

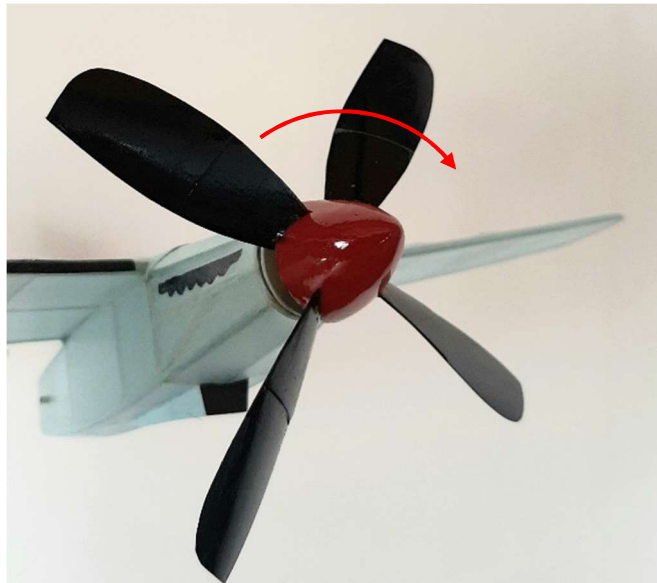
Propellerblad av PET-flaskor till gummimotordrivna skalamodeller

Inledning

Till sin gummimotordrivna skalamodell vill man kanske ha en tre-, fyr- eller rentav fembladig propeller, om nu förebilden hade det. Gummisnodds-flygare har också stort behov av att kunna experimentera med olika propellrar för att hitta den kombination av diameter och stigning som ger bäst prestanda. Ibland är olyckan framme, i form av en hård landning, man kanske bryter av ett omsorgsfullt karvat blad.

Om man som jag har fått smak på att flyga tvåmotorigt så behöver man göra två likadana propellrar, gärna en vänster- och en högergående, men lika i allt övrigt.

Det finns således många anledningar till att hitta sätt att snabbt tillverka effektiva propellrar.



Figur 1. En fyrbladig vänstergående propeller med spinner på en liten tvåmotorig semiskalamodell.

I vissa fall har jag fixat en propeller under förmiddagen, och sedan varit ute och provflugit samma eftermiddag. Jag ska i det följande beskriva några olika aspekter kring relativt enkla egentillverkade propellrar av plastflaskor som kan lämpa sig för mindre gummimotordrivna modeller. Att göra sådana här propellrar är inget som jag har hittat på själv. Jag betraktar det som känt allmångods som jag har lånat, och sedan kryddat med egna idéer, erfarenheter och funderingar, sådant som har funkade bra för mig. Jag avser inte att skriva en steg-för-stegbeskrivning. Se det hela istället som inspiration för eget experimenterande kring olika ingående delar.

I (amerikanska) tidskriftsartiklar och ritningar från 1970-talet och framåt har ofta omnämnts propellerblad tillverkade av burkar till "Cottage-cheese", särskilt till mindre modeller. När vi idag översvämmas av allehanda plastförpackningar är det således inga problem att hitta billigt material till propellerblad. Dryckesflaskor av PET (PolyEtylenTereftalat) har fungerat bra för mig. Propellerbladen limmas till ett lämpligt nav och förses sedan med lagring, frigångsanordning, spinner osv.

En traditionell, omsorgsfullt karvad propeller av balsa blir förmodligen avsevärt lättare än motsvarande propeller med blad av PET-flaska, men eftersom gummimotormodeller (särskilt skala) i allmänhet behöver lite nosvikt ändå så är detta ett litet problem.

Till artikeln hör ett Excel-blad där man kan prova hur olika val av parametrar slår igenom jämfört med en helixpropeller. Bladet har uppdaterats så att det innehåller en del för blad gjorda av en cirkulärcylindrisk flaska, och också en del för blad gjorda av en rak cirkulär stympad kon.

Att limma plast

Vi ska limma propellerbladen mot ett nav. Ett lämpligt lim är viktigt, liksom underarbetet. Ytorna ska naturligtvis vara rena och torra innan man limmar. Att avfetta med något lösningsmedel kan nog inte heller skada. Ibland hävdas att (plast)ytorna ska ruggas upp med fil eller sandpapper innan man limmar. Det bästa är naturligtvis att man först provar limmet på några spillbitar så att man försäkras om att det verkligen fungerar.

