



JEDE MENGE ERFAHRUNG:
Erwin Salzinger und Professor
Loek Boermans am Windkanal
der TU Delft.



Fotos: Marzinzik (2), whiteplanes.com

FÜR DIE DIPLOMARBEIT
untersuchte der Aerodynamiker
Luke Rebbeck alle gängigen
Düsen auf ihre Zuverlässigkeit.

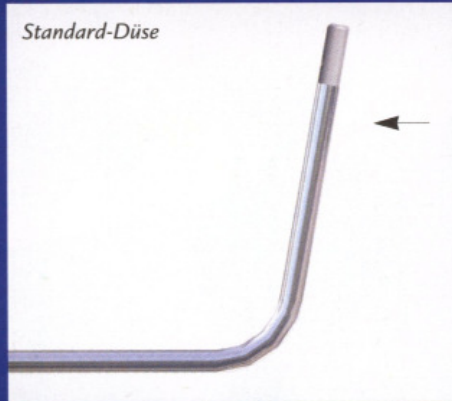
Beim Segelflug ist eine zuverlässige Totalenergiekompensation unverzichtbar. Die dafür eingesetzten TEK-Düsen arbeiten aber nicht immer einwandfrei. In einer Diplomarbeit wurden nun erstmals alle Vor- und Nachteile gängiger Sonden untersucht.

ENTSCHEIDEND IST NICHT NUR DIE FORM

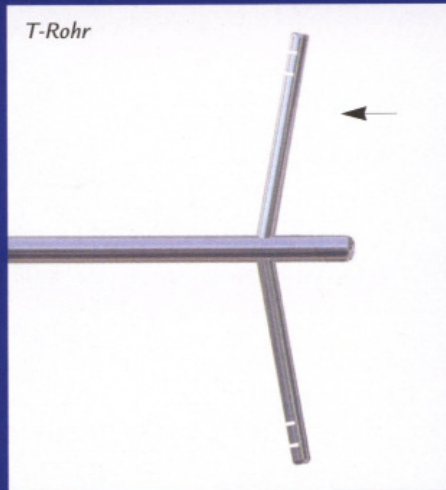
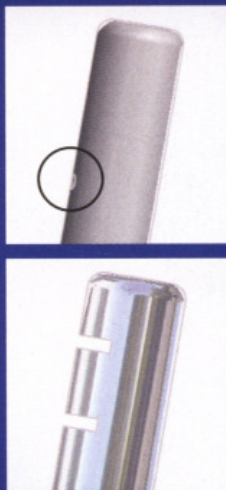
TEK-Düsen im



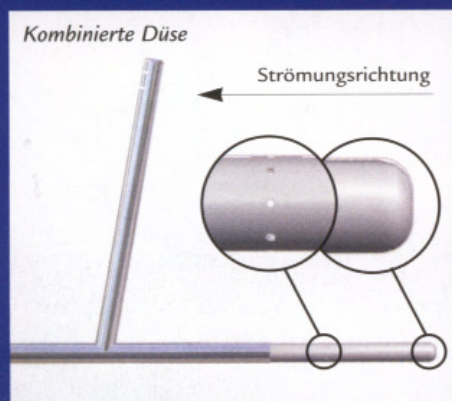
Windkanaltest



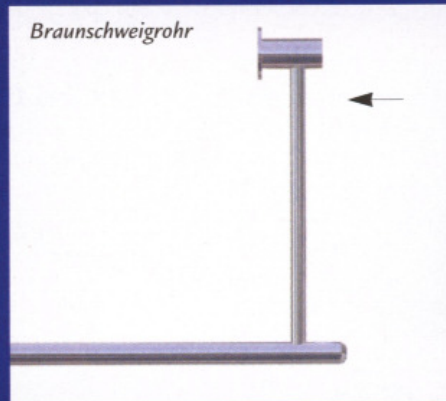
WEIT VERBREITET sind diese gebogenen Düsen, wahlweise mit Bohrungen oder Schlitzen.



T-ROHRE mit beidseitiger Druckentnahme zeigten im Test zwispaltige Resultate, hier kommt es vor allem auf die Einbaulage an.



