W-0/12, $N=9$, $Re = 75\,000$, Ruder mit 27% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:13

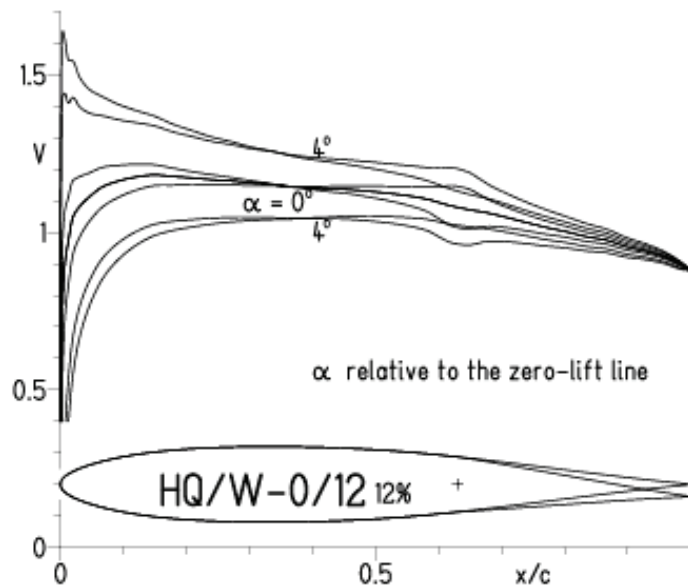


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:13

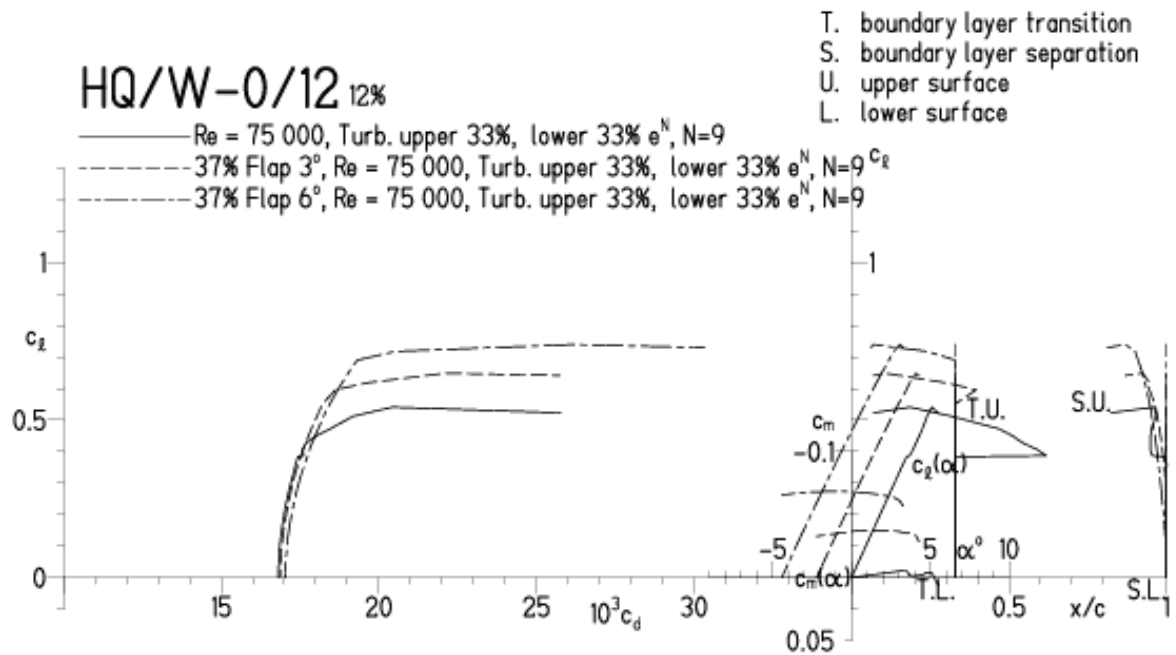


HQ/W-0/12, N=9, Re = 75 000, Ruder mit 37% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:28



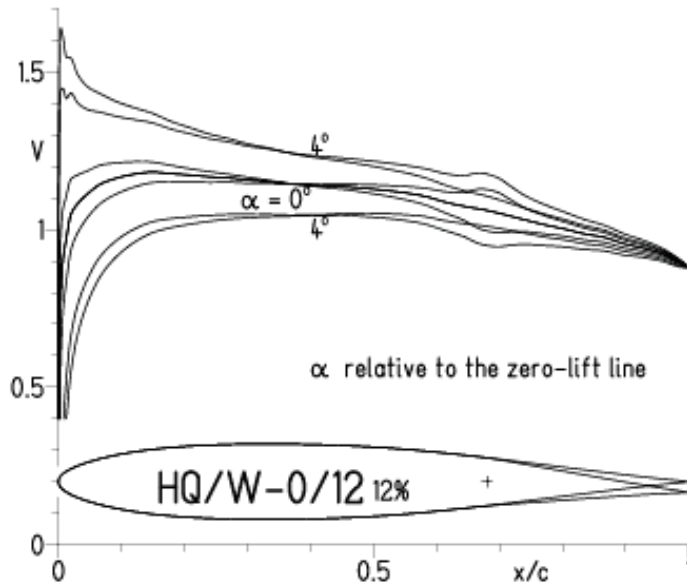
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:28



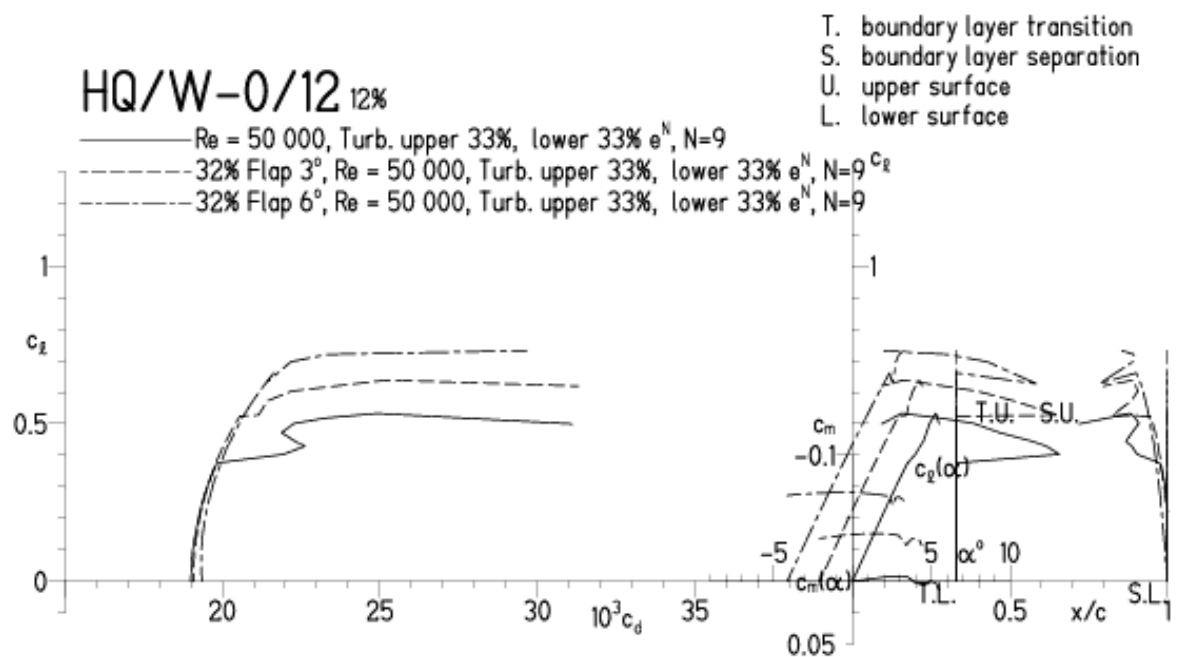
HQ/W-0/12, $N=9$, $Re = 50\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:44

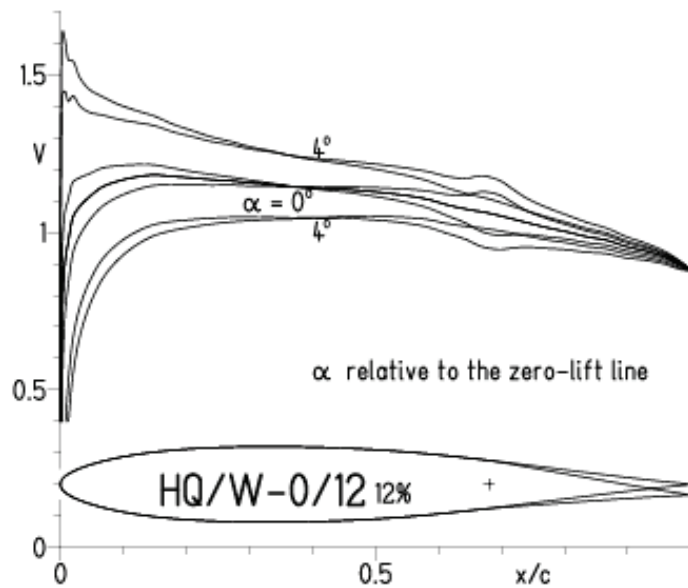


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:44

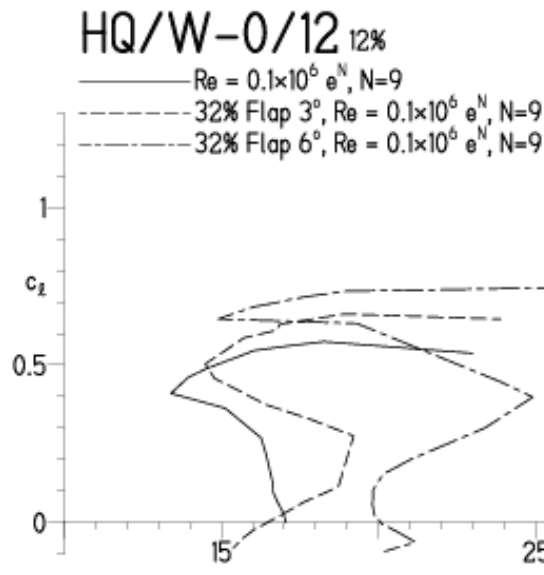


HQ/W-0/12, $N=9$, $Re = 100\,000$, Ruder mit 32% von l

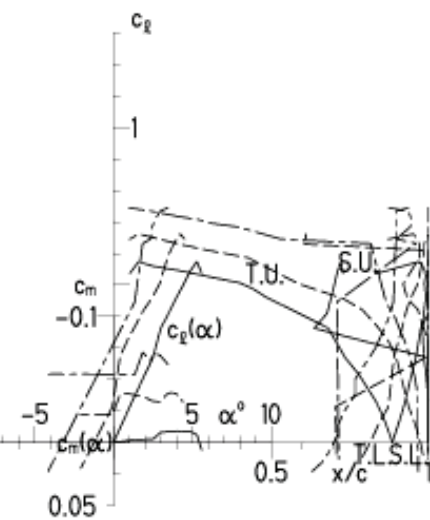
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:56



EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:56

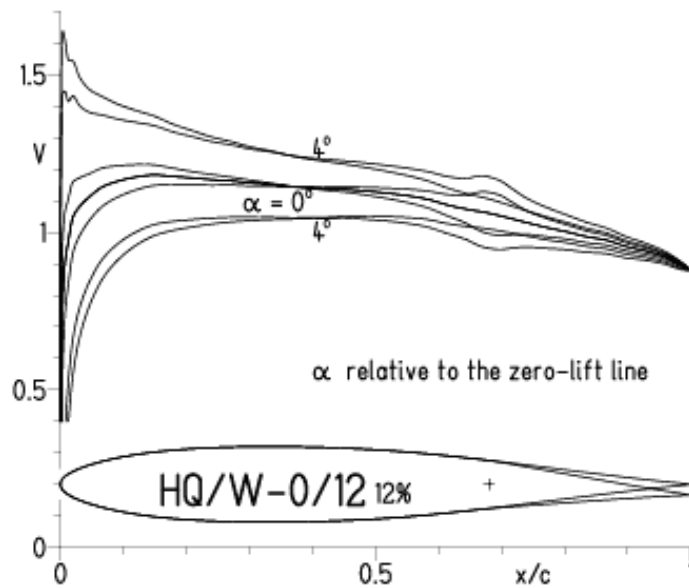


- T. boundary layer transition
- S. boundary layer separation
- U. upper surface
- L. lower surface

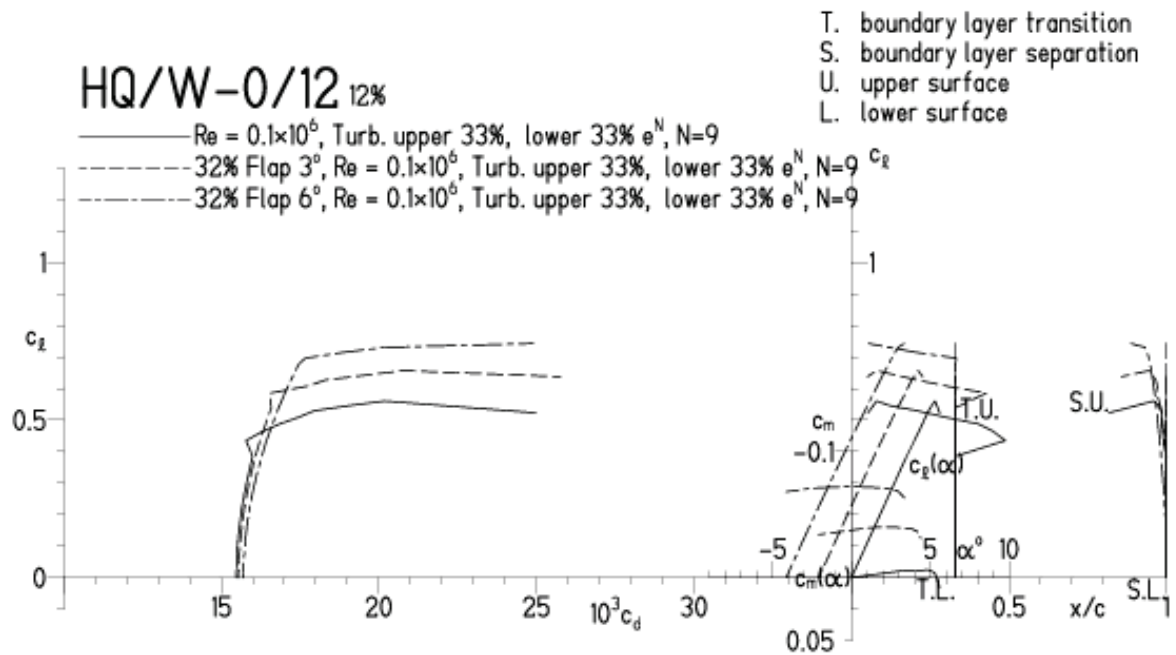


HQ/W-0/12, N=9, $Re = 100\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:50

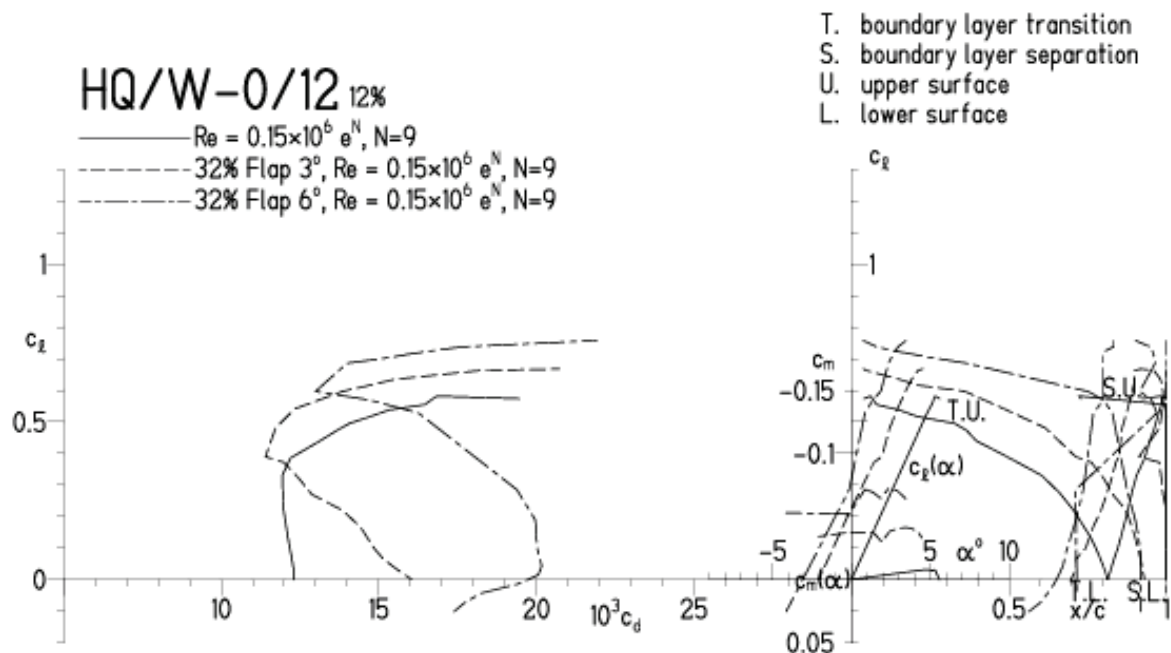


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 12:50



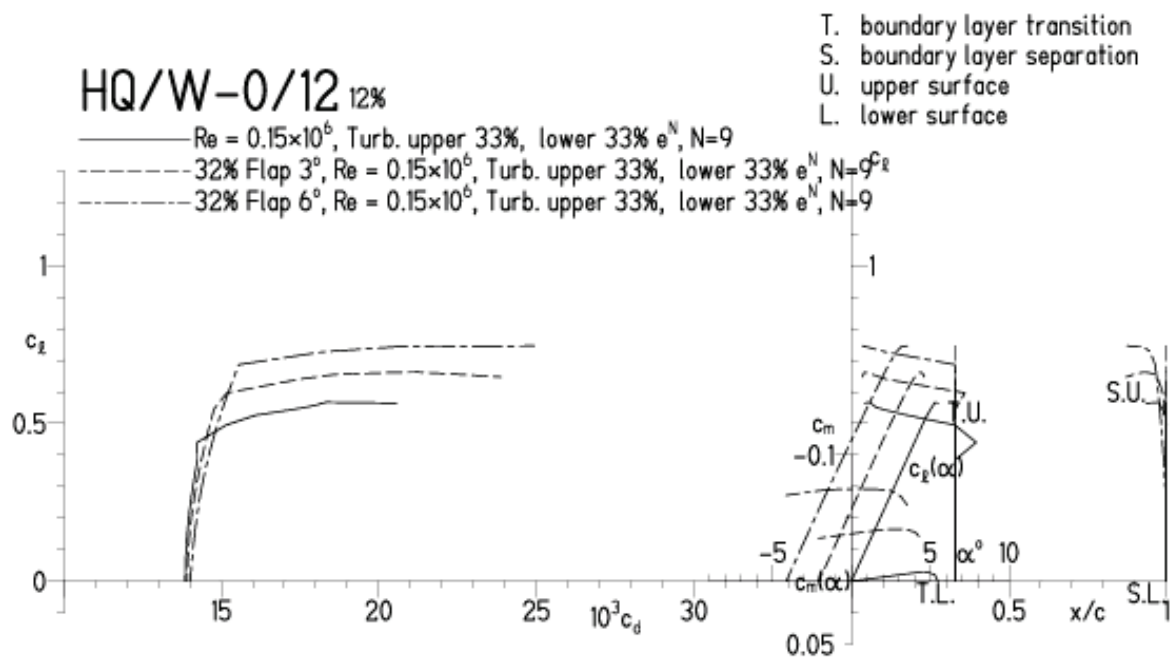
HQ/W-0/12, N=9, Re = 150 000, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 13:01