För att limma plastmaterial (plast mot plast och även plast mot annat) har jag funnit att en Loctite-produkt med epitetet *All Plastics* fungerar väldigt bra.

Av allt att döma är detta ett vanligt (etyl) cyanoakrylatlim kompletterat med vad man kallar en "Surface Activator".

Den senare, ytaktivatorn liknar en fiberspetspenna som man stryker med på ytorna som man ska limma, därefter väntar man 60 sekunder, applicerar så limmet och pressar ihop delarna precis som vanligt. Om jag ska limma plast mot t.ex. trä så använder jag ytaktivatorn endast på plastdetaljen. Jag utgår ifrån att liknande produkter finns hos andra tillverkare också.

Förutom cyano-lim så bör även olika epoxiprodukter fungera bra i det här sammanhanget.



Figur 2. Loctite All Plastics.

Kemikalier och särskilt cyanoakrylatlim ska användas med stor försiktighet. Limmet ska appliceras på fogytorna, ingen annan stans. Läs bruksanvisningen och använd skyddshandskar och skyddsglasögon!

Om man har limmat bladen med cyano och sedan snurrar på propellern innan limmet har torkat, så kommer limmet att skvätta omkring helt okontrollerat. Gör absolut inte så! Jag har redan testat det, och jag klarade mig (den gången också). Men, jag upprepar, **GÖR ABSOLUT INTE SÅ!**

Flaskor

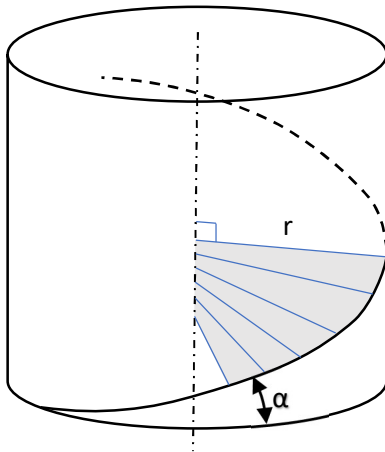
PET-flaskor förekommer i en mängd olika utföranden, på Systembolaget kan man numera till och med köpa vin i sådana förpackningar. Vi söker efter flaskor i storleksintervallet 50-150 cl. Vi vill ha flaskor med en så stor cirkulärcylindrisk del som möjligt. När flaskan är tömd på sitt innehåll, diskad och etiketterna har avlägsnats så skär vi bort topp och botten så att vi frigör den cirkulärcylindriska delen. När denna sedan klipps upp längs en generatris så får man ett *mantelsvep* med förhoppningsvis konstant krökningsradie. Ibland råkar man ut för att mantelsvepet antingen öppnar sig eller drar ihop sig så att krökningsradien inte längre stämmer med den ursprungliga. Vi behöver inte kasta ett sådant svep, men i sådana fall lägger vi våra blad likadant utmed den ena eller andra kanten, så att felet blir lika överallt. En vinflaska som jag använde hade en påtagligt varierande godstjocklek, godset i bottenänden var betydligt tjockare än upp mot kapsyländen. Mantelsvepet höll formen bra, och den varierande godstjockleken blev en klar fördel. Jag orienterade bladen så att naven låg utmed den tjockare delen på svepet, och behövde därmed inte göra några ytterligare förstyvningar. Ett husmorsknepp för att avlägsna klistrade etiketter från plastföremål är att begagna sig av vanligt smör. På en pappersetikett smörjer man helt enkelt lite smör som sedan får verka en stund, därefter brukar det gå att diska rent ganska enkelt. En plastetikett river man först bort, och eventuellt kvarvarande klister behandlas med smör och efterföljande diskning.

Propellerns geometri, bladgeometrier

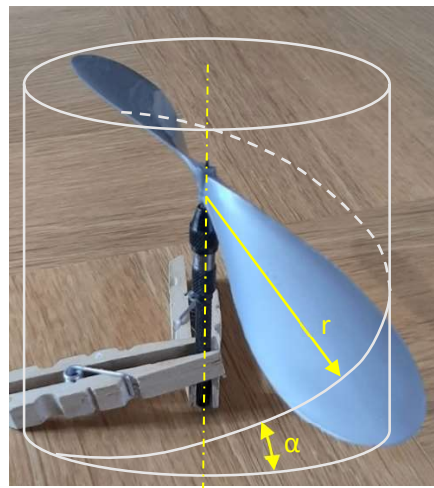
Innan vi går in på de mer praktiska detaljerna ska vi klargöra några av propellerns geometriska aspekter. Vi börjar helt allmänt.

