

## Grundläggande aerodynamik, del 4

- Gränsskiktet
  - Definition/uppkomst
  - Friktionsmotstånd
  - Avlösning/stall
  - Gränsskiktets inverkan på lyftkraften
  - Gränsskiktets kontroll
  - Höglyftsanordningar



MTM175 – Allmän flygteknik

1

## Bakgrund

- Den klassiska strömningsmekaniken tog ej hänsyn till luftens viskositet
- Medförde problem att beräkna lyftkraft & motstånd
- På 1800-talet utvecklades Navier-Stokes-ekvationerna – tog hänsyn till viskositeten men dock för komplexa för att lösas
- Dödläge fram till början av 1900-talet då Ludwig "Ludde" Prandtl upptäckte något storslaget
- Han kom fram till att de viskösa effekterna endast är märkbara i ett skikt närmast ytan på ett föremål



MTM175 – Allmän flygteknik

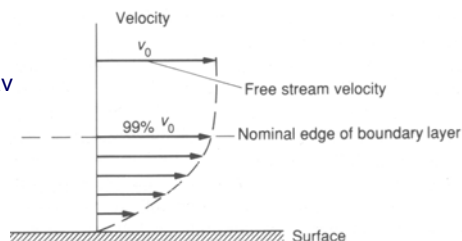
2

## Bakgrund, forts.

- Ludde kom att kalla detta skikt för gränsskiktet (eng. "Boundary Layer")
- Prandtl delade upp strömningen i två delar:
  - En där viskösa effekter togs i beaktande
  - En där strömningen antogs vara inviskös
- Denna kombination gjorde det möjligt att kunna göra beräkningar som var hanterbara
- Idag används datorer för att göra strömningsberäkningar

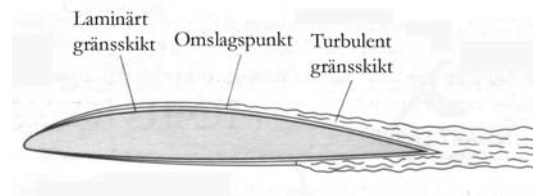
## Gränsskiktet - definition

- Intill ytan på ett föremål i en luftström sker det ingen relativ rörelse
- Med ökat avstånd från ytan ökar den relativa strömningshastigheten genom att molekyler i "friströmmen" vill dra med de stillastående närmast ytan och tvärt om (dvs. friktion)
- Uppbromsningen är som störst närmast ytan och avtar sedan successivt fram till en punkt där hastigheten är densamma som den i friströmmen
- Per definition tar gränsskiktet slut där hastigheten i skiktet är 99 % av friströmshastigheten
- (I verkligheten finns ingen tydlig gräns)



## Gränsskiktet, forts.

- Ur aerodynamisk synvinkel (dvs. för oss) är det vingens gränsskikt som är av intresse
- Skiktet kan delas in i två olika typer på grund av deras olika egenskaper
- Längst fram på vingen är strömningen jämn/slät, och kallas *laminärt*
- Längre bak på vingen sker en övergång, vid *transitions-/omslagspunkten*, där gränsskiktet blir mer turbulent, kallas *turbulent*



MTM175 – Allmän flygteknik

5

## Gränsskiktets uppkomst

- Friktion uppstår mellan molekyler i friströmmen och molekyler närmast ytan
- Förloppet startar i det laminära gränsskiktet:
  - Den inbromsande effekten sprider sig utåt, vilket betyder att gränsskiktet successivt blir tjockare ju längre man kommer i strömningsriktningen
  - Detta pågår till ett visst ställe på vingen – omslagspunkten
  - Här börjar det uppstå instabilitet och strömningen blir turbulent
  - Små virvlar uppstår, inbromsningen sker hastigare – häftigare uppblandning mellan friström/luft vid ytan
  - Gör att gränsskiktet snabbt ökar i tjocklek
- Längst in mot ytan ligger dock hela tiden ett tunt opåverkat lager

MTM175 – Allmän flygteknik

6



## Friktionsmotstånd

- Uppbromsningen som sker mellan friströmmen och luften i gränsskiktet gör att friströmmen vill "dra med" vingytan
- Kallas viskös friktion. För oss: *friktionsmotstånd* el. eng. "Surface friction drag"
- Friktionskraftens storlek beror på i vilken takt uppbromsningen sker
- I det laminära gr.skiktet sker uppbromsningen jämnt genom hela luftlagret
- I det turbulenta gr.skiktet är processen mer häftig, vilket betyder att:  
"Det turbulenta gränsskiktet producerar ett större friktionsmotstånd än det laminära"



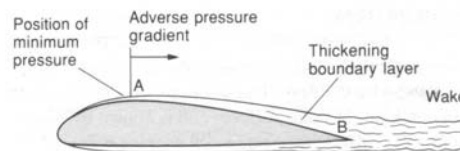
## Friktionsmotstånd, forts.