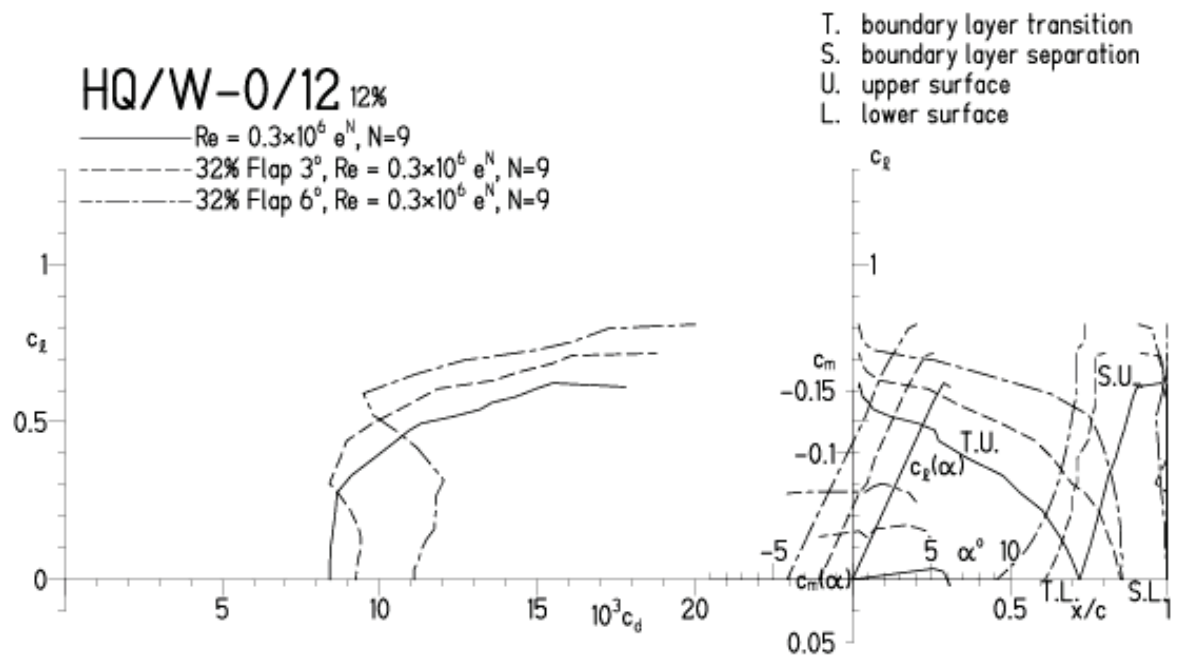
HQ/W-0/12, N=9, Re = 150 000, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 12:35



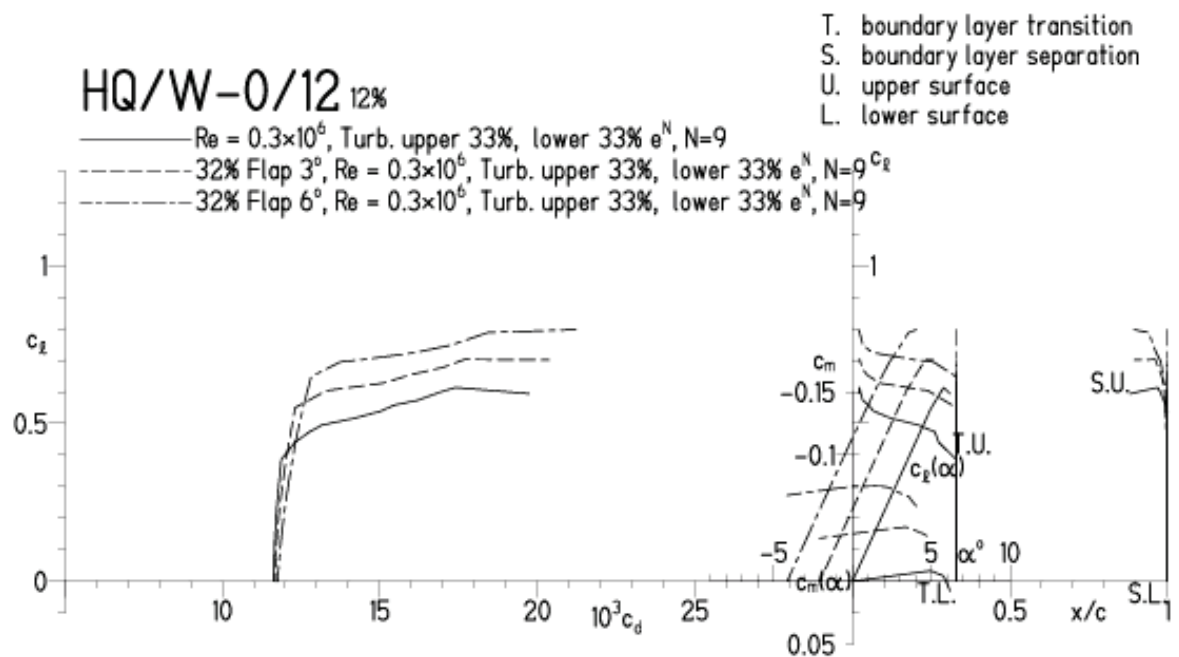
HQ/W-0/12, N=9, Re = 300 000, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 13:16



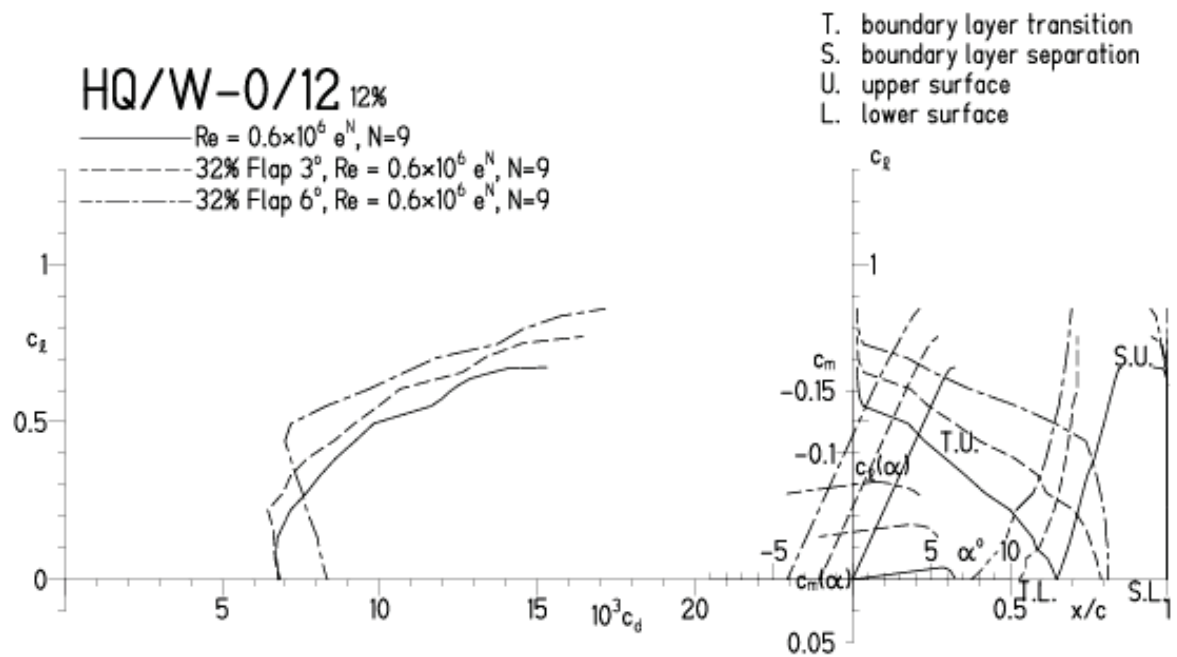
HQ/W-0/12, N=9, Re = 300 000, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V.