Propellerns rotationsriktning anges som höger (medurs)- respektive vänstergående (moturs), detta sett bakifrån propellern, i flygriktningen.

Figur 3 visar en del av s.k. helix-yta (eng. Helicoid). Vi utgår ifrån en rak cirkulär cylinder som på sin mantelyta har utritad en *skruvlinje* eller *helix* med konstant stigningsvinkel α (alfa). Vi tänker oss sedan en rät linje, vinkelrät mot cylinderns axel och som har sin andra ändpunkt på helixen. Om vi låter linjen röra sig så genereras den skuggade ytan mellan cylinderns axel och helixen på mantelytan. Denna yta utgör helixytan. Många bladgeometrier bygger på att man använder en del av denna yta som propellerblad, figur 4. Propelleraxeln sammanfaller då med cylinderns axel, bladen följer helixen. Bladen blir raka eftersom de ligger utmed en rät linje från axeln till helixen. Den geometriska stigningsvinkeln α minskar med ökande radie, det kallas *tordering*.



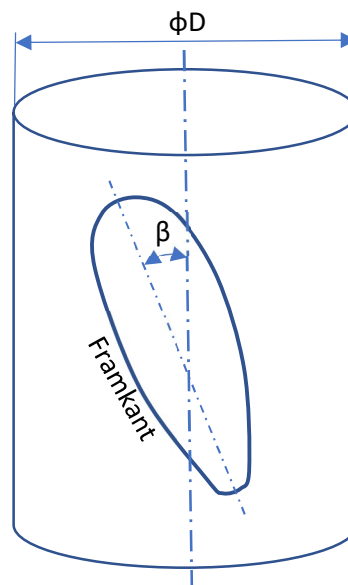
Figur 3. Helix-yta.



Figur 4. Helix-propeller.

Många modellflygare har med stor framgång approximerat propellerblad på en helix-yta med att istället lägga bladen snett utefter *mantelytan* på en rät cirkulär cylinder (eller ibland kon), jag kallar detta *cylindergeometri* (*kongeometri*). Cylinderns cirkulära tvärsnitt ger en viss välvning åt profilen, och genom att luta bladet på cylinderytan relativt cylinderns axel så får man också till att anfallsvinkeln avtar med ökande propellerradie. Ett sådant här blad blir något böjt eftersom bladets axel nu ligger utmed en böjd linje.

Genom att luta bladen åt olika håll relativt cylindern så får man höger- respektive vänstergående propellrar. Figur 5 visar bladets framkant lutande åt *vänster* för en *högergående* (normal) propeller. För en vänstergående propeller lutar man bladen åt andra hållet, åt *höger*.



Figur 5. Högergående propellerblad på ytan av en cirkulär cylinder. Bladet lutar vinkeln β (beta) relativt cylinderns axel.

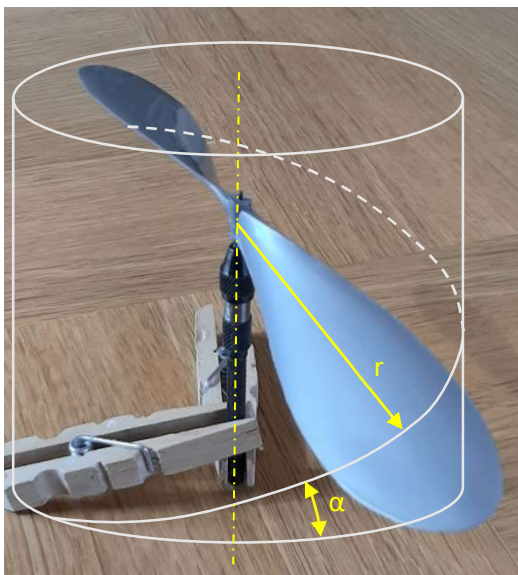
Man kan naturligtvis tillämpa elementär geometri på det här (detaljerna finns i appendix), i båda fallen vet vi att bladets anfallsvinkel varierar med radien. I fallet helix-yta avtar anfallsvinkeln inledningsvis ganska snabbt med ökande radie (torderingen är kraftigare närmare navet än ut mot spetsen). I fallet med cylindergeometri avtar anfallsvinkeln *linjärt* med radien. Vi har också konstaterat att blad på en helix-yta är raka, blad med cylindergeometri blir något böjda. Ur aerodynamisk synvinkel bör den senare skillnaden vara helt oväsentlig.

