

Die aerodynamische Auslegung der Antares



Die Antares ist ein selbststartfähiges Hochleistungssegelflugzeug mit elektrischem Antrieb, die seit 2004 in Serie gefertigt wird. An der Entwicklung der Antares war ein Netzwerk von international anerkannten Experten beteiligt. Der aerodynamische Entwurf des Segelflugzeuges wurde von Professor Boermanns von der TU Delft ausgeführt.

In diesem Artikel werden die grundsätzlichen Überlegungen zur Aerodynamik der Antares erläutert.

Basiskonzept Antares

Der erste Entwurf entstand aus einigen wenigen Daten: Die Spannweite sollte wahlweise 18 oder 20 m betragen. Die Hauptmaße des Cockpits waren festgelegt, die Position des Antriebssystems und der Rumpfquerschnitt am Leitwerksübergang. Das voraussichtliche Gesamtgewicht wurde geschätzt und die für eine optimale Flächenbelastung nötige Flügeloberfläche bestimmt. Mit der vorgegebenen Flügeloberfläche und der gewünschten Spannweite wurde, wie angestrebt, eine sehr hohe Streckung erreicht. Die Hauptmaße des Cockpits ergaben sich aus den Anforderungen an das Sicherheitscockpit.

Tragfläche mit minimalem Widerstand

Bei der Entwicklung der Tragflächen war das Ziel ein minimaler Widerstand über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Der Widerstand einer Tragfläche ergibt sich aus dem induzierten Widerstand - dem Tribut an einen ausreichenden Auftrieb - und dem Profilwiderstand.

Üblicherweise besteht der Widerstand einer Tragfläche bei Langsamflug (Thermikflug) zu etwa 60 % aus induziertem Widerstand und bei Schnellflug zu 60 % aus Profilwiderstand. Mit anderen Worten: Beim Langsamflug muss man versuchen, einen niedrigen induzierten Widerstand zu

erreichen, bei Schnellflug einen niedrigen Profilwiderstand.

Der niedrigste induzierte Widerstand bei allen Fluggeschwindigkeiten wird mit dem Einsatz einer elliptischen Tragflächengeometrie realisiert. Solch eine Tragfläche ist sowohl in der Spannweitenachse als auch in der Profilachse kontinuierlich gekrümmt und dadurch sehr schwierig zu fertigen. Deshalb wurde bisher die ideale elliptische Tragflächengeometrie durch den Einsatz von einfach oder mehrfach verjüngten Tragflächentrapezen näherungsweise nachgebildet. Mit modernen computergesteuerten Fräsmaschinen können inzwischen sehr genaue und komplexe Formen gebaut werden. Diese Möglichkeit wurde bei den Tragflächenentwürfen der Antares aufgegriffen, um den kleinstmöglichen induzierten Widerstand zu verwirklichen. Die Tragflächenprofile wurden von Anfang an für Wölbklappen ausgelegt. Deren Drehachse sollte bei 85 % der Profiltiefe liegen. Die Drehachse der Wölbklappen ist die einzige gerade Linie an der elliptischen Tragflächengeometrie. Die Drehachse liegt in der Nähe der - nur leicht gekrümmten - Tragflächenhinterkante, wodurch für die Vorderkante der Tragflächen eine kontinuierlich verlaufende Pfeilung möglich wurde mit Vorteilen für die Richtungsstabilität.

Ein Nachteil der elliptischen Tragflächengeometrie ist, dass die Tragflächentiefe an den Tragflächenenden sehr schmal wird, was wiederum den Profilwiderstand ungünstig beeinflusst. Um dieses Problem zu lösen, wurde - zum ersten Mal beim Segelflugzeugbau - eine superelliptische Tragflächengeometrie entworfen, die an der Hinterkante der Außentragfläche nach hinten abknickt. Die Berechnungen zeigen, dass der Tragflächenwiderstand der Antares nur 0,1 % größer ist als der theoretisch minimale Tragflächenwiderstand, womit sich gleichzeitig die Erwartungen an einen niedrigen Profilwiderstand erfüllen.



Wie eingangs ausgeführt, hat eine Tragfläche mit einer elliptischen Tragflächengeometrie theoretisch den geringsten induzierten Widerstand. Dies ist aber nur für flache Tragflächen richtig. Durch das Hochbiegen der Tragflächen im Flug kann der induzierte Widerstand weiter verringert werden. Hier sind Winglets, die eine seitlich gerichtete Auftriebskomponente entstehen lassen, die effektivste Lösung. Angesichts des Umstands, dass auch sie ihren Preis in Form von weiterem Profilwiderstand fordern - und des Umstands, dass die Summe dieser beiden Komponenten eine Widerstandsverringerng ergeben muss - bedürfen Winglets eines sehr sorgfältigen Entwurfs. Windkanaluntersuchungen haben gezeigt, dass die in Delft eingesetzte Entwicklungsmethode erfolgreich war. Sowohl für die 20m- als auch für die 18m-Ausführung ist es gelungen, Winglets zu entwickeln, die den induzierten Widerstand auf sein theoretisches Minimum begrenzen. Der Preis für die Verringerung des induzierten Widerstands - die Erhöhung des Profilwiderstands der Winglets - fällt nur bei sehr hohen Fluggeschwindigkeiten ins Gewicht, bei Fluggeschwindigkeiten außerhalb des Entwurfsbereichs.

Viel Mühe wurde auf das Entwickeln von Tragflächenprofilen mit niedrigst möglichem Widerstand verwendet. Dabei ist es essentiell, dass durch passende Formgebung die Grenzschicht an der Ober- und der Unterseite des Profils so lange wie möglich laminar verläuft. Da die Profildicke darauf einen großen Einfluss hat, sollten die Profile so dünn wie möglich ausgebildet sein - gerade dick genug, um die erforderliche Auftriebskoeffiziente zu erzielen. Durch eine Kombination von Erfahrung und Verwendung von Entwicklungsprogrammen ist es gelungen - was Windkanalmessungen bewiesen haben - ein 12,7 % dickes Profil zu entwickeln, das bei der Wölbklappenstellung "Schnellflug" die laminare Strömung an der Profilunterseite über 95 % der Profiltiefe aufrecht hält.

Dies ist das theoretisch erreichbare Maximum für den benötigten Auftrieb. Die Strömung bleibt über den flexibel abgedichteten Wölbklappenübergang hinweg laminar. Um einem unkontrollierten Abreißen der laminaren Strömung und einer daraus resultierenden Zunahme des Widerstands zuvorzukommen, wird die Grenzschicht bei 95 % der Profiltiefe künstlich durch ein Zackenband verwirbelt. Auf der Oberseite des Profils bleibt die laminare Grenzschicht über bis zu 75 % der Profiltiefe erhalten. Eine noch weiter reichende laminare Grenzschicht würde im hinteren Profilbereich einen sehr steilen Druckgradient erzeugen. Bei Thermikflügen mit den für sie typischen, variierenden Anströmwindwinkeln würde die Strömung über den Wölbklappen abreißen und Auftriebsverluste und unerwünschte Flugeigenschaften zur Folge haben. Windkanaluntersuchungen haben gezeigt, dass das für die Antares entwickelte Profil im Thermikflug keine Auftriebsverluste verursacht. Es hat bei allen Wölbklappenstellungen den niedrigsten Widerstand sämtlicher in Delft vermessener Segelflugzeugprofile.

Das Basisprofil wurde an der Profiloberseite im Bereich der Innen- und Außenflügel angepasst, wo bedingt durch die unterschiedlichen Profiltiefen auch unterschiedliche Strömungsbedingungen herrschen. Für die Winglets wurden zwei Profile entwickelt: eines für die Winglet-Wurzel und eines für die Winglet-Spitze. Aufgrund des benötigten Auftriebskoeffizienten ist die Unterseite der Winglets (die nach außen gerichtete Oberfläche) völlig laminar. Auf der Oberseite muss die laminare Grenzschicht bei ungefähr 55 % der Profiltiefe durch ein Zackenband verwirbelt werden, um das Entstehen von schädlichen laminaren Abreißenblasen zu verhindern.



Flügel-Rumpf-Übergang

Besondere Aufmerksamkeit erhielt auch der Flügel-Rumpf-Übergang. Der Rumpf erzeugt ein Strömungsfeld, das den örtlichen Anstellwinkel im Flügel-Rumpf-Übergang erheblich vergrößert. Außerdem ist die Strömung am Flügel-Rumpf-Übergang immer turbulent. Das Profil des inneren Flügels ist nicht für diese Strömungssituationen entworfen. Wird - wie durchaus bei Segelflugzeugen üblich - von einer Anpassung des Profils im Flügelwurzelbereich abgesehen, so wird die laminare Grenzschicht auf der Tragflächenober- und Unterseite vorzeitig verwirbelt. Und es kommt auf der Tragflächenoberseite zu vorgelagerten Strömungsabrissen. Die Widerstandserhöhung als Resultat dieser Flügel-Rumpf-Interferenz erhöht das Sinken sowohl beim Langsamflug (Thermikflug) als auch beim Schnellflug (Vorflug).

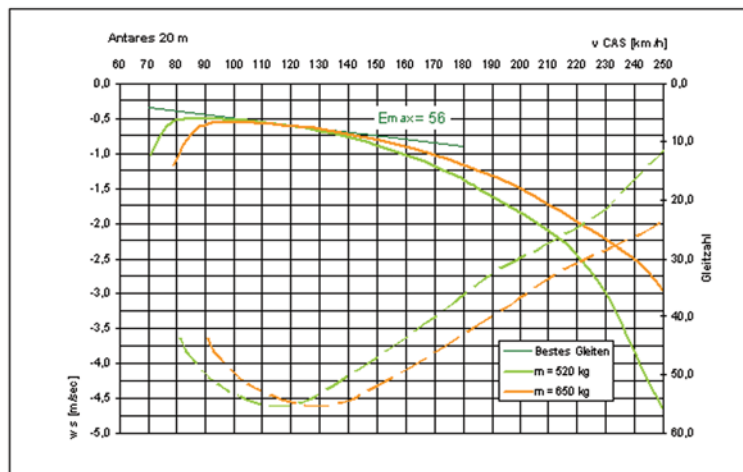
Beim Entwurf des Flügelwurzelbereichs konnte erfolgreich von einem neuen Entwurfsprogramm Gebrauch gemacht werden. Die Oberfläche wird hierbei als große Anzahl kleiner Paneele dargestellt, und es wird die Strömung bis zur Mitte eines jeden Paneels berechnet. In dem Entwurfprozess wird - genauso wie bei der Profilentwicklung - nicht die Profilgeometrie manipuliert, sondern die Druckverteilung, aus der wiederum das gewünschte Grenzschichtverhalten resultiert. In diesen Fall wird nach einer möglichst weit laminar bleibenden Grenzschicht gesucht, die auch keine Abrisse zum Flügel-Rumpf-Übergang hin produziert. Es wurde berechnet, bis zu welcher Flächentiefe dies überhaupt möglich ist und wie dafür die Geometrie aussehen müsste. Dieser Prozess liefert durchaus unerwartete oder unpraktische Geometrien, zum Beispiel sehr dicke oder sehr dünne Flügel-Rumpfübergänge. Durch einen iterativen Prozess von Berechnungen und Anpassungen wurde nach der bestmöglichen Lösung gesucht. Bei der Antares ist es gelungen, die Profilierung des Flügel-Rumpf-Übergangs so auszuführen, dass die Grenzschicht

auf der Profillober- und Unterseite nicht frühzeitig verwirbelt oder abreißt. Die Flugerprobung hat gezeigt, dass der Pilot auch ohne Strömungsabriss im Flügel-Rumpfübergang ausreichend gut wahrnehmbare Überziehungswarnungen erhält.

Rumpf

Auch beim Entwickeln des Rumpfs haben Windkanalerfahrung und Computerberechnungen eine große Rolle gespielt. Mehr als 14 Flügel-Rumpf-Kombinationen wurden bisher im Windkanal in Delft nachgemessen, so dass mittlerweile bekannt ist, welche Maßnahmen den Widerstand verringern. Viele Crashtests mit Segelflugzeugrümpfen und Dummy-Puppen beim TÜV Rheinland und der Fachhochschule Aachen haben gezeigt, welche konstruktiven Maßnahmen die Crashbeständigkeit verbessern. Eine Verlängerung und Erhöhung des Rumpfes ist in diesem Bereich die am besten funktionierende Maßnahme.

Mit Hilfe aerodynamischer Rechenwerkzeuge wurde eine Parameteruntersuchung angestellt, um die Einflüsse von Rumpflänge, Rumpfhöhe und Rumpfeinschnürung auf den Gesamtwiderstand besser zu verstehen. Überraschend war dabei der Effekt einer größeren Rumpflänge; die überströmte Oberfläche wird zwar größer, aber der Reibungswiderstand des Cockpits wächst durch den verminderten Druckgradient weniger schnell. Die Berechnungen ergaben, dass eine Verlängerung des Rumpfes nicht zu einem erhöhten Widerstand führt. Mit einer Vergrößerung der Cockpithöhe muss dagegen sehr vorsichtig umgegangen werden. Sehr effektiv für die Widerstandsverminderung ist die Rumpfeinschnürung. Ihre Grenze liegt bei einer so starken Einschnürung, dass bei Einflug in Regen unkontrollierte Strömungsabriss Verwirbelungen am gesamten Rumpf entstehen lassen.



Neben Widerstand und Crashbeständigkeit ist beim Entwurf von Rumpf und Cockpit der Haubenausschnitt und die daraus resultierende Sicht des Piloten sehr wichtig - besonders bei Start und Landung. Die Lage des Rumpfes auf dem Boden (Fahrwerkshöhe) in Kombination mit dem Anstellwinkel der Tragflächen hat großen Einfluss auf die Wirksamkeit der Querruder beim Start. All diesen Aspekten wurde beim Entwurf des Rumpfes der Antares Rechnung getragen. Es wurde das Strömungsbild für unterschiedliche Fluggeschwindigkeiten vor und hinter den Tragflächen berechnet. Um den Widerstand zu minimalisieren muss der Rumpf so gut wie möglich in das Strömungsbild um die Tragflächen eingepasst werden. Vorteilhaft dabei, dass dank der Wölbklappen der Anströmwinkel von Flügel und Rumpf im gesamten Geschwindigkeitsbereich nur um wenige Grade verändert wird. Dadurch ist es möglich, den Rumpf viel besser in das Strömungsbild einzupassen als bei Segelflugzeugen ohne Wölbklappen. Bei ihnen wird die Geschwindigkeit nur über das Höhenleitwerk geregelt und der Anströmwinkel an den Flächen variiert viel stärker.

Die Bauchlinie, die Rückenlinie und die Linie über die größte Breite des Cockpits wurde von den Tragflächenprofilen abgeleitet. Dabei wurde von einer Methode Gebrauch gemacht, die ein zweidimensionales Tragflächenprofil in einen dreidimensionalen Körper verwandelt. Die Einschnürung des Rumpfes hinter dem Kopf des Piloten und der Sitzwanne konnte dank der geringen Maße des Elektromotors, der Schwenkbarkeit der Propellerblätter und der kompakten Ausführung des hydraulischen Fahrwerks völlig unabhängig von ihrem Platzbedarf gestaltet werden. Bei der seitlichen Rumpfeinschnürung wurde dem Effekt auf die Druckverteilung an der Tragflächenwurzel besonders sorgfältig Rechnung getragen. Dabei entstanden Rumpfquerschnitte aus deformierten Ellipsen. Diese haben die spezielle Eigenschaft, dass die Kurve entlang des Umfangs kontinuierlich verläuft,

genau so wie die Kurven entlang der Bauchlinie, der Rückenlinie und der Linie entlang der größten Breite. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig für einen gleichmäßigen Druckverlauf und für eine störungsfreie Entwicklung der Grenzschicht am Rumpf.

Es ist ein Rumpf entstanden, der nach jetzigen Erkenntnissen ein Minimum an Widerstand mit einem Maximum an Sicherheit kombiniert.

Professor Loek M.M. Boermanns leitet an der TU Delft das Institut für die Aerodynamik niedriger Geschwindigkeiten und ist als der Vater des Niedergeschwindigkeitswindkanals der TU Delft bekannt. Er ist außerdem Präsident der OSTIV, der Organisation zur wissenschaftlichen Erforschung des Segelflugs.

*Text: Loek Boermanns,
übersetzt aus dem Holländischen von
Lange Flugzeugbau und stefan maikowski
Fotos: Antares*