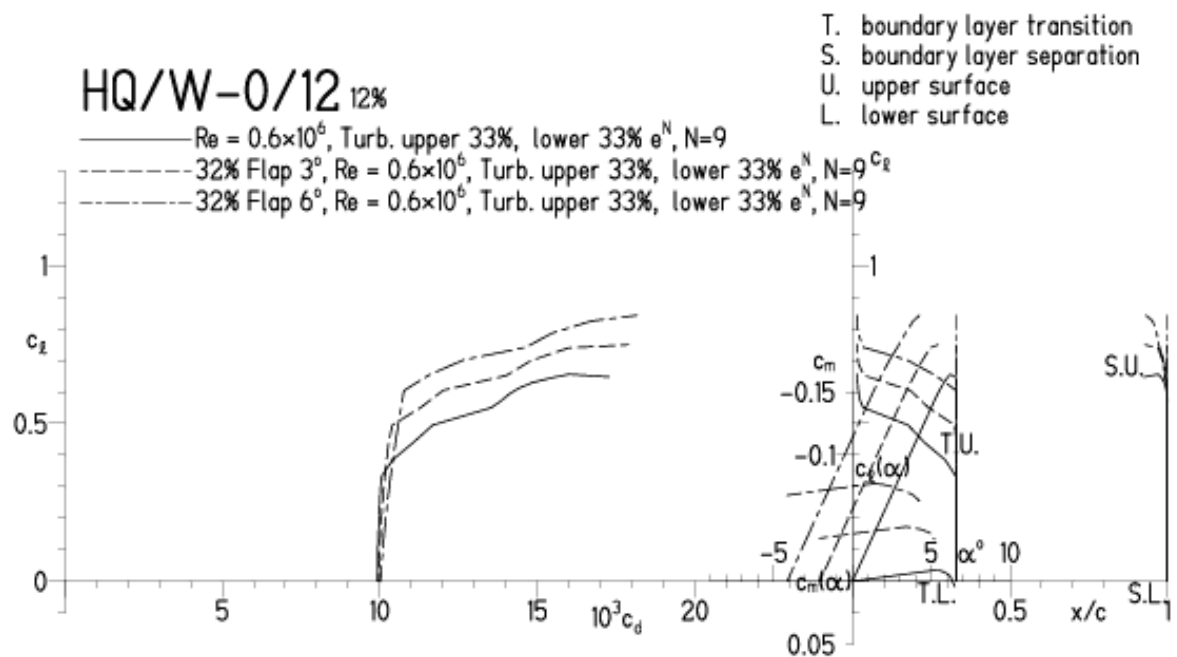
HQ/W-0/12, N=9, $Re = 600\,000$, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 10.6.11 15:29



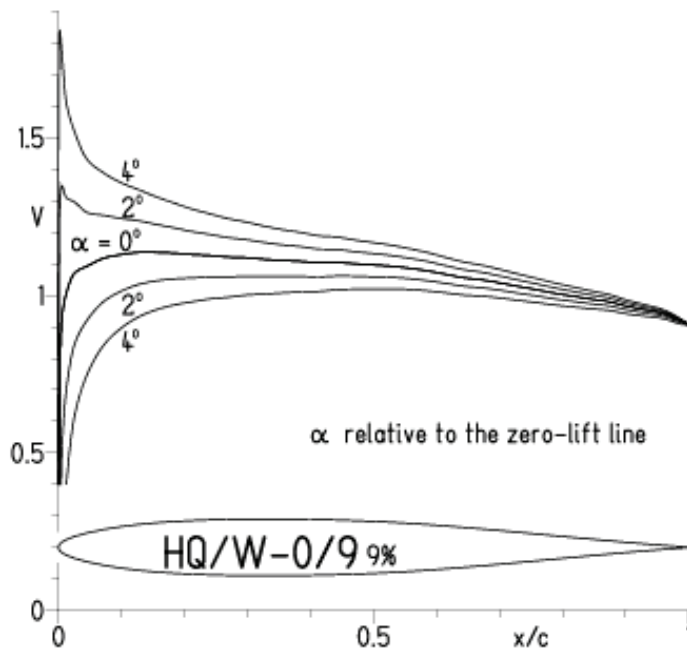
HQ/W-0/12, N=9, $Re = 600\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V.

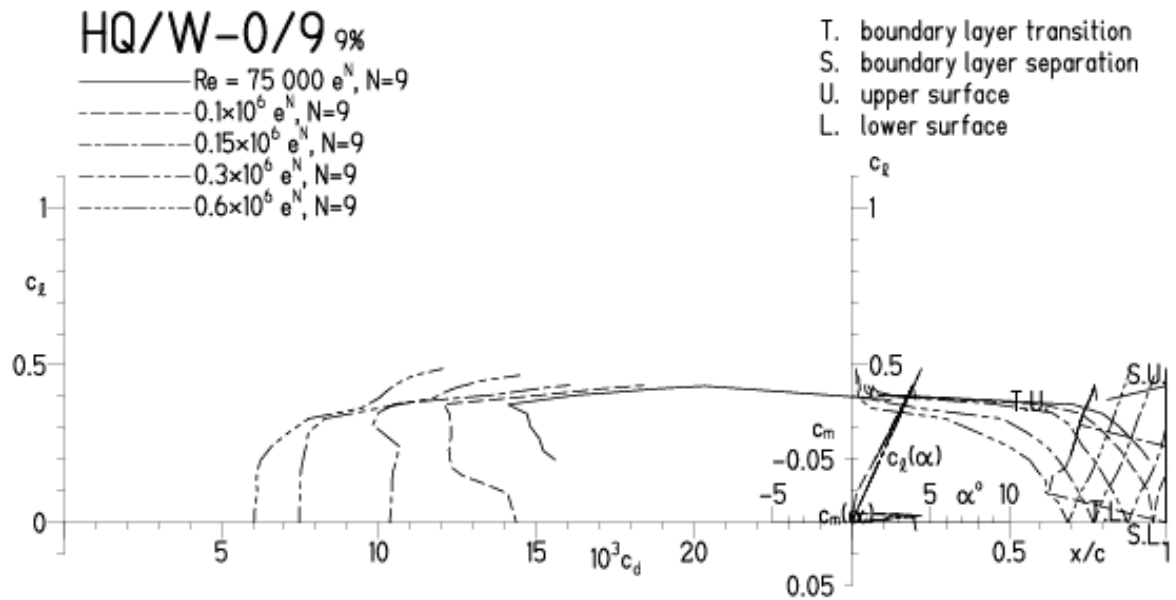


HQ/W-0/9, N=9

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 11:51

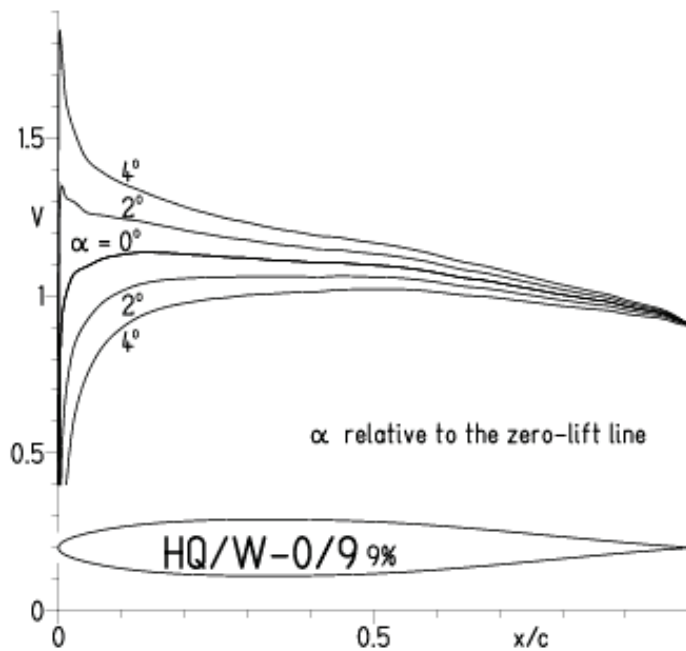


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 11:51

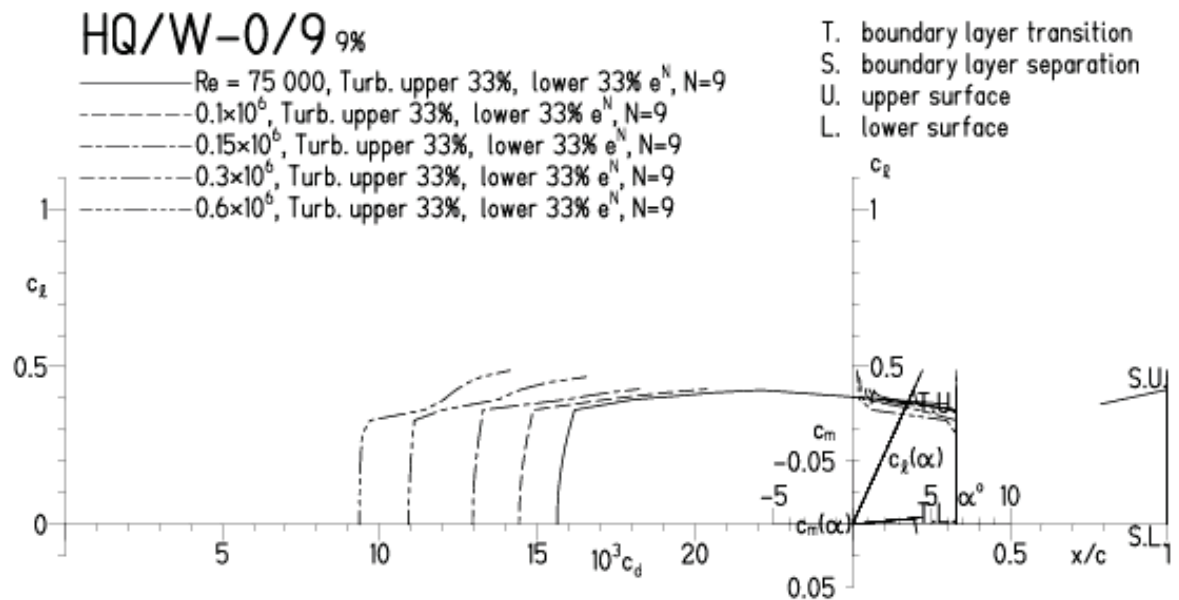


HQ/W-0/9, N=9, Turbulatoreffekt (Turbulatoren bei der größten Dicke)
 Erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Höhenleitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 11:48