Förutom cirkulär cylindrisk geometri (figur 5) så förekommer även blad på ytan av en rak cirkulär stympad kon (eng. cone eller bucket). Jag är inte närmare bekant med de amerikanska "Cottage-cheese" burkar som brukar nämnas, men kan tänka mig att dessa är något koniska ungefär som t.ex. våra Creme Fraiche-förpackningar. Vi ska i det följande konstatera att den koniska geometrin närmare approximerar helix-geometrin än den cylindriska, om vi lägger bladets navände närmast konens spets.

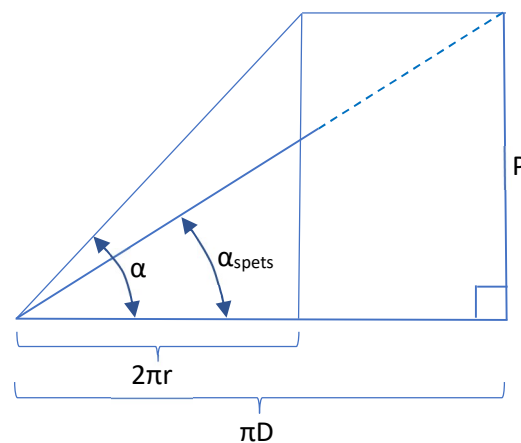
Propellerns geometri, stigning

Propellerns stigning (benämns P efter engelskans pitch) är vid sidan om diametern en mycket viktig parameter.

I figur 5 har vi utgått från geometrin i figur 3. Vi visar skärningen mellan en riktig propeller och en tänkt rät cirkulär cylinder med radie r . Propellerbladets korda kommer då att skära cylindern utefter en helix. Vinkeln α mellan helixen och cylinderns bottenyta är den *geometriska* stigningsvinkeln på radien r . Om vi varierar r så kommer α också att variera, speciellt har vi α_{spets} vid bladspetsen på $r=D/2$. Om vi klipper upp olika sådana cylinderytor (för olika r) och breder ut dem så får vi geometrin i figur 6, där höjden P är den tänkta sträcka som propellern har rört sig framåt under ett varv i ett oeftergivligt medium (om man tänker sig propellern som en del av en skruv, och omgivande luft som tillhörande mutter).



Figur 5. Geometrisk stigningsvinkel α på radie r .



Figur 6. Stigningsgeometri.

Hur stor ska stigningen vara? Det beror på, det är olika för olika modeller, om man ska flyga utomhus eller inomhus osv. För skalamodeller ser man ibland tumregeln att förhållandet P/D (Stigning/Diameter) ska ligga på ungefär 1,4. Mycket lätta skalamodeller för inomhusflyg kan ligga på P/D som närmar sig 2,0 men då handlar det om ytterst lätta grejor som flyger i ostörd luft. Jag mätte

upp några olika köpta plastpropellrar och fann att de varierade oväntat mycket, dessutom var inte stigningen konstant utefter bladet på någon av dem. Det handlade om billiga grejor, termoplast som formsprutats och sedan fått svalna utanför verktyget, inte så konstigt om formen hade ändrat sig.

Propellerns geometri, bladet

Vi ska inledningsvis använda oss av blad som skärs ut ur en cirkulär cylinder, *cylindergeometri*.

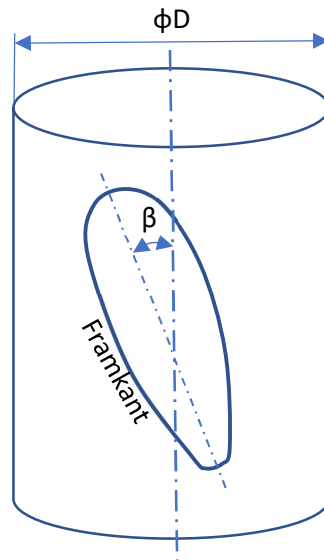
Vinkeln $\beta=15$ grader omnämns ofta i artiklar och på ritningar, ett värde som naturligtvis inte är hugget i sten.

Cylinderns diameter D ska vara "lämplig" i förhållande till propellerbladets storlek.

Förhållandena mellan D och β i förhållande till propellerns dimensioner i övrigt måste bestämmas erfarenhetsmässigt. Vanliga flaskor med volym på 50-150, kanske upp till 200 cl är i alla fall rätt storleksordning i det här sammanhanget.