DREI-WEGE-DÜSEN kombinieren die Totalenergiekompensation mit Öffnungen für Staudruck und statischen Druck.



AUF EINER VENTURI-DÜSE basiert das Braunschweigerohr, benannt nach seinen Erfindern bei der Akaflieg Braunschweig.

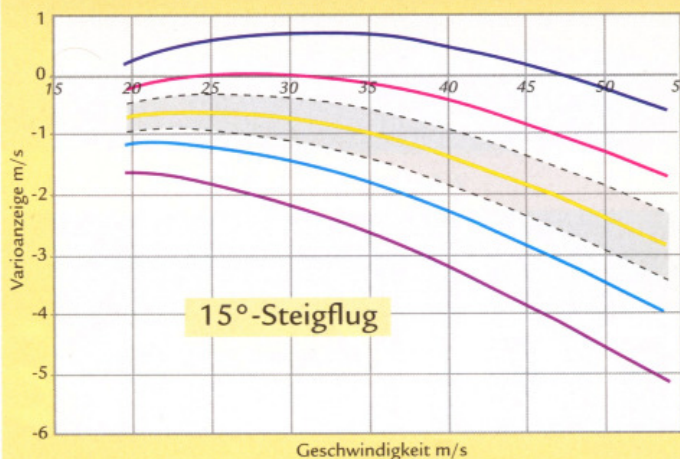
Ich dreh jetzt schon seit Stunden hier so meine Runden...“ Ganz so lang wie im Song von Herbert Grönemeyer dauert das Thermikkurbeln nicht, trotzdem verbringen Piloten bei einem typischen Überlandflug einen großen Teil der Zeit damit, sich in Aufwinden nach oben zu schrauben. Um das Flugzeug möglichst schnell im besten Steigen zu platzieren, braucht man ein gut kompensiertes Variometer. Die Fahrtwechsel, die gerade beim Einflug in einen Aufwind und anschließend während des Zentrierens stattfinden, dürfen sich nicht im Variosignal widerspiegeln. Das sollte vollkommen unabhängig vom Wechsel kinetischer Energie (Geschwindigkeit) in potenzielle Energie (Höhe) sein. Die dafür notwendige Totalenergiekompensation (TEK) besorgt, sofern sie nicht elektronisch erfolgt, ein unscheinbares Metallrohr, meist untergebracht am Seitenleitwerk: die Totalenergiedüse.

In allen erdenklichen Bauformen sind diese filigranen Sonden mittlerweile erhältlich. Die klassischen Versionen bestehen aus einem einzelnen gebogenen Rohr, das auf seiner Rückseite unterhalb der Spitze mit zwei runden Bohrungen oder Schlitzen versehen ist. Abweichend davon kommen auch Venturi-Düsen oder in T-Form ausgeführte Son-

den mit beidseitiger Druckentnahme (siehe Abbildungen) zum Einsatz. Die Entscheidung für oder wider eine Düsenform fällt meistens anhand persönlicher Erfahrungen des Piloten. Eine strömungstechnische Vermessung der einzelnen Modelle und eine damit verbundene Empfehlung für eine verlässliche Totalenergiedüse gab es bislang nicht. Eine Versuchsreihe im Windkanal der

Technischen Universität (TU) in Delft hat nun erstmals alle gängigen Bauformen dieser Düsen nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten miteinander verglichen. In seiner Diplomarbeit hat der Aerodynamiker Lutz Rebbeck dabei detailliert die Stärken und Schwächen der einzelnen Konstruktionen untersucht. Seine Arbeit wurde betreut von Professor Loek Boermans, von dem fast alle

Kompensationsfehler und ihre Auswirkungen



BEREITS GERINGE ABWEICHUNGEN des Druckbeiwertes führen zu falschen Anzeigen des Variometers. Die Grafik verdeutlicht die Auswirkungen von Über- und Unterkompensation bei 15 Grad Steigflug.

Über- und Unterkompensation

Tragflügelprofile moderner Segelflugzeuge stammen. Die Totalenergiedüsen lieferte Erwin Salzinger, der als Hersteller naturgemäß ein sehr großes Interesse an dieser Untersuchung hatte.

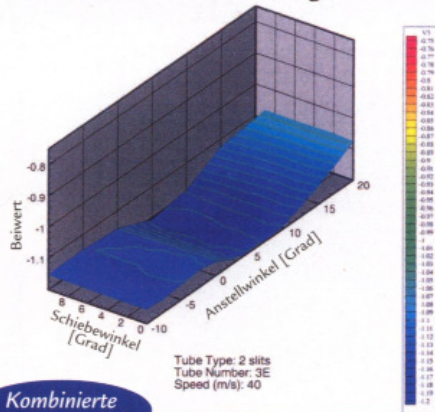
Bei den Messungen im Windkanal lag das Hauptaugenmerk auf dem Druckbeiwert der Düse. Idealerweise liefert eine TEK-Düse einen Druckbeiwert von -1 , und zwar in jeder Strömungssituation und bei jeder Geschwindigkeit. Das Variometer zeigt dann die Vertikalbewegung an, die sich aus dem polaren Sinken und der Luftmassenbewegung ergibt. Wächst der Beiwert ins Negative, tritt eine Überkompensation auf. Ist umgekehrt der Beiwert größer als -1 , so ergibt sich eine Unterkompensation. Beide Phänomene verfälschen die Variometeranzeige. Beim Hochziehen mit einem Steigwinkel von 15 Grad kann ein nur leicht überkompensierendes Vario mit einem Beiwert von $-1,1$ die Anzeige schon um die Hälfte verfälschen. Bei 72 km/h zeigt es dann eine falsche Sinkrate von $1,2$ m/s statt der realen $0,8$ m/s. Eine Überkompensation mit einem Beiwert von $-0,8$ würde bei 126 km/h dagegen eine Steigrade von $1,6$ m/s anzeigen, obwohl das Segelflugzeug eigentlich mit 1 m/s sinkt. Der Bereich, in dem die Beiwerte als annehmbar gelten können, wurde daher mit ± 5 Prozent festgelegt. Für eine zuverlässige Kompensation muss der Beiwert stets zwischen $-1,05$ und $-0,95$ liegen.

Einen solchen Beiwert sollte die Düse auch dann haben, wenn sie nicht exakt von vorn, sondern durch seitliches Schieben oder eine Änderung des Anstellwinkels schräg angeströmt wird. In solchen Fällen entsteht häufig eine falsche Kompensation.

Um diese Verhältnisse im Windkanal zu simulieren, konstruierte Luke Rebbeck einen Teststand, der es erlaubte, die Düsen im Luftstrom um zwei Achsen zu drehen. Eine Rotation um die Hochachse simulierte die Bedingungen bei einer seitlichen Anströmung, wie sie beim Schieben in einem turbulenten Aufwind auftreten kann. Schiebewinkel größer als zehn Grad sind hier aber eher die Ausnahme, der Messbereich lag daher zwischen null und zehn Grad. Eine zusätzliche Neigung erzeugte Strömungsverhältnisse, wie sie bei Veränderung des Anstellwinkels im Flug vorherrschen. Hier umfasste der Messbereich eine Spanne von -10 bis $+20$ Grad. Jede während der Bewegungen entstehende Abweichung vom idealen Druckbeiwert der Düsen veranschaulicht die Abschlussarbeit von Luke Rebbeck detailliert in einer dreidimensionalen Grafik.

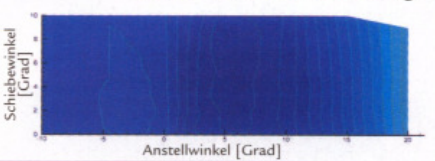
Einzelne Düsenformen zeigen hier teils sehr starke Abweichungen vom Idealwert. Während Standardmodelle mit runden Löchern fast durchgängig zur Unterkompensation neigen, zeigen geschlitzte Düsen oftmals eine auffällige Überkompensation. Drei-

Dreidimensionale Darstellung

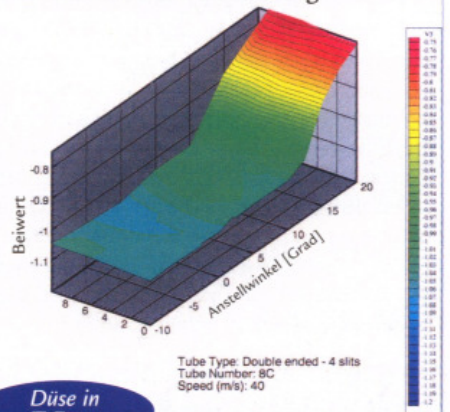


Kombinierte Düse

Zweidimensionale Darstellung

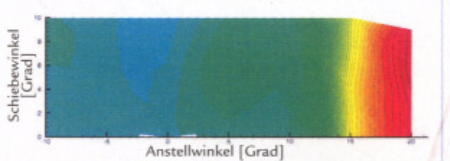


Dreidimensionale Darstellung



Düse in T-Form

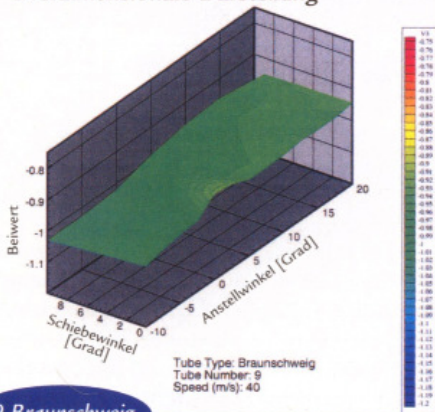
Zweidimensionale Darstellung



DIE GRAFIKEN zeigen den Beiwert in den verschiedenen Fluglagen, hier eine starke Über- (blau) und Unterkompensation (rot).

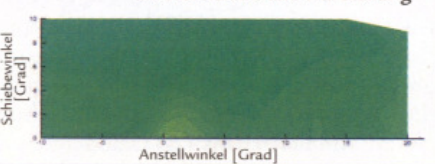
Empfehlungen

Dreidimensionale Darstellung

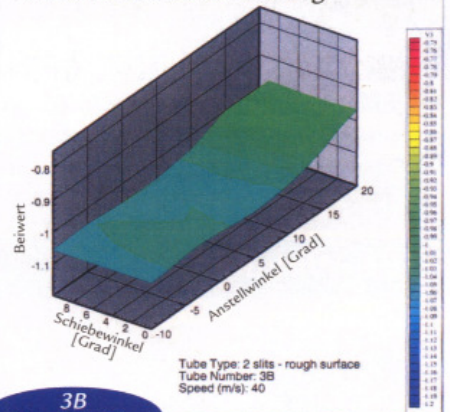


9 Braunschweig

Zweidimensionale Darstellung

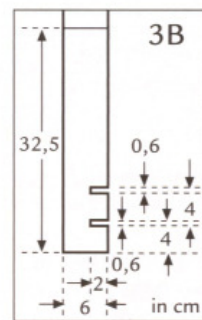
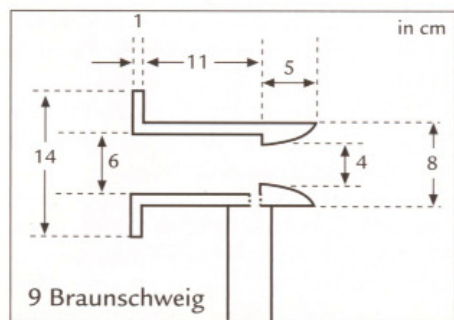
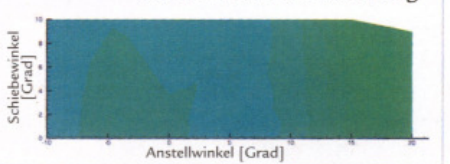


Dreidimensionale Darstellung



3B Standard-Düse

Zweidimensionale Darstellung



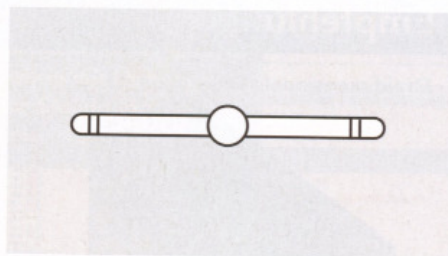
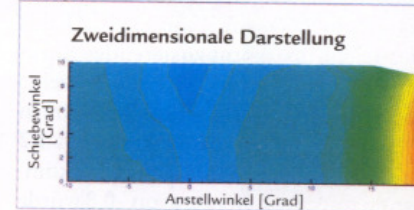
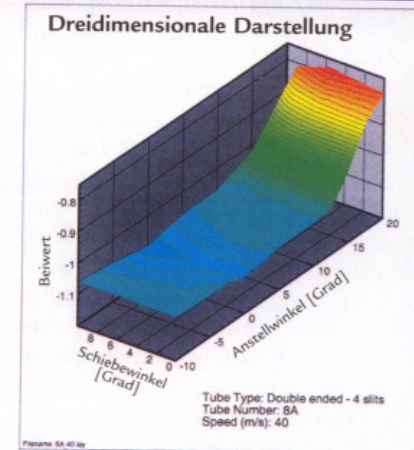
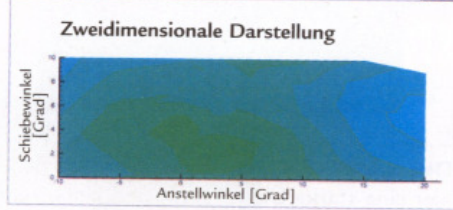
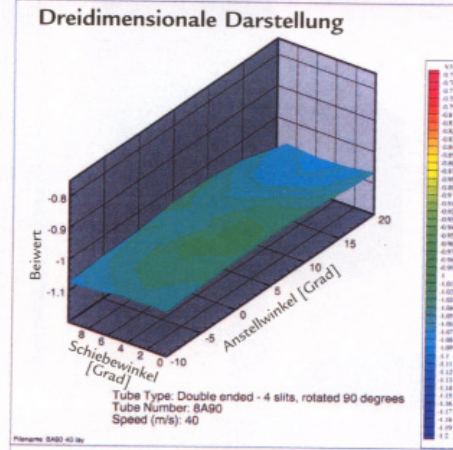
DIE TESTSIEGER waren zum einen das Braunschweig Rohr und eine geschlitzte Standarddüse mit aufgerauter Oberfläche sowie schmaleren und weniger tief ausgeführten Schlitzen, siehe Maßangaben.

Wege-Düsen weichen dabei noch stärker in die jeweilige Richtung ab. Eine der geschlitzten Düsen ragt jedoch positiv aus dem Testergebnis heraus und bleibt über weite Strecken des Testzyklus innerhalb einer annehmbaren Toleranz. Von der Form her nahezu identisch mit anderen geschlitzten Düsen, sind ihre Schlitze jedoch schmaler und weniger tief ausgeführt (siehe Abbildung). Ein Zeichen dafür, dass nicht nur die allgemeine Form, sondern auch die Maße und Abstände der Drucköffnungen eine merkbare Auswirkung auf den Druckbeiwert haben können.

Unempfindlich beim Schieben, Probleme mit Anstellwinkeln

Als Sieger stellt sich jedoch eine Bauform ganz ohne Schlitze oder Löcher heraus: das so genannte Braunschweig-Rohr. Diese zylindrische Konstruktion mit Venturi-Düse zeigt in nahezu allen Anströmungswinkeln einen Beiwert innerhalb der Toleranz. Aufgrund ihrer symmetrischen runden Form mit einer angebrachten runden Scheibe führen weder starkes seitliches Schieben noch große Änderungen des Anstellwinkels zu merklichen Abweichungen vom idealen Druckbeiwert. Beeinflussen lässt sich diese Bauform jedoch von der Geschwindigkeit der Anströmung. Im Langsamflug (90 km/h) überkompensiert die Düse geringfügig, während sie sich bei einer höheren Geschwindigkeit (144 km/h) im Bereich der leichten Unterkompensation bewegt. Dabei wurde der akzeptable Wertebereich aber nie verlassen.

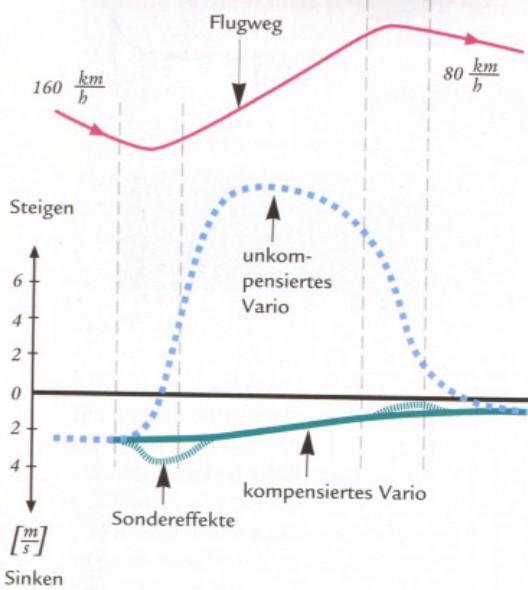
Phänomene bei T-Rohren



STARK ABHÄNGIG von der Einbaulage sind die T-Rohre. Aufrecht noch ohne brauchbaren Beiwert, liegen sie um 90 Grad gedreht nahe am Ideal.



TEK-Wirkung



WIE WICHTIG eine gute Kompensation ist, zeigen die kompensierte und nicht-kompensierte Vario-Anzeige in der Grafik.

Alle im Windkanal getesteten Düsenmodelle zeigten sich als recht schiebeunempfindlich, die Abweichungen durch eine Veränderung des Anstellwinkels jedoch ließen viele Modelle aus dem mit ± 5 Prozent festgesetzten Toleranzbereich herausfallen. Am weitesten außerhalb bewegten sich im Test die Druckbeiwerte der Sonden in T-Form. Auch sie zeigten sich im Test relativ unempfindlich gegenüber seitlichem Schieben, große Anstellwinkeländerungen lösten bei diesen Modellen jedoch starke Abweichungen aus. Im Bereich bis 12,5 Grad zeigten sie noch halbwegs akzeptable Werte bei leichter Überkompensation. Überschritten diesen Bereich, fiel der Wert in eine hohe Unterkompensation von bis zu 25 Prozent.

Eigentlich müsste man dieser Bauform ihre Praxistauglichkeit absprechen, wäre da nicht eine Entdeckung, die selbst die erfahrenen Aerodynamiker um Professor Boermans beim Windkanaltest in Erstaunen versetzte. Nach dem schlechten Abschneiden der vertikalen T-Rohre drehten sie diese um 90 Grad in die Horizontale. Nun ergab sich ein nahe-

zu völlig konstanter Druckbeiwert bei allen erprobten Anstell- und Schiebewinkeln, wenn auch mit einer Überkompensation leicht außerhalb der Toleranzgrenzen. Man sollte also Vorsicht walten lassen, bevor man eine Bauform generell als tauglich oder untauglich bewertet.

Vergleichsmessungen zeigten, nicht die Form ist entscheidend. Manchmal bringen schon kleinste Veränderungen in den Abmessungen oder eine einfache Lageänderung eine Verbesserung der Druckbeiwerte mit sich. Dennoch spricht Luke Rebbeck in seiner Diplomarbeit zwei klare Empfehlungen aus: Das Braunschweig-Rohr und eine geschlitzte Düse mit schmaleren und weniger tiefen Schlitzen (siehe Abbildung) zeigen über die gesamte Bandbreite der Testbedingungen einen nahezu idealen Druckbeiwert, so dass sich diese Baumuster uneingeschränkt für alle Fluglagen empfehlen. Man sollte bei einer dieser Düsen nicht auf die Anzeige seines Totalenergievariometers verlassen können.

Michael Lagema