

En lögn upprepad tillräckligt ofta, blir sanning!*

* Goebbels, Hitlers propagandaminister

Ett litet missförstånd på 20-talet blev en flygvärldens livslögn, som blockerat all korrekt lyftkraftsundervisning för piloter på 90-talet!

Hur länge skall "Bernoulli-lyft-desinformationen få fortsätta?"

Rätt!

Lyftkraft åstadkommes genom att vingen - i detta fall en plan platta med anfallsvinkel - accelererar luften nedåt. Detta ger en reaktionskraft (motkraft) uppåt (=lyftkraft)



Den centrala lögnen

Kärnan i alla dessa Bernoulli-lyftförklaringar är påståendet att hög fart *orsakar* lågt tryck när förhållande i själva verket är att hög fart endast kan skapas av lågt tryck. Bernoulli skulle vrida sig i sin grav om han visste vilka felaktigheter som tillskrivits honom. Orsaken är ett från början rätt oskyldigt språkligt missförstånd mellan en teoretiker och någon kompendieskrivare. Detta har sedan kopierats och tryckts om ång efter gång, och successivt blivit till en sanning.

Misstagets bakgrund

Både Lilienthal och bröderna Wright förstod hur lyftkraften fysikaliskt uppstod genom att vingen accelererar en luftmassa nedåt, samt hur tryckändringarna skapas. De kunde dock inte beräkna tryckfördelningarna. 1912 hade professor Prandtl utvecklat en "matematisk modell" för beräkning av hastigheter runt vingar. När man erhållit hastigheten över vingens yta så måste man sedan använda Bernoullis lag för att beräkna trycket. År hastigheten hög så är trycket lågt eller omvänt. Sedan superdatorerna kommit, kan man använda beräkningsmetoder som verkligen räknar med krafterna på alla små enskilda luftpaket ute i strömningen och sedan summera dem, så att trycken på vingen erhålles.

Även Prandtl-metoden har varit så matematiskt krävande att "teoretiskt lagda personer" blir mer matematiskt än fysikaliskt intres-

serade. För många av dem har den matematiska modellen omedvetet blivit till den verklighet som den egentligen endast är en analogi till. När de ombeds förklara lyftkraftens uppkomst så börjar de oftast beskriva Prandtl's analoga matematiska modell i stället för de fysikaliska orsakerna.

Felaktiga förklaringar i undervisningen

Det är dessa formuleringar om att trycket enligt Bernoulli är lågt i de punkter där den beräknade hastigheten är hög, som lett till missförståndet att trycket är lågt på grund av att hastigheten är hög. "Längre-väg"-förklaringen är värst. Luftpaket som når framkanten synkront, möts *aldrig mer!* "Halva venturi"-förklaringen är så ologisk att den borde vara en förolämpning mot varje elev. Man börjar med en kontraktion, sedan tar man bort kontraktionen, och säger ändå att det är "samma sak".

Konservatism i instituten för utbildning

Egendomligt nog anser utbildningsansvariga att alla dessa felaktigheter skall läras ut i stället för den verkliga grundprincipen för flygning med farkoster tyngre än luft.

Vad händer betr ECAC?

ECAC (European Civil Aviation Conference), de europeiska luftfartsmyndigheternas samarbetsorgan för harmonisering, har hittills haft en "arbets-syllabus". Under

rubriken "Lift derivation" återfinnes där avdelningarna "Continuity Equation" och "Bernoulli's theorem". Det måste tyda på att "halva venturi"-förklaringen åsyftas. Holland skall inom hela ECAC ansvara för "Principle of Flight". Jag har haft god direktkontakt med de två aktiva personerna i denna institution. De säger sig ha blivit helt övertygad av mina argument, ('stridsskrifter'), och att ändringar i enlighet med dessa skall införas vid nästa revision.

Hur mycket skall en pilot behöva lära sig om lyftkraft?

Varje 6-åring lär sig cykla på en tvåhjulig cykel utan att ha minsta aning om friktion, gyrokrifter eller centrifugalkrafter - och ofta till och med utan instruktion. Att det inte har gått värre än det gjort trots den galna undervisning som givits, visar väl att flertalet piloters intuition leder dem ganska rätt. Dock kan säkert en del 'wake turbulence'-haverier delvis tillskrivas en felaktig utbildning. Skall man förbruka tid på teoriundervisning skall det vara på de *grundläggande principerna* och inte på detaljer. Det som lär ut skall vara meningsfullt och fysikaliskt riktigt. Utan stöd från ett antal betydelsefulla diskussioner med Dr. Artur Rizzi (specialist på de nya beräkningsmetoderna), vid Flygtekniska Forsöksanstalten skulle jag knappast ha orkat fullfölja den här striden mot ett förstelnat etablissemang.

Martin Ingelman-Sundberg

Fel!

(Ur Time-Life-Svalan: Flyg)



BERNOULLI'S PRINCIP som förklarar hur lyftkraft skapas av ett flygplans vingar, illustreras i dessa tre schematiska teckningar. En vätska, som pressas igenom en förträngning i ett rör (ovan), rinner snabbare samtligt som det tryck den utövar mot rørets väggar minskar



DEN FÖRTRÄNGDA LUFTSTRÖM som visas här och som bildas av två motstående flygplansvingar, ger samma resultat som det förträngda röret ovan; luften som rör sig mellan vingarna accelererar, och fartökningen skapar ett lägre tryck mellan de båda välvda ytor.



SAMMA PRINCIP gäller när luftströmmen påverkas av en enda vinge. Den accelererar i den förträngningen på vingens översida utöver ett mindre tryck än luftströmmen på dess undersida. Det är denna kontinuerliga tryckskillnad som ger upphov till och underhåller lyftkraften.

Kommentar

Mellan de två övre bilderna och den nedersta ligger stora tankefel. Att tala om "samma princip" är en logisk kullerbytta. Situationerna är inte alls jämförbara! I den översta bilden är det riktigt att tala om Bernoullis lag. I den andra är det fel att säga att fartökningen skapar ett lägre tryck, det kan i så fall lika gärna vara tvärtom, dvs att det lägre trycket skapar fartökningen. I den nedersta bilden har man än drat förutsättningarna fullständigt. Det finns ju inte längre någon "förträngning".

Lyftkraft utan Bernoulli!

Glöm allt om "längre väg på ovansidan"! Det är själva accelerationen av luftmassan nedåt som ger lyftkraft

Med några få undantag tycks hela världens pilotutbildningslitteratur ge en felaktig föreställning om hur lyftkraft uppkommer. Den internationellt kände vetenskaparen Daniel Bernoulli (1700-1782) formulerade en fysikalisk lag, som i dessa sammanhang använts felaktigt. Modellflygnytt gör här med hjälp av Martin Ingelman-Sundberg ett försök att ställa allt till rätta. Martin Ingelman-Sundberg har varit chef för sektionen för underjudaerodynamik vid Flygtekniska Försökscentralen FFA 1953-1983, blev privatflygare redan 1939 och är det alltså. Han anser att kunskapen om det rätta förhållandet inte är oväsentligt för flygsäkerheten.

Det finns åtskilliga olyckor - med stora konsekvenser - som till en del kan ha orsakats av de felaktiga föreställningar som rått. Den här artikeln har tidigare varit införd i Skandinavisk Flyghorisont och FlygPosten.

Behovet av en lyftkraftsförklaring

Det förefaller som om många människor av rent allmänintresse vill veta hur flygplan kan hålla sig uppe, men dessutom finns en hel kategori - piloterna - som anses böra känna till hur lyftkraft kan skapas, dvs hur man utan fast underlag kan skapa en kraft uppåt. Lyftkraft har sedan länge behandlats i avsnitt om flygteori under pilotutbildningen. Hur viktigt det är att piloterna förstår hur lyftkraft uppkommer, är naturligtvis diskutabelt. Dock har under årens lopp ett antal olyckor skett som kanske kunde ha förebyggts om undervisningen om lyftkraftsskapande varit rikligare än vad som är vanligt i dag. Det gäller speciellt några olyckor i USA som tillskrivs vad som kallats "opredikerbar (!) wake turbulence", i stället för bristfällig flygteoriundervisning. Trots att tidigare meningsfyllda förklaringar till lyftkraften använts åminstone i Tyskland och Sverige, så har egendomligt meningslösa och felaktiga förklaringar kommit in i några viktiga och mycket påkostade läromedel, och i flera amerikanska och engelska encyklopedier. Och - värst av allt - både i FAA:s normgivande "Pilot's Handbook of Aeronautics" och "Flight Training Handbook" och som rekommenderad teori i ICAO:s "Training Manual". De ha därmed blivit "sanning" och svåra att förneka. De skall kommenteras senare i denna artikel. Glädjande undantag utgör dock Erik Bratts "Praktisk Flygteknik", 1982, W Lange-wiesche "Stick and Rubber" i USA

och professor Bicknell i McGraw-Hill "Encyclopedia of Science and Technology" (1979).

Grund för flygning enligt systemet tyngre än luft

Grundprincipen för att skapa en kraft i någon riktning när man inte har något fast att ta spjårn emot, är att med något slag accelerera något slag av massa i motsatt riktning.

När det gäller lyftkraft så är det vingen som accelererar en viss mängd av den passerande luften nedåt. En kubikmeter luft har vid marken massan 1,25 kg, dvs en kub med 10 meters sida har massan 1,25 ton (!). Massan är trög, och ger reaktionskrafter om den tvingas ändra sitt rörelsetillstånd. Newton formulerade redan 1687 sina tre lagar om tröghet och reaktion. De är fortfarande de avgörande för vad som händer med både flygplan och luften däromkring.

För 70 år sedan utvecklade den kände tyske aerodynamikern och vetenskapsmannen Ludwig Prandl sin virvelteori för beräkning av vingars strömningsfält lyftkraft. Han frågade sig också följande: "Eftersom lyftkraften kommer från att vingen accelererar luft nedåt, hur stor är den luftmassa som en vinge förmår aktivera?"

I verkligheten påverkas luften närmast över och under vingen mest. Verkan minskar successivt med ökande avstånd. Utanför vingens ändrar sker samtidigt en viss uppströmning.

Man kan dock tänka sig en ekvivalent tvärsnittsarea över vilken nedåtaccelerationen är jämnt för-

delad och sådan att kraftresultanten på grund av luftens avböjning får den bakåtlutning som den fullständiga teoriberäkningen ger. Se figur 1.

För det motståndsoptimala fallet är lyftkraften elliptiskt fördelad längs spännvidden, och då visar sig den ekvivalenta tvärsnittsarean motsvara en cirkel med spännvidden som diameter.

Hur nedsvepshastigheten strax bakom vingen för denna luftmassa avrierar med flyghastigheten visas i figur 2.

Winglets - som förekommer alltmör - har bland annat funktionen att öka den aktiverade massan.

Vi tar ett exempel. En 747 med 367 000 kg vikt, spännvidd 60 meter och farten 250 m/s på en höjd med lufttäteten 0,5 kg/m³. Den ekvivalenta arean blir 2.827 m² och den aktiverade luftmassan 353 429 kg/sekund.

Enligt Newtons andra lag får vi: 3 700 000 Newton = 353 429 kg x m/sek² och ger a = 10,5/sek².

Efter en sekund har då den aktiverade massan bibragts en hastighet nedåt av 10,5 m/s och därmed en motsvarande rörelseenergi per sekund lämnats efter flygplanet.

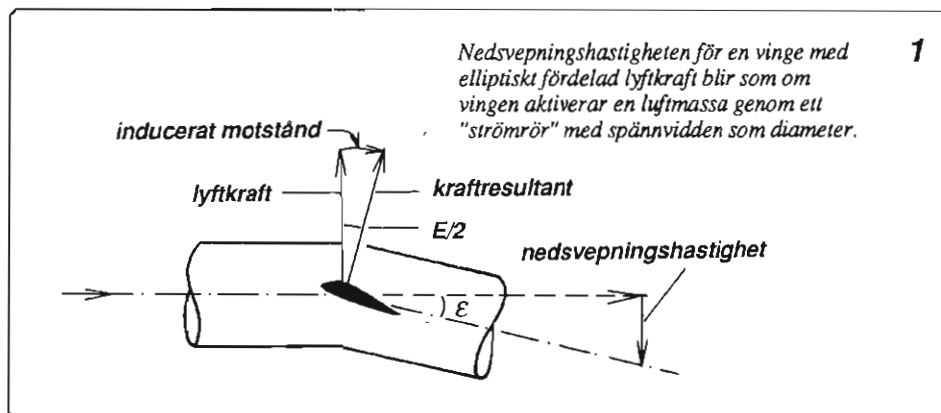
Divideras den med flyghastigheten per sekund erhålles det inducerade motståndet, som således orsakas av lyftkraften.

När flygplanet kommer nära marken, ett par spännvidder eller lägre, kommer marken att bromsa nedsvepningen och förhållandena blir som om flygplanet utsattes för interferens från sin egen spegelbild på motsvarande avstånd undermarken. Man kan betrakta det som om man flyger i spegelbildens "uppåtriktade nedsvepning".

När höjden är en tiondel av spännvidden försvinner därför det inducerade motståndet nästan helt.

Virvelbildning

Den luftmassa som rör sig nedåt samverkar sedan med den omgivande luften så att denna successivt



strömmar dels *inåt* ovanför, och dels *utåt* sidan nedanför. Efter en viss tid, när flygplanet har hunnit några spännvidder bort, har det utbildats två parallella luftvirvlar som roterar mot varandra och sakta rör sig nedåt. Inbördes avståndet mellan dem är cirka 0,8 gånger spännvidden (figur 3). Jämför med virvelparet efter en paddel i vatten. Bakom fyrmotoriga jetplan kan man ofta se denna successiva virvelkoncentration genom att de två motor-kondensstrålar på varje sida lindar sig runt varandra, och liksom sammansmälter, varvid de samtidigt visar var virvelcentra ligger.

Det är dessa koncentrerade virvlar som kan vara mycket farliga om ett litet plan kommer in i dem. Lokalt nära deras virvelcentra blir tvärhastigheterna flerdubbelt starkare än den i figur 2 visade medelnedsvepningen närmast bakom vingen. Det lilla planet kan mycket väl få 20-30 m/s uppvind för ena vingen, och en lika stor nedvind på den andra. Vid prov på höjd lär en DC-9 - som gick in bakom en 747 - ha kastats över på rygg. Att korsas av virvelpar vinkelrätt kan också orsaka ur hållfasthetssynpunkt farligt stora belastningar. Vingbrott har förekommit.

Ofta påstås "att virvlarna orsakas av läckage runt vingspetsen", och de kallas därför "spetsvirvlar". Det kan vara en missledande namn, eftersom det ger sken av att det rör sig om något litet, lokalt strömningsfenomen endast orsakat av själva vingspetsen.

Så skapar vingen nedsvetet

När man diskuterar vad som händer på grund av den relativa rörelsen mellan atmosfären och vingen kan man antingen betrakta det som det verkliga är - att vingen rör sig genom en från början stillastående atmosfär - eller som man ser det när man följer med flygplanet eller tittar in i en vindtunnel, dvs luften strömmar förbi. Vingen - det kan mycket väl vara

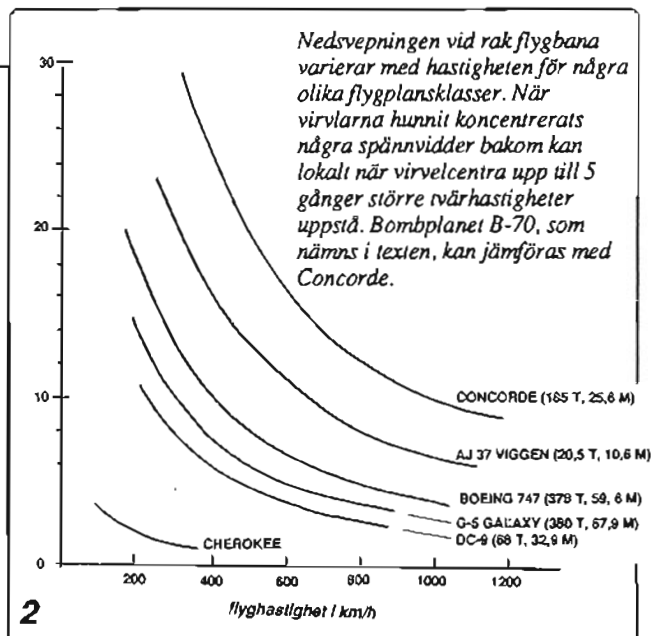
en platta - är i vila omsluten på alla sidor av atmosfären, som vid marken utöver ett tryck av 100 000 Pa på alla dess sidor. (Pa = Pascal. 100 000 Pa = 1000 hPa = 1013 mb) Lyftkraften är då 0 eftersom trycken över och under vingen balanserar varandra.

Om vingen däremot *rör sig framåt* med en liten vinkel - *anfällsvinkel* - relativt rörelseriktningen, tvingas luften *närmast undersidan* att röra sig nedåt, varvid trögheten hos dessa "luftpaket" orsakar en reaktionskraft mot vingundersidan som adderas till atmosfärstrycket, så att det lokala trycket blir större än detta. Tryck-*ökningen* börjar redan en bit från profilen och ökar successivt in mot ytan.

Ovanför vingen kommer det 100 000 Pa starka atmosfärstrycket att rvinga de närmaste luftskikten in mot den undanflyende vingöversidan, men trögheten hos deras massa, medför att en del av de 100 000 Pascalen avlastas från vingytan, så att trycket över denna blir lägre än atmosfärstrycket.

Vid framkanten - mellan övertrycksområdet under vingen och det undertryck, som råder ovanför vingen - kommer luften att *acceleras uppåt* på grund av att varje litet "mikroluftpaket" påverkas av ett högre tryck på sin undersida än på sin översida, och alltså blir utsatt för en accelererande kraft uppåt. När det skall böja av runt framkanten inträffar emellertid ytterligare ett fenomen, nämligen att *centrifugalkrafterna* på "paketet", på grund av den starkt krökta banan, kommer att bli mycket stora, och balanserar en mycket större del av atmosfärstrycket än för vingöversidan i övrigt. Det låga trycket gör att den lokala hastigheten ökar ytterligare, med åter ökade tryckavlastande centrifugalkrafter som följd.

Ser man det från planet - så att luften strömmar förbi - figur 4 - kan man tala om centrifugalkrafter inte



bara runt själva profilosen, utan även lägre bak över vingen.

Framkantrundningen viktigt för max lyftkraft - stallfart

För att inte av luftens seghet (viskositet) orsakat gränsskiktsmaterial skall ansamlas mellan framkantens yta och den yttre luftströmmen och "avlösa" denna från ytan blir framkantens form (rundning) av dominerande betydelse för hur stor anfällsvinkeln vingen kan ges innan gränsskiktansamling sker mellan vingytan och ytterluften. I sådant fall medför detta att ytterluften inte längre kommer att accelereras nedåt = kraftigt minskad lyftkraft. För vingar med små framkant-radier ("spetsiga" vingprofiler) kan omkring framkanten lokala strömningshastigheter på upp till 10 gånger flyghastigheten uppstå. För ett modernt trafikflygplan utan framkantklaffar är den lokala framkanthastigheten 5 gånger flyghastigheten vid hög anfällsvinkel. Det betyder att lokal ljudfart, Mach 1, kan inträffa redan vid en flyghastighet av 250 km/h. Mach-talet kan således ha betydelse även i

landningsfasen. Det är också därför som översidans mjuka välvning är så viktig för att förskjuta den slutligen oundvikliga avlösningen så långt bak som möjligt.

Avlösning, ett fysikaliskt fenomen

Avlösning medför lyftkraftens begränsning - men är också dess förutsättning.

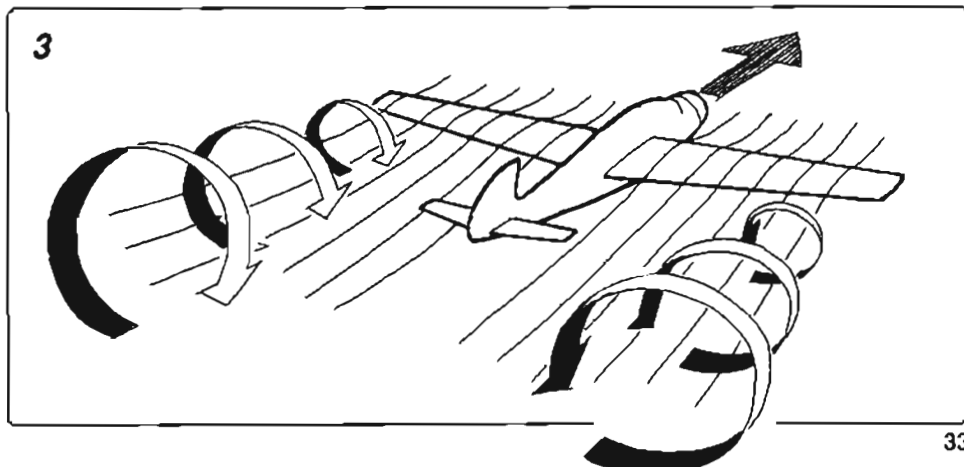
Om luften inte hade den seghet, viskositet, som alltså kan ställa till problem i form av avlösning för översidans strömning, skulle tryckskillnaden mellan undersidan och översidan kunna orsaka en motsvarande omströmning också vid bakkanten. Denna skulle då dels minska övertrycket under vingens bakre del, men också fylla ut och reducera undertrycket ovanför vingen så att ingen lyftkraft skulle bli kvar.

Fenomenet avlösning för undersidans strömning vid bakkanten utgör alltså lyftkraftens förutsättning - men samtidigt - för översidans strömning, dess begränsning.

Fortsättning nästa sida!

Figur 3

Hela vingen är det verktyg som accelerar luftmassan nedåt. Ovanför denna strömmar luft in från sidorna och nedanför ut mot sidorna så att en virvelbildning uppstår. Det är dessa virvlar som har kallats "unpredictable wake turbulence". Speciellt i samband med stora tunga plans start och landning är de farliga för andra flygplan. Jämför med figur 2!



Bernoulli ...

Fortsättning från föreg sida!

Framkantklaffar och bakkantklaffar

Den hastighet *nedåt* som vingen har gett luften då den lämnar bakkanten, bestämmer helt vilken lyftkraft man får. Det är därför bakkantklaffar är så effektiva att öka lyftkraften vid oförändrad anfallsvinkel, medan framkantklaffar inte har någon verkan alls i detta avseende. Framkantklaffens uppgift är i stället enbart att *fördröja avlösningen vid högre anfallsvinklar*. (Medför därigenom att man kan behålla lyftkraft vid lägre fart)

Felaktiga lyftkraftsförklaringar

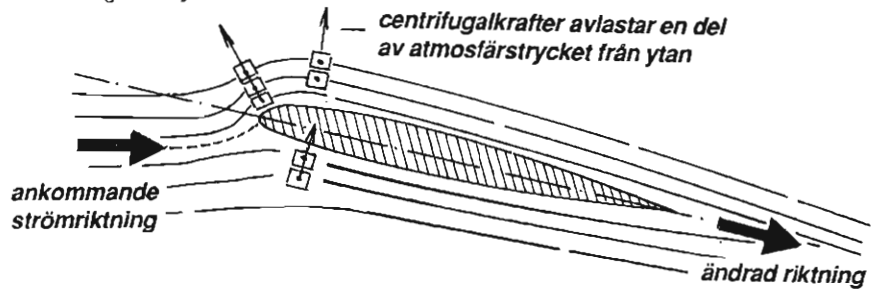
I flera lyftkraftsförklaringar ingår en ologisk referens till Bernoullis lag som eleverna först fått lära sig med mer eller mindre förståelse. Bernoullis lag lyder:

"Längs en och samma förlustfria strömlinje är summan av statisk och dynamiskt tryck konstant!"

Lagen innehåller emellertid inget om orsak och verkan, utan anger endast ett samband som sådant. Man kan i själva verket finna situationer både av typen att statiska trycket är lågt, därför att hög fart måste skapas genom ett accelerationsskapande tryckfall - som för mittlinjen i ett venturi - och av typen att farten blir hög därför att en krökt strömning genom tröghetskrafter avlastar atmosfärtrycket från ytan såsom för "sidorna" av en tväranbläst cylinder. Strömningen ovanför en vinge hör definitivt till den senare typen.

I de vanligaste förklaringarna ingår alltid ett mer eller mindre felaktigt påstående att farten ovanför vingen av något skäl blir högre, och att "därför måste trycket enligt Bernoulli vara lägre" och "alltså ger en tryckskillnad som lyfter".

4 Så här påverkar "luftpaketen" vingen genom sin rörelse och därav orsakade tröghetskrafter.



Alt 1 "längre väg"

Vanligast är att man ritat upp en profil med en plan undersida och en välvd översida, och så påstår man:

"Eftersom distansen längs översidan är längre än längs undersidan, så måste farten på översidan vara större, och alltså 'enligt Bernoulli' trycket lägre än på undersidan för att de luftpaket som når framkanten samtidigt återigen skall mötas i fas vid bakkanten".

Detta påstående finns exempelvis anslaget på en stor plansch vid entrén till US Airforce Museum i Dayton, det åhörde också i "De lärde i Lund" för ett antal år sedan, och det står i Jeppesens "Private Pilot Manual".

Dels finns inget logiskt skäl varför luftströmmen ovanför vingen skall ligga i fas med luftströmmen under vingen när de möts vid bakkanten, *dels är det just detta som inte sker på grund av att vingen ger lyftkraft, helt oberoende av profil*; en plan platta eller tjock profil är egalt. Det visar sig ju också att man kan flyga på rygg både med välvda profiler och med symmetriska.

En variant på alt 1 återfinns i en USA-encyklopedi 1963 med ett långt kapitel om flyg, där man påstår att vid ökad anfallsvinkel flyttar sig framre stagnationspunkten ned på undersidan, och då blir ju vägen längs översidan ännu

längre, och alltså lufthastigheten högre och trycket lägre. Varför flyttar sig då stagnationspunkten?!

Alt 2 "venturi"

Detta är en mycket vanlig förklaring som spreds vida genom Shells snygga utbildningsfilmer om flyg från 40-talet, och även Time-Life's bok om "Flyg" på 60-talet och nämnda FAA-böcker.

Här utgår man från ett 2-dimensionellt venturi med trång sektion där farten av kontinuitetsskäl är högre, och "därför - enligt Bernoullis lag - trycket lågt". Sedan tar man bort övre halvan av venturit och antyder att undre halvan skall motsvara en vinge. Det är ju helt ologiskt, för då bortfaller ju utgångsvillkoret om en trång sektion.

En i logiskt hänseende besläktad, men möjligen ännu felaktigare förklaring återfinns i den av Liber Läromedel 1979 utgivna "Grundflygutbildning, Flygtekniska ämnen". Där beskriver man först hur en tryckfördelning runt en tväranbläst cylinder ser ut. Sedan skär man bort underhalvan och antyder att överhalvans tryckfördelning skulle gälla för denna som vinge betraktad. Denna beskrivning torde ta priset ifrån om irrelevant.

Negativa effekter av felaktig pilotutbildning

Det mest allvarliga med de felaktiga föreställningarna är att man

förlorar förståelsen för att *lufned-svepningen* (ge luften fart nedåt) är *grundförutsättningen för att flygplanet skall hålla sig uppe*. Om detta ger "Bernoulli-förklaringarna" ingen som helst information. Att man vid pilotutbildningen lagt så mycket vikt vid de olika "bernoulli-förklaringarna" har naturligtvis inneburit ett icke oväsentligt slöseri med tid, men framför allt har medvetenheten i pilotkretsar om lufned-svepningen och virvlar som förenats cirka 50 år, från Prandtl till dessa att en olycka med en Twin Otter inträffade just på grund av "unpredictable (!) wake turbulence" på Kennedyflygplatsen i början av 70-talet.

Kunskapen har hela tiden existerat, men inte hos rätt människor - piloter och trafikledare. Kanske skulle inte heller det F-104-flygplan som i samband med en reklamfotografering flög alldeles intill en långsamt flygande B-70 över ljudsbombplan, ha gripits av dessa virvlar med katastrofal kollision som följd om det tidigare nämnda entre-anslaget vid US Airforce Museum haft ett riktigare budskap.

Martin Ingelman-Sundberg

Utförligare rapport 1990:2 "Lyftkraft utan Bernoulli" kan köpas för 50:- från Sveriges Mekanisters Riksförening, Box 5164, 102 44 Stockholm, tel 08-663 99 05 fax 08-667 93 20.

En likhet finns med att hoppa från isflak till isflak. Skulle man stå kvar på isflaket sjönk det. Det är således motståndet mot att putta isflaket nedåt under en kort tidsrymd som gör att jumparen håller sig "flytande" genom att hoppas från isflak till isflak.