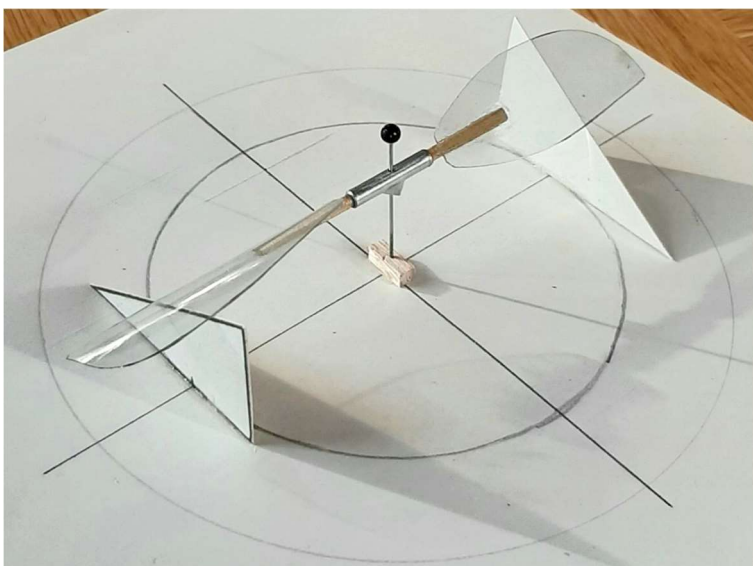
Var övre gränsen går för propellerstorlek av det här slaget vet jag inte, men upp till 10 tum diameter har jag sett uppgifter om.

Tumregeln är, använd större flaska till större propellrar.



Figur 6. Högergående propellerblad på ytan av en cirkulär cylinder.

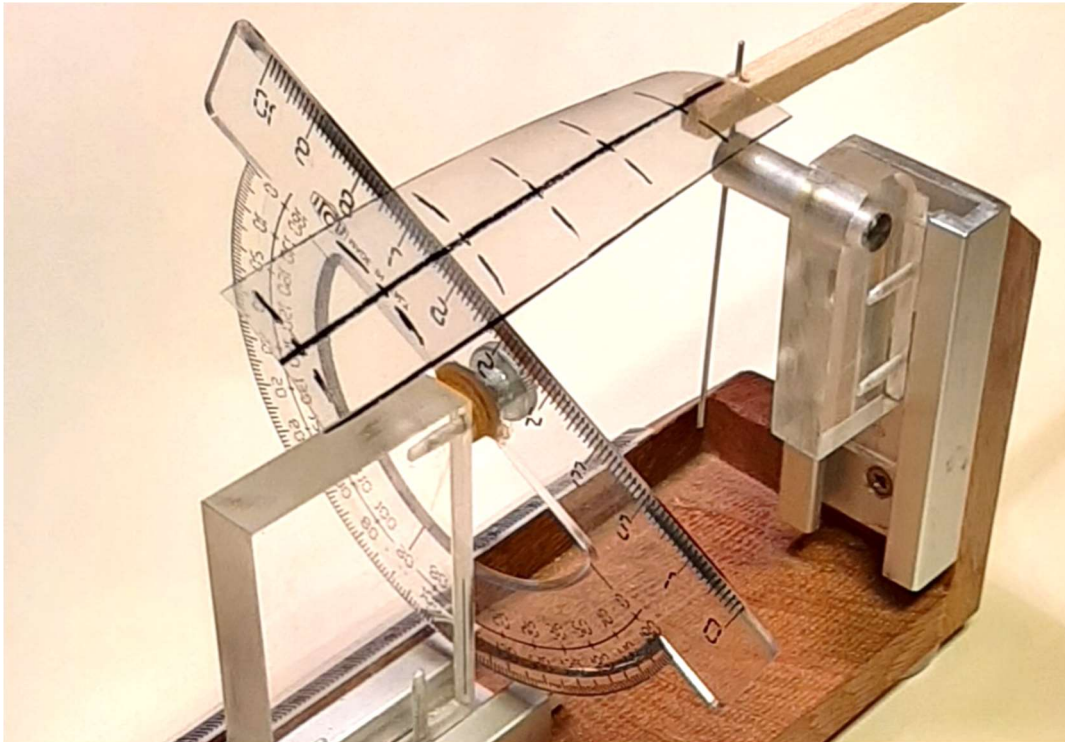
Man ser ofta i artiklar och på ritningar att bladvinkeln vid roten (navet) ska vara omkring 45 grader vid cylindergeometri, det är naturligtvis också en sanning med modifikation. Stigningsvinkeln kommer sedan att variera och bli vad den blir utmed bladet. Alternativt kan man bestämma sig för en viss vinkel vid någon radie längre ut för att få en viss önskad stigning, och sedan göra infästningen i navet därefter. Någon form av fixtur är bra här, så att man får samma vinkel på alla blad.



Figur 7. Propellervinkelfixtur, enklast tänkbara med ett par trianglar av kartong. Propellern är avsedd för en peanut, nav av aluminiumrör och bladen limmade till rundstavar som passar i röret.

En jämförelse mellan helix- och cylindergeometri

Hur mycket skiljer sig de olika varianterna åt, alltså blad med cylindergeometri relativt blad med helixgeometri? Jag började med ett enkelt rektangulärt blad från en PET-flaska. Bladet skulle resultera i en propellerdiameter upp till 180 mm, det var skuret ur en liten flaska med diameter 60 mm, lutningsvinkeln β var 15 grader. Bladet monterades med anfallsvinkel noll på radien 15 mm från axelcentrum (fig. 8).



Figur 8. Vinkelmätning längs enkelt bladämne.

I min anordning för att mäta propellrar mätte jag sedan upp bladvinkeln på olika radier från axeln, relativt nollvärdet på infästningsradien 15 mm. Jag jämförde med värden beräknade enligt ekvation 3 i appendix. Den skillnad som visas i tabell 1 beror dels på ofullkomligheter hos det i all hast tillyxade bladet och dels på mätnoggrannheten i mitt hemmabygga mätverktyg, gradskivan och dess manuella inställning har sina begränsningar. Vi ser dock att vinkeländringen väl följer de teoretiskt beräknade 7,4 grader per 15 mm radie. Förändringen av anfallsvinkeln hos ett cylinderblad sker alltså linjärt med ökande radie, inte som helix-geometrin i figur 4 som har störst förändring nära navet och avtagande ut mot spetsen.

Tabell 1. Vinkeländring som funktion av radien från propelleraxeln.

Radie r [mm]	Sträcka från infästningen [mm]	$\alpha_{\text{mätt}}$ [grader]	$\alpha_{\text{beräknad}}$ [grader]
15	0	0	0
30	15	7,5	7,4
45	30	15	14,8
60	45	22	22,2
75	60	31	29,7
90	75	38	37,1

Tabell 1 visar *vinkeländringen*, hur mycket som propellerns stigningsvinkel *minskar* relativt den vinkel som vi har fäst in bladet i navet. Alltså, om vi hade fäst in bladet med 45 graders vinkel vid $r=15$ mm, så skulle stigningsvinkeln vid $r=30$ mm vara $45-7,5=37,5$ grader, och så vidare.

Vi går vidare och översätter detta till faktisk stigning längs bladet. Vi använder ekvation 1 i appendix för att beräkna stigningen.

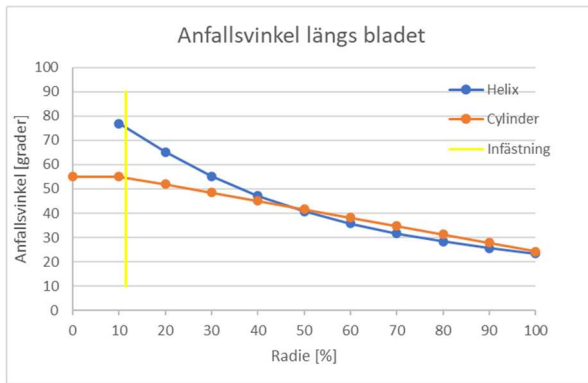
Tabell 2. Stigning längs propellerblad med cylindergeometri.

Radie r [mm]	α [grader]	Stigning P [mm]
15	$45-0=45$	94
30	$45-7,5=37,5$	145
45	$45-15=30$	165
60	$45-22=23$	158
75	$45-31=14$	129
90	$45-38=7$	69,4

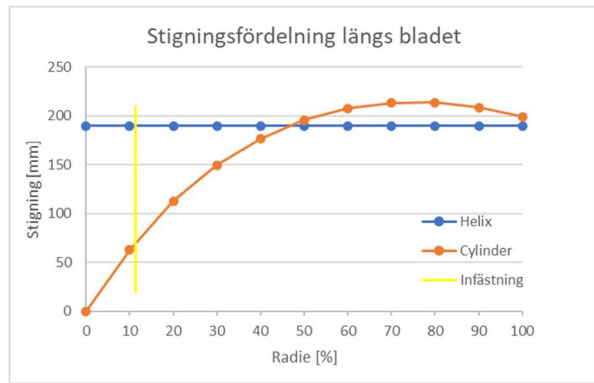
För cylindergeometri ser vi att stigningen varierar ganska mycket med radien, men att den en bit ut i propellerns verksamma område ligger på storleksordningen 155 mm. Den här propellern skulle alltså haft ett ganska lågt P/D på ungefär 155/150, något mer än 1,0. Å andra sidan har vi utgått från en cylinder med diameter 60 mm. Om vi istället hade använt en flaska med diameter 90 mm hade vi landat på mer normala $P/D \approx 1,4$. Man inser att cylinderns diameter (och även lutningsvinkeln β) ska harmoniera med propellerns dimensioner i övrigt.

Baserat på formlerna i appendix så snickrade jag ihop ett kalkylblad som ger fördelningen av anfallsvinkel och stigning längs propellerbladet. Från Hippocket kan man ladda ned ett liknande Excel-blad som har gjorts av Fred H. Rash (1). Detta vänder sig närmast till inomhusflygare som formar tunna balsablad runt en konisk form. Frågeställningen här är "Jag vill göra en propeller med diameter D och stigning P. Givet en viss kon, hur orienterar jag bladet bäst på konen?" Genom att ändra olika parametrar kan man så hitta en kongeometri som ligger nära helixgeometrin. Rash kalkylblad verkar fungera även till cylindergeometri om man sätter konens diametrar i stor- respektive lilländan lika. Längdenheten i Rash's blad är naturligtvis inch, och han utgår från propellerspetsen, och räknar sedan inåt mot navet. Jag har gjort tvärtom, bestämt radie och vinkel vid navet, och sedan räknat mig ut mot propellerspetsen. Jag har endast provkört ett fåtal exempel, men då fått mycket god överensstämmelse mellan Rash och mitt eget blad.

Figurerna 9 a och 9 b är exempel från mitt eget kalkylblad. Jag har lagt in en gul vertikal linje i graferna som markerar radien för bladets infästning. Till vänster om gula linjen har vi alltså nav, och värdena på anfallsvinkel respektive stigning saknar mening även om värden i vissa fall kan beräknas. Till höger om gula linjen har vi bladets verksamma del, det är här vi vill få till god överensstämmelse mellan cylinder- och helixgeometri. Den till synes stora avvikelser i stigningsfördelning som vi ser i figur 9 b beror på att anfallsvinkeln längs bladet (fig. 9 a) är olika för cylinder- respektive helixgeometri.



Figur 9 a. Helix jämfört med cylindergeometri.



Figur 9 b. Helix jämfört med cylindergeometri.

Här är länken till excel-bladet: <..\..\Propellergeometri.xlsx>

Primärdata är önskad propellerdiameter och stigning samt cylinderdiameter (flaskans diameter).

Primärdata		Variabler	
Propellerdiameter D [mm]	140	Snedvinkel β [grader]	15
Stigning P [mm]	190	Vinkel vid nav [grader]	55
Cylinders diameter [mm]	60	Radie vid nav [mm]	8
P/D	1,36		

Figur 10. Exempel på indata till excel-bladet.

Genom att klicka på den ljusgröna ruta du vill ändra, och sedan ange lösenordet "CylPrim" så kan du prova olika värden på denna parameter och sedan se hur anfallsvinkel och stigning ändras, och hur de ligger till jämfört med en helix-geometri med den angivna stigningen, figur 9. Genom att klicka på de lite mörkare gröna rutorna till höger och ange lösenordet "CylVar" så tillåts du även att prova egna värden på snedvinkeln β på flaskan, med vilken vinkel bladet är monterat vid navet och vilken radie som navet har. Genom att leka runt med dessa värden så kan du hitta kombinationer som ganska bra approximerar cylindergeometrin med helixgeometrin och därmed se hur du bäst ska utnyttja just din tillgängliga flaska. Till höger i tabellen beräkningsvärden finns en kolumn, Kontroll. Här beräknas summan av stigningen för bladet och en term som kommer av skillnaden i anfallsvinkel mellan cylinder- och helixgeometri, denna summa ska bli lika med den nominella stigningen. Längst till höger finns en kolumn ΔP som anger avvikelsen mellan bladets stigning och den nominella stigningen uttryckt i procent.

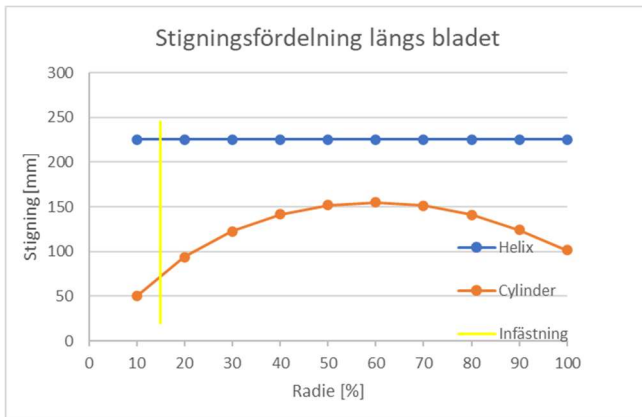
Beräkningsexempel

Antag att vi vill göra en propeller med diameter 160 mm som har stigningen 225 mm ($P/D=1,4$). Formel (2) i appendix, alternativt excel-bladet ger då bladvinkeln för olika radier. Med dessa värden kan man sedan skissa upp ett block och karva en traditionell propeller.

Om vi istället ska göra bladen av PET-flaska så har vi alltså fixerat värdena D (160) och P (225). Olika val av PET-flaskor ger oss olika värden på *Cylinders diameter*. Vi kan inte variera denna diameter hur som helst, den blir vad den blir sedan vi väl har valt en flaska.

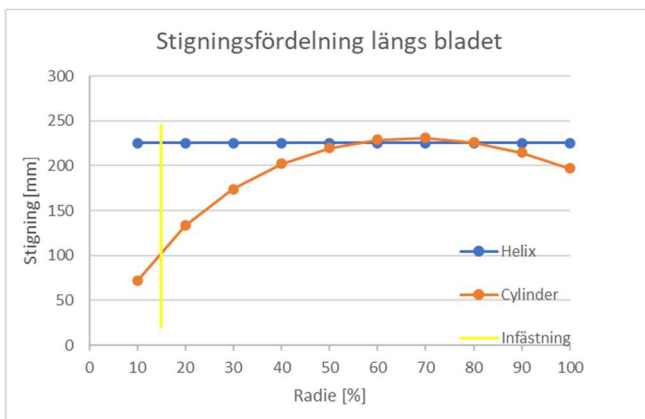
Det vi lätt kan styra är snedvinkeln β och bladens infästningsvinkel mot navet, samt alltså i viss mån diametern på flaskan. Vi kan sedan ändra på de olika värdena och hitta kombinationer som närmar sig det vi vill ha.

Om vi t.ex. använder en liten 50 cl flaskan med diametern 60 mm och lutar bladen 15 grader samt fäster in dessa i 45 graders vinkel vid navet med radie 12 mm får vi följande resultat, figur 11.



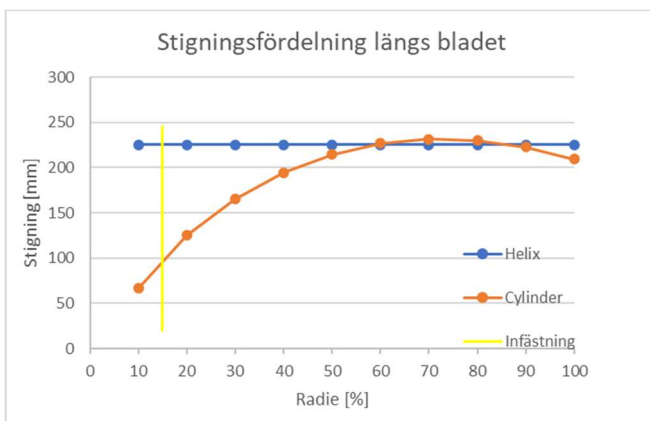
Figur 11.

Vi ser att stigningen ligger avsevärt lägre än önskat värde längs hela bladet. Om vi så ökar infästningsvinkeln vid navet till 55 grader, så får vi istället resultatet i figur 12.



Figur 12.

Stigningen ligger nu runt det önskade värdet åtminstone för de yttersta 60% av bladet, betydligt bättre. Alternativt, en större flaskan med 75 mm diameter, och snedvinkel $\beta=17$ grader, samt infästningsvinkel vid nav 53 grader resulterar i ungefär samma värden, figur 13.



Figur 13.

Här uppstår nu frågan om vilken noggrannhet vi har. Tror vi oss