- Ojämnheter på vingytan gör att gränsskiktet slår om från laminärt till turbulent
- Ex. bucklor, gropar, is, insektskadaver etc.



## Avlösning och stall

- Mekanismen bakom avlösning och stall är kopplat till gr.skiktet
- Fig. visar en vinge i normalt tillstånd
  - Trycket som minst vid punkt A (ca maximal tjocklek)
  - Bakom punkt A ökar trycket gradvis för att vid bakkanten (punkt B) återgå till omg. tryck (ungefär)
  - Trycket måste gå från lågt till högt
  - Kan göra detta genom att sakta ner och avge lite av rörelseenergin från punkt A (enl. Bernoulli,  $p+q=\text{konstant}$ )

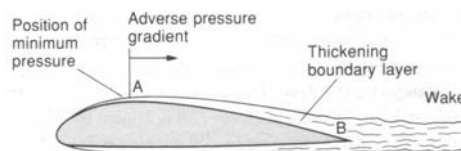


MTM175 – Allmän flygteknik

9

## Avlösning och stall, forts.

- Men...
- I gr.skiktet övergår en viss del av energin i friktion vilket gör att luften inte fullt kan återgå till sitt ursprungliga tillstånd i punkt B
- Sker tryckökningen successivt dras de inre lagren med av friströmmen, genom uppblandning med det turbulenta gr.skiktet
- Detta gör endast gr.skiktet tjockare och efterlämnar en långsam vak vid bakkanten

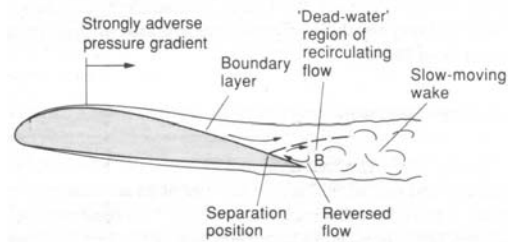


MTM175 – Allmän flygteknik

10

## Avlösning och stall, forts.

- Däremot...
- Sker tryckökningen mer hastigt hinner inte blandningsprocessen mellan friström och det turbulenta gr.skiktet med
- Gr.skiktet slutar att följa vingytan och avlöser
- Avlösningspunkten lämnar bakkanten och börjar röra sig framåt
- Ett område med återcirkulerande flöde bildas

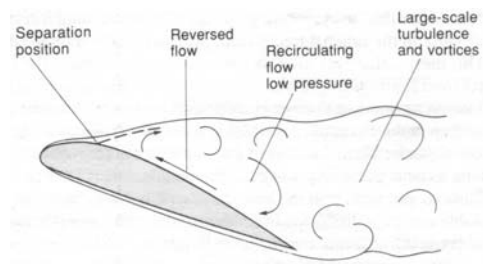


MTM175 – Allmän flygteknik

11

## Avlösning och stall, forts.

- ...
- Fortsatt ökning av anfallsvinkeln förvärrar tillståndet
- Avlösningspunkten flyttar sig ännu längre fram
- Området med återcirkulerande luft blir större
- Lyftkraften avtar markant samtidigt som motståndet ökar



MTM175 – Allmän flygteknik

12

## Avlösning och stall, forts.

- Det turbulenta gr.skiktet är bättre på att blandas upp med friströmmen
- Vilket ger den andra viktiga skillnaden mellan det laminära och turbulenta gränsskiktet:

”Det turbulenta gränsskiktet är mindre benäget att avlösa än det laminära”
- Betyder att gränsskiktstyperna har olika stallkaraktäristik!

## Framkantsavlösning

- Avlösning är speciellt sannolikt att ske när luften försöker strömma runt en skarp krökning, ex. nosen på en tunn vinge
- Är nosradien liten klarar strömningen inte av att hålla sig kvar utan avlöser – vid/eller nära framkanten
- Framkantsavlösning sker mycket hastigt
- Var ett stort problem på stridsflygplan designade på 40-/50-talet



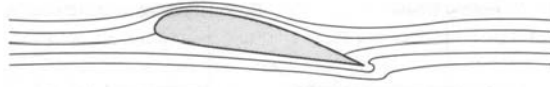
MiG 19



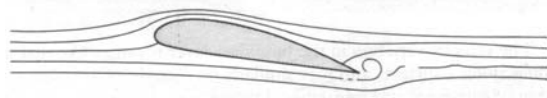
F-100

## Gränsskiktets inverkan på lyftkraften

- Fig. visar en vingprofil som accelereras från stillastående
- Strömninglinjerna uppvisar ett närapå symmetriskt förhållande
- Ingen lyftkraft



- När farten ökar börjar gr.skiktet att avlösa vid bakkanten till följd av att trycket måste gå från lågt till högt
- Leder till att en virvel börjar formas

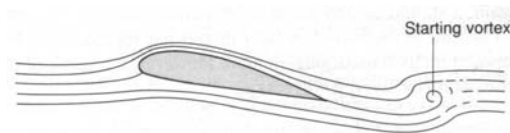


MTM175 – Allmän flygteknik

15

## Gr.skiktets inverkan på lyftkraften, forts.

- Vid ökad acceleration växer virveln och flyttar sig bakåt för att slutligen lämna vingen helt och hållet (startvirveln)
- Startvirveln bryter symmetrin och skapar förutsättningar för tryckskillnaderna runt vingen, dvs. lyftkraft



- Strömningen på ovan- och undersidan går ihop vid bakkanten
- Detsamma gäller ovan- och undersidans gränsskikt

MTM175 – Allmän flygteknik

16



## Gränsskiktsskontroll

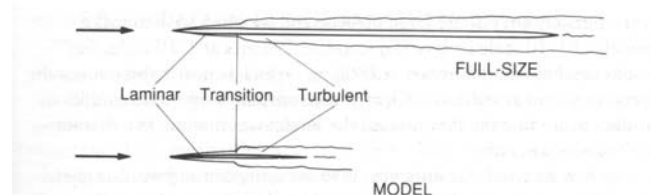
- Då gränsskiktstypernas olika egenskaper är rätt så betydelsefulla är det av intresse att veta vilka faktorer som styr var det ena övergår till det andra
- En faktor är ytans släthet – ojämnheter flyttar fram omslagspunkten
- Ett antal andra inverkanse faktorer styrs av Reynolds tal:

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

- Re = dimensionslöst; uttrycker sambandet mellan luftens densitet, viskositet, strömningshastighet och en längd (kordan) på föremålet där gränsskiktet bildas

## Gränsskiktsskontroll, forts.

- Omslagspunkten flyttas framåt ju högre Reynolds tal är
- Betyder att:
  - Den flyttas framåt med ökad hastighet och ökad densitet
  - Den flyttas bakåt om viskositeten ökar
  - Längden på vingens korda spelar också in
- Dessa faktorer krånglar till det vid jämförelse modell/fullskala



## Gränsskiktsskontroll, forts.

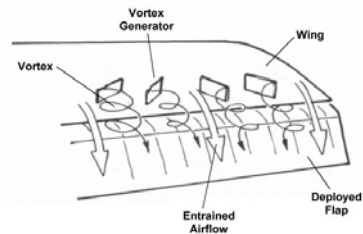
- Det finns vissa ställen på ett flygplan där avlösning speciellt inte är önskvärt, ex. luftintag till motorer
- Därav placering en bit ut från kroppen, bort från gränsskiktet



MTM175 – Allmän flygteknik

## Gränsskiktsskontroll, forts.

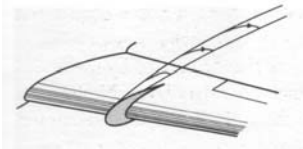
- Avlösning ej heller önskvärt över styrtor/roder
- En vanlig lösning är sk. virvelgeneratorer (eng. "Vortex generators")
- Dessa tillför energi till gränsskiktet och motverkar separation
- Återfinns oftast i anslutning till roderytor på vingar och stabilisator



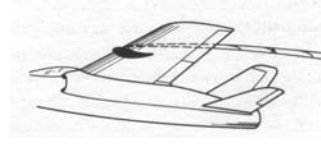
MTM175 – Allmän flygteknik

## Gr.skiktsskontroll på pilvingar

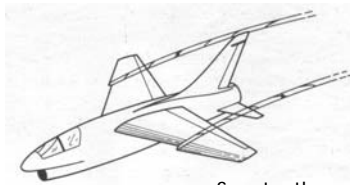
- På flygplan med pilvingar är gränsskiktet tjockare vid vingspetsarna – gör att dessa stallar först
- För att motverka detta finns det dock några lösningar



Wing fence



Vortilon



Saw-tooth

MTM175 – Allmän flygteknik

21

## Höglyftsanordningar

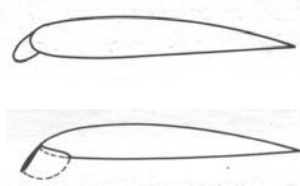
- De flesta flygplansvingar konstrueras för att ge ett maximalt förhållande mellan L och D vid marschflygning
- Det betyder vingar med måttlig välvning och liten yta (trafikflyg)
- Dessvärre fungerar det inte så bra om man vill flyga långsammare
- Ekvationen för lyftkraft ger sambanden:
  - Vid lägre fart behövs ett större  $C_L$
  - Ett sätt är genom ökad vingarea
  - Ett annat är genom att ge vingen en ökad välvning
- Vingarea och välvning ändras genom höglyftsanordningar

MTM175 – Allmän flygteknik

22

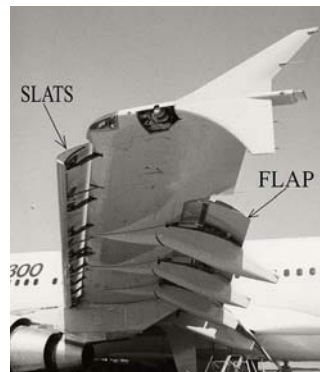
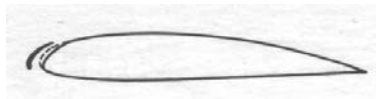
## Höglyftsanordningar, forts.

- Höglyftsanordningar finns som fram- och bakkantsklaffar och även som passiva och aktiva dito
- Framkantsklaffar:
  - Dropped leading edge
  - Ökar välvningen
  - Krüger flap
  - Ökar välvningen



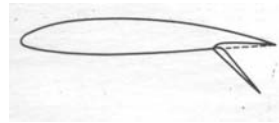
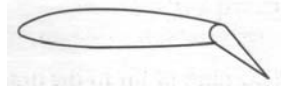
## Höglyftsanordningar, forts.

- För gränsskiktsskontroll används ofta slats och slots
- En slot utgörs av en permanent springa på vingens framkant
- En slat kan regleras
- Dessa anordningar skapar ett färskt gränsskikt som förhindrar avlösning



## Höglyftsanordningar, forts.

- Bakkantsklaffar finns i ett antal varianter
- På mindre flygplan är det enkla anordningar
  - Enkel klaff ("plain flap")
    - Ger vingen ökad välvning
- Klyvklaff ("split flap")
  - Ger även den vingen ökad välvning
- Dessa anordningar påverkar dock ej gr.skiktet varför möjligt uttag av  $C_L$  blir begränsat

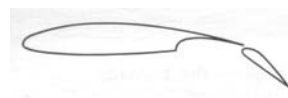
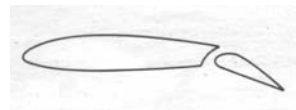


MTM175 – Allmän flygteknik

25

## Höglyftsanordningar, forts.

- På större flygplan är anordningarna mer avancerade
- Dessa ökar både vingarea och välvning samt kontrollerar även gränsskiktet
- Slotted flap
  - Ökar välvning
  - Skapar ett färskt gr.skikt
- Slotted extending flap
  - Ökar välvning & area
  - Skapar ett färskt gr.skikt

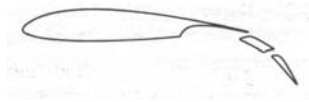


MTM175 – Allmän flygteknik

26

## Höglyftsanordningar, forts.

- Slotted extending flap kan utgöra av flera element – kallas då double eller tripple slotted extending flap

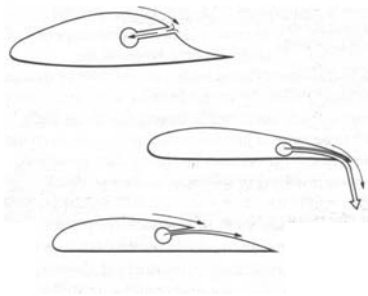


MTM175 – Allmän flygteknik

27

## Höglyftsanordningar, forts.

- Aktiva höglyftsanordningar
- Använder motorkraft för att ta bort eller tillföra energirik luft till gr.skiktet
- Väldigt dyra och komplexa anordningar

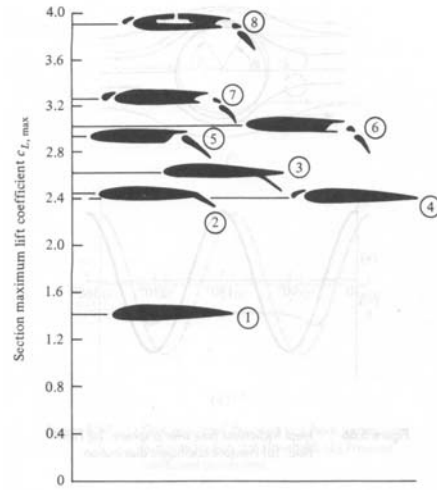


Hunting H126

MTM175 – Allmän flygteknik

28

## Höglyftsanordningar, forts.



MTM175 – Allmän flygteknik