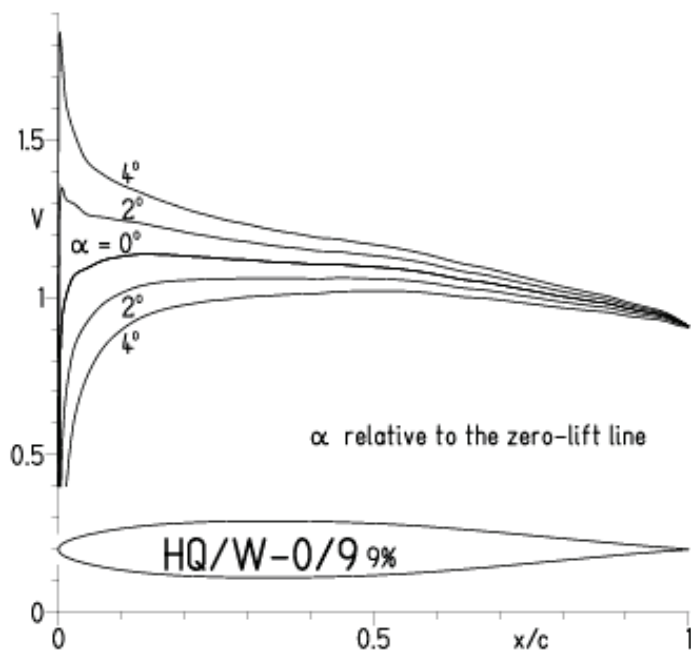


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 11:48

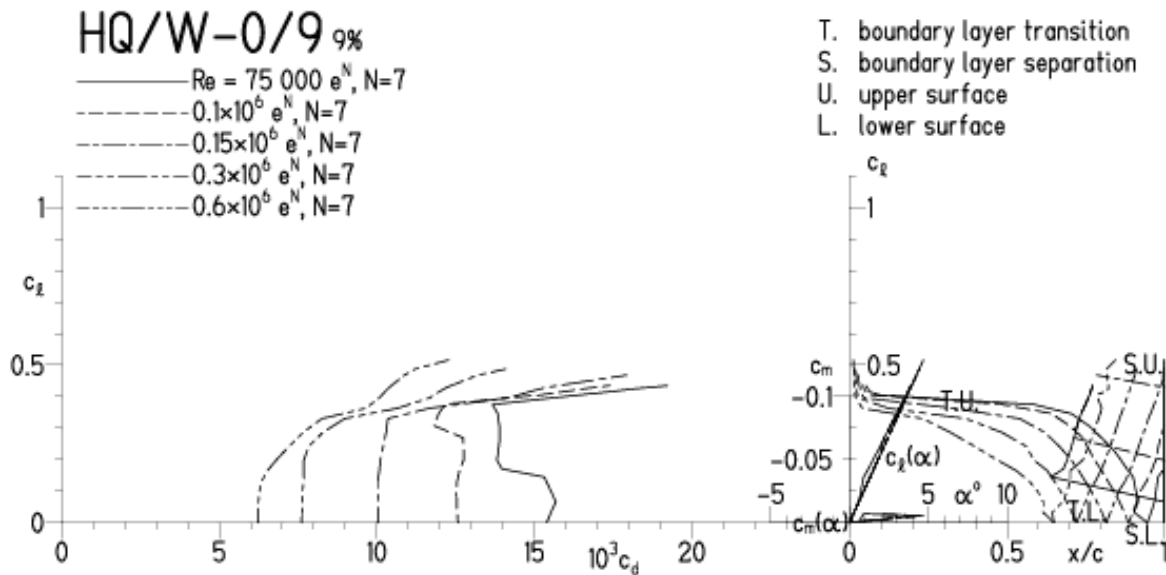


HQ/W-0/9, N=7

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 12:11

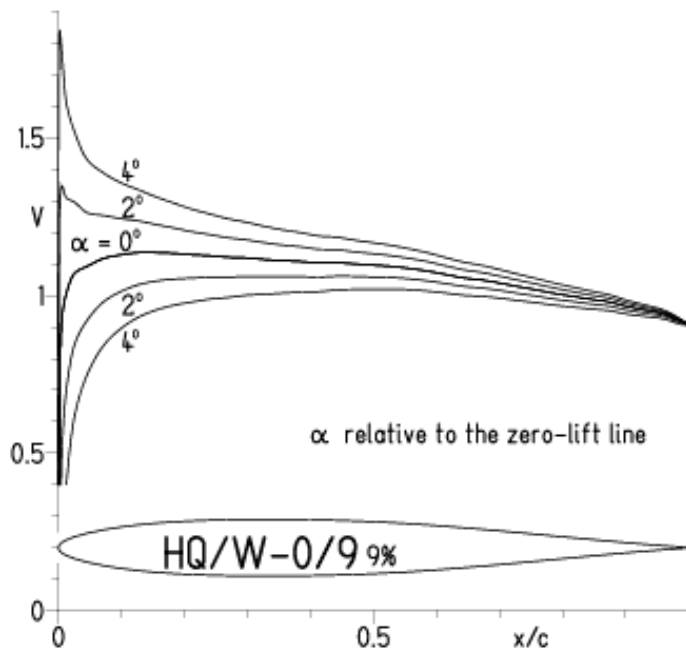


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 12:11

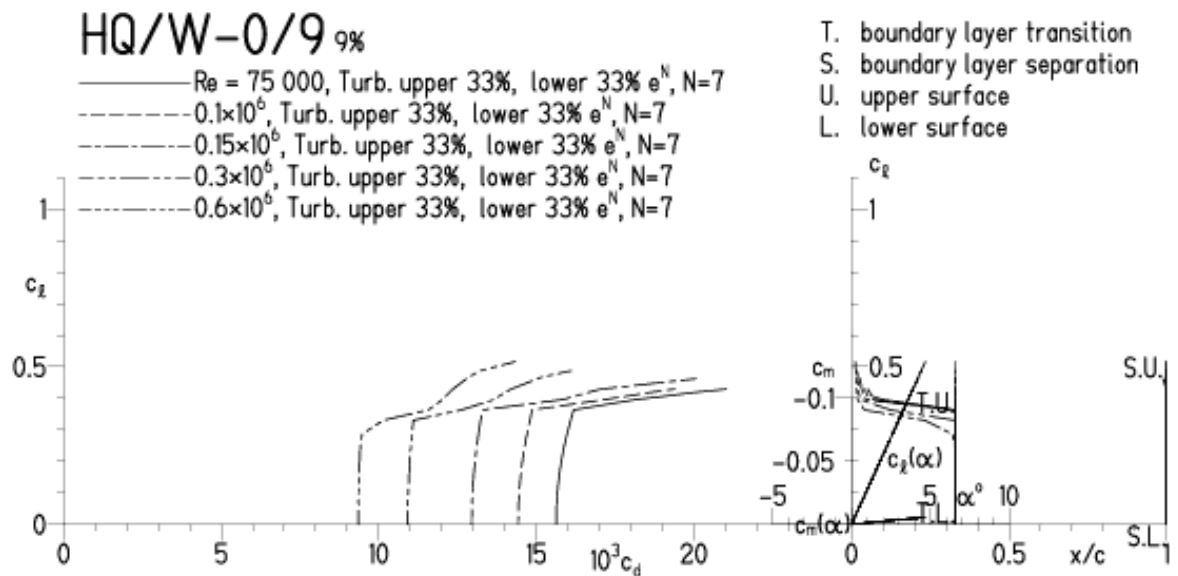


HQ/W-0/9, N=7, Turbulatoreffekt (Turbulatoren bei der größten Dicke)
 Erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Höhenleitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 12:15

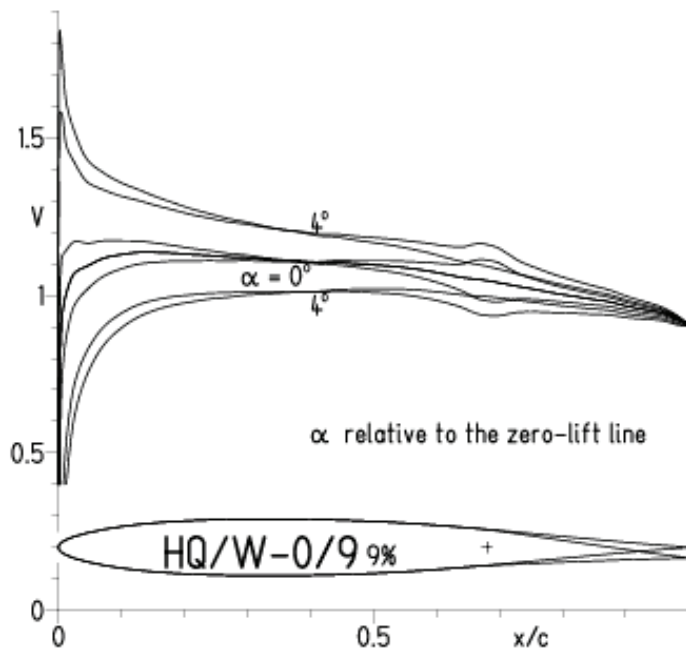


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 13.6.11 12:15

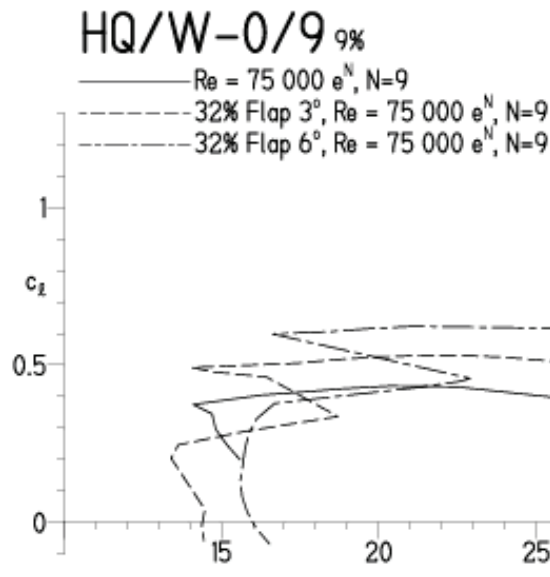


HQ/W-0/9, $N=9$, $Re = 75\,000$, Ruder mit 32% von I

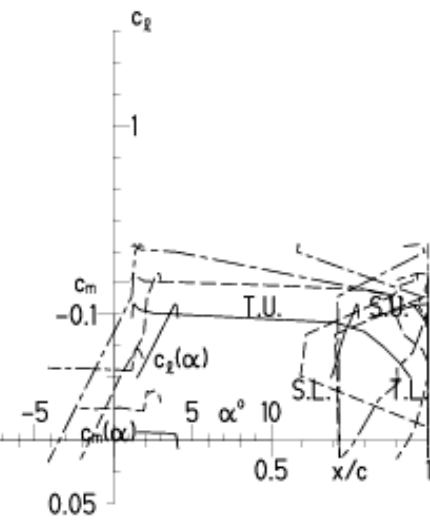
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:19



EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:19



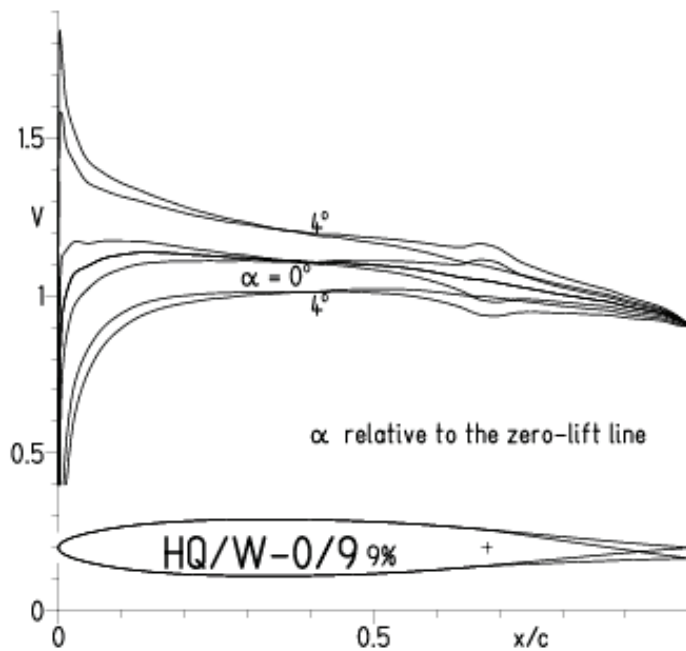
T. boundary layer transition
S. boundary layer separation
U. upper surface
L. lower surface



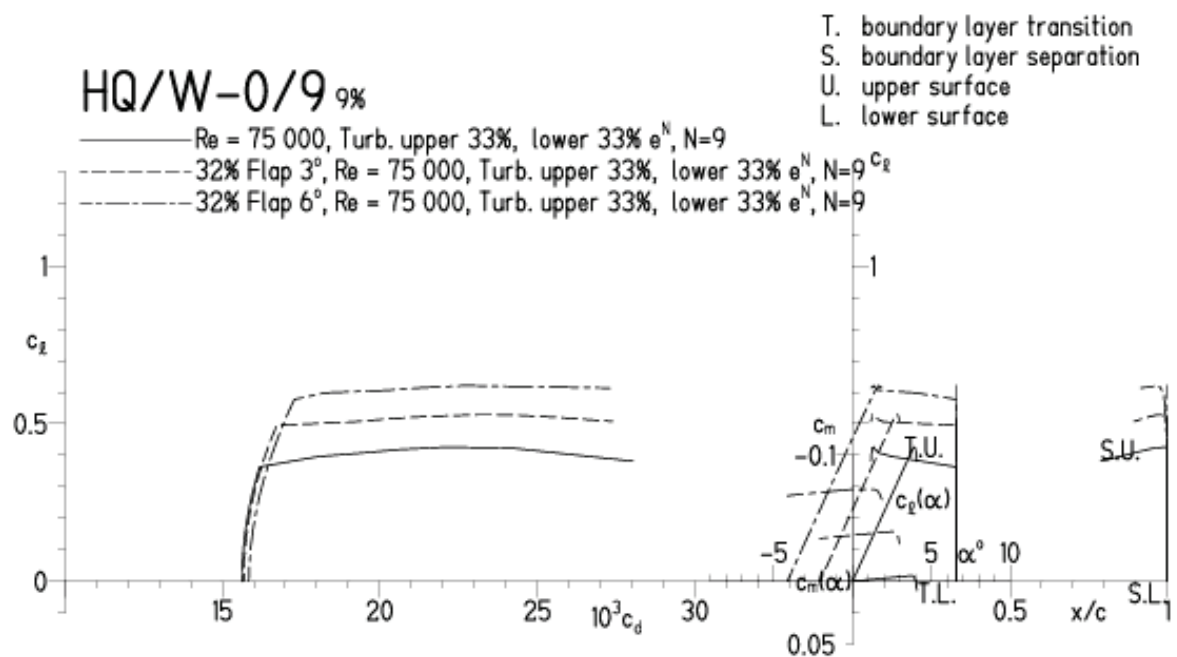
HQ/W-0/9, $N=9$, $Re = 75\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:23



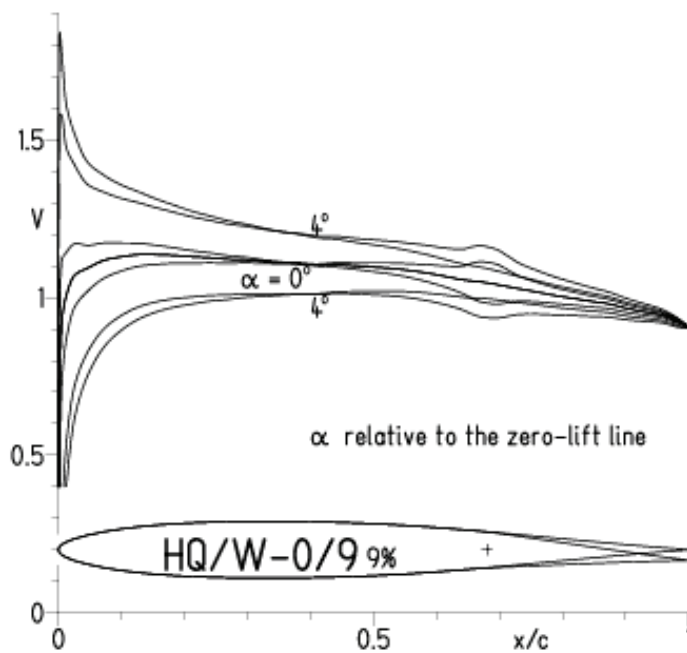
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:23



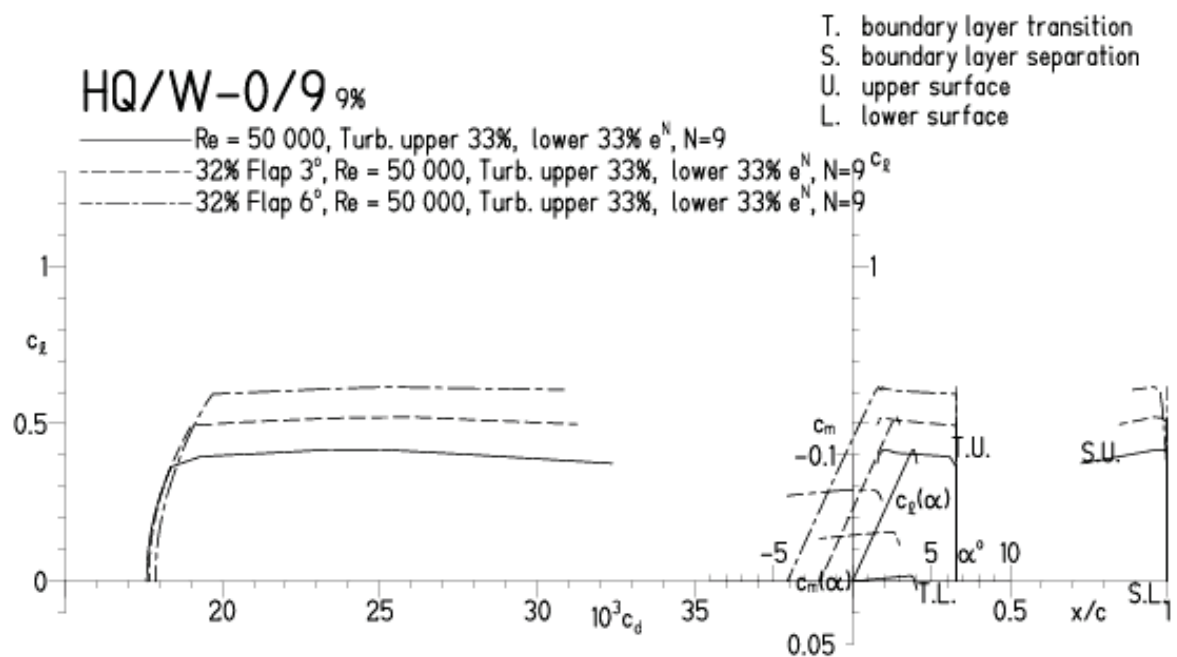
HQ/W-0/9, $N=9$, $Re = 50\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:25

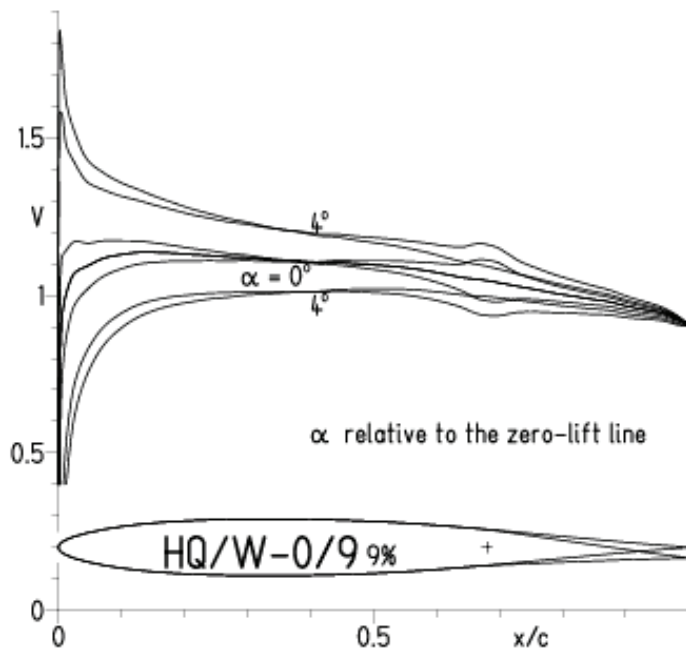


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:25

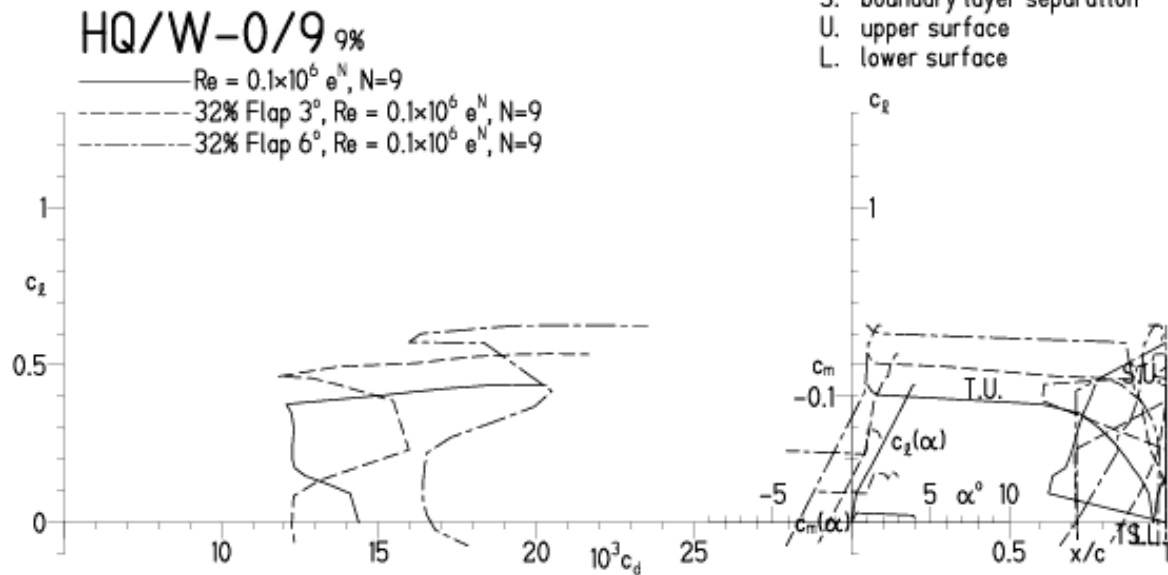


HQ/W-0/9, $N=9$, $Re = 100\,000$, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:34



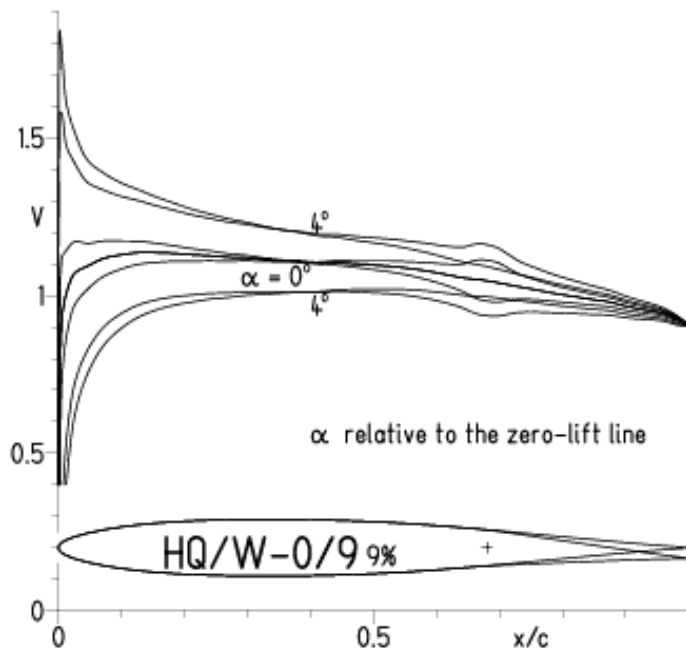
EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:34



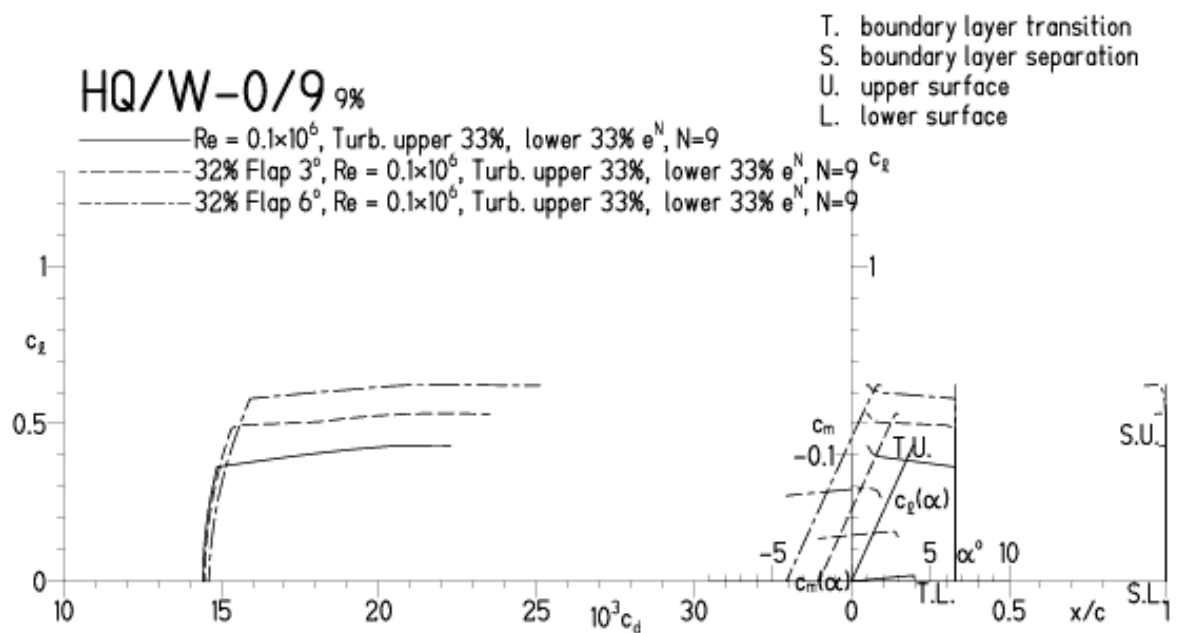
HQ/W-0/9, $N=9$, $Re = 100\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

Unbedingt doppelseitig erforderlich bei kleinen Re-Zahlen und geringen Leitwerkstiefen

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:37

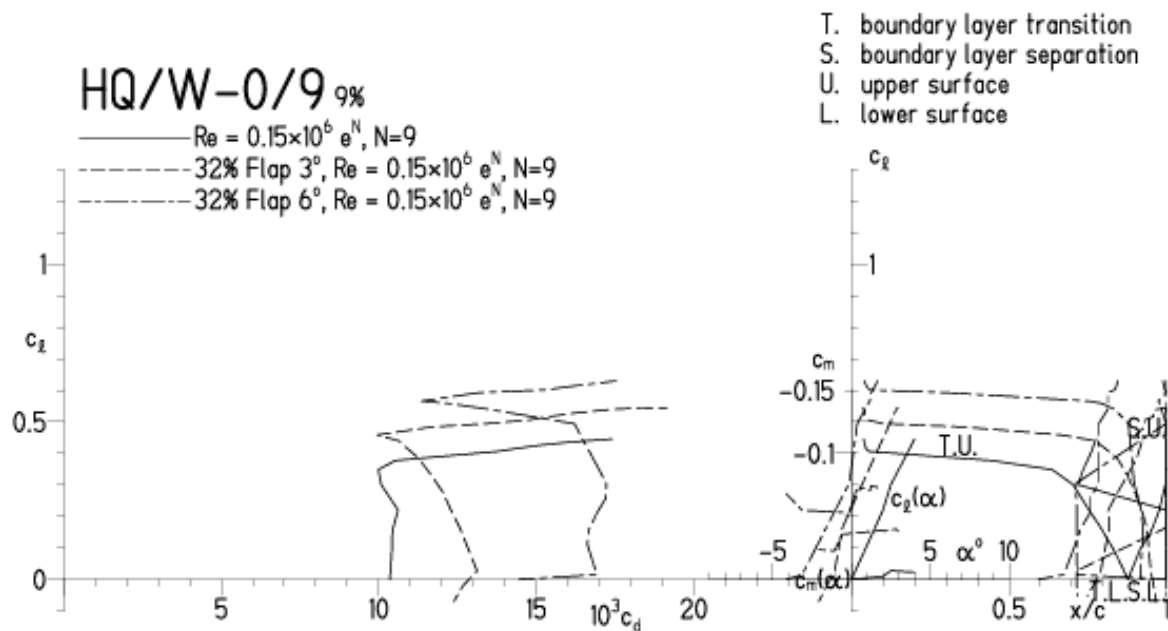


EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:37



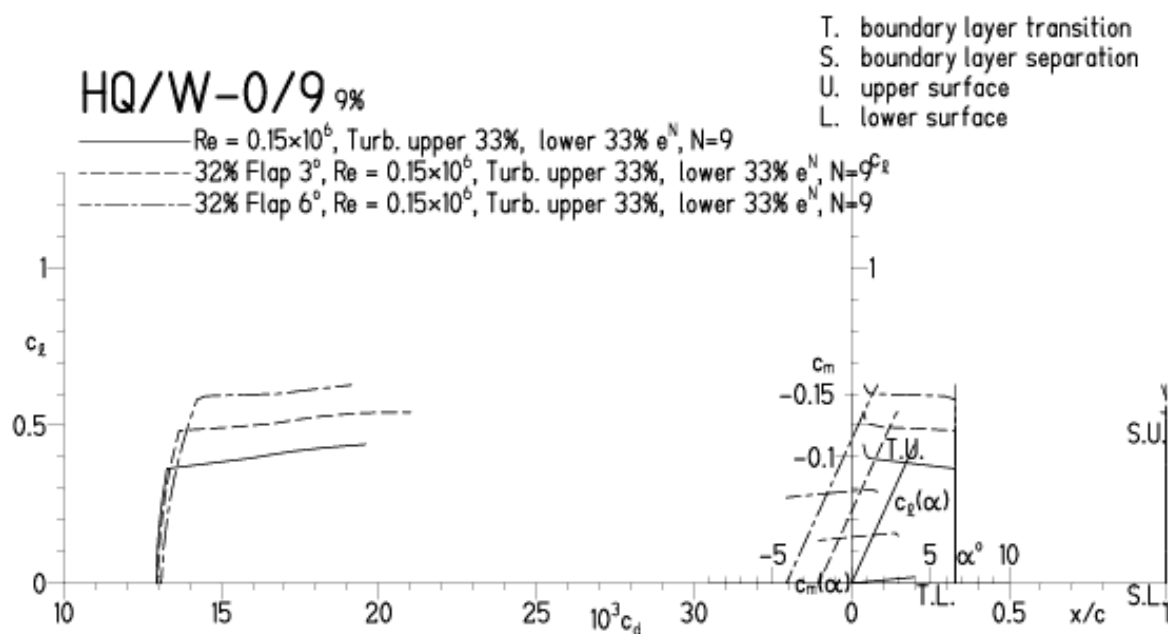
HQ/W-0/9, N=9, Re = 150 000, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:47



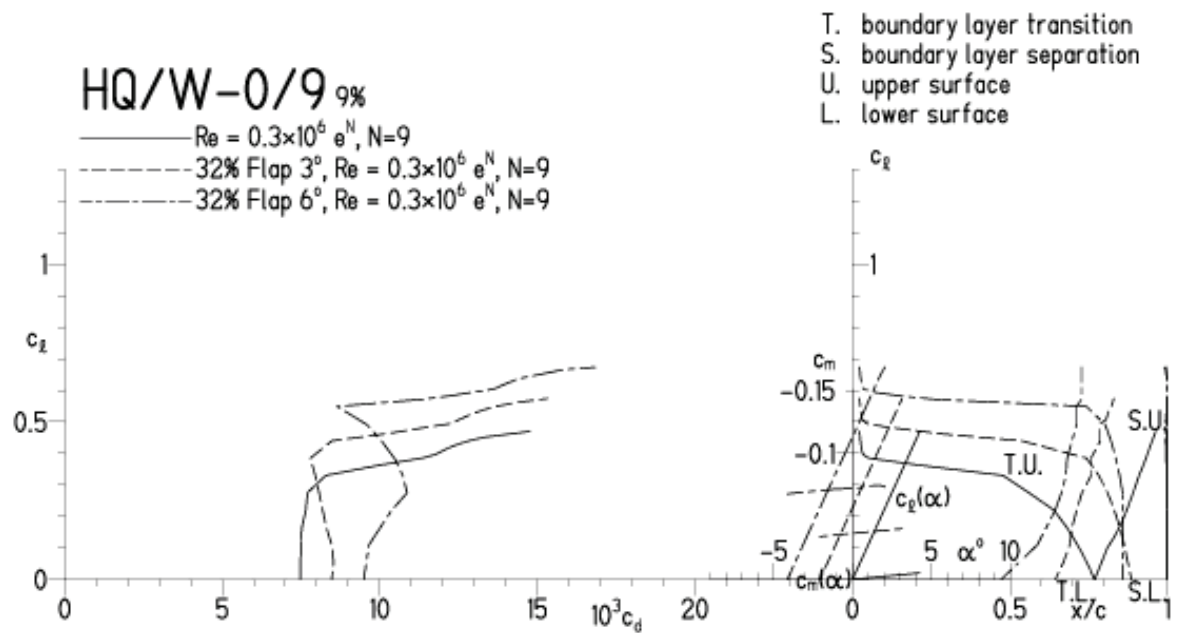
HQ/W-0/9, N=9, Re = 150 000, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 11:53



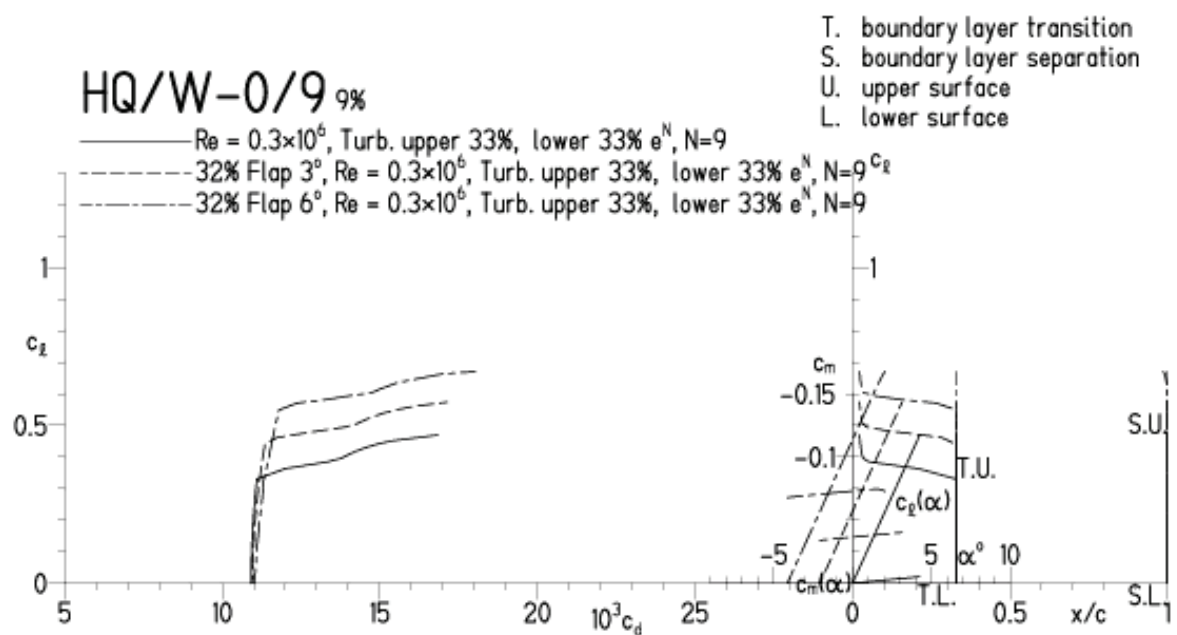
HQ/W-0/9, N=9, $Re = 300\,000$, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 12:08



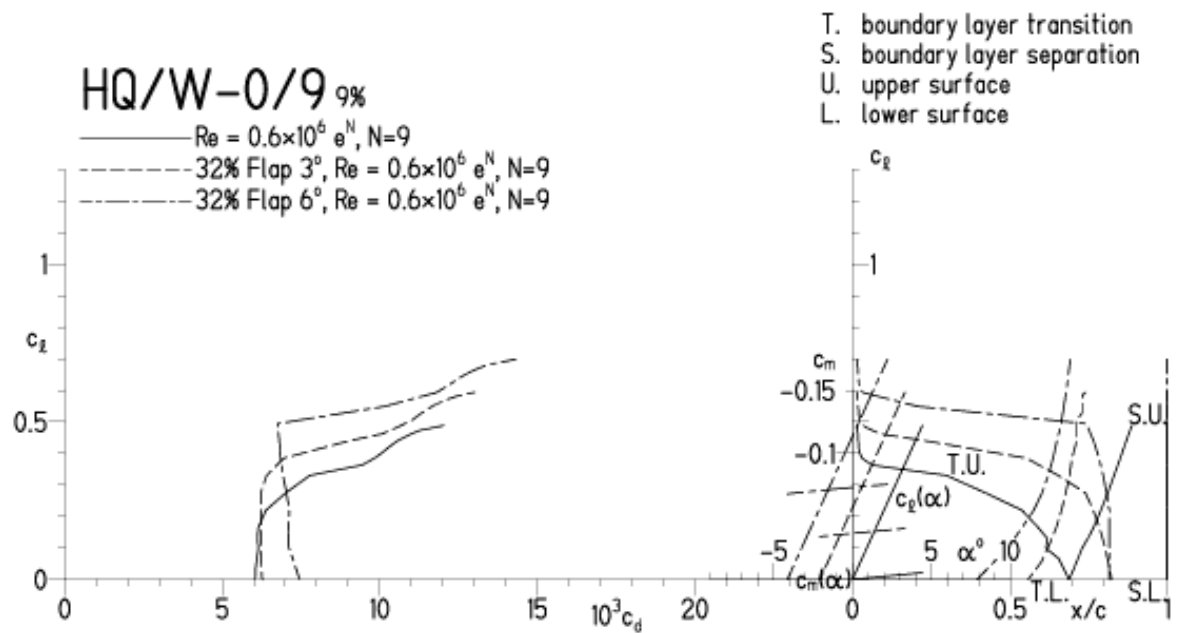
HQ/W-0/9, N=9, $Re = 300\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 12:10



HQ/W-0/9, N=9, $Re = 600\,000$, Ruder mit 32% von I

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 12:27



HQ/W-0/9, N=9, $Re = 600\,000$, Ruder mit 32% von I, Turbulatoreffekt

EPPLER 2005 V. 8.5.07 RUN 14.6.11 12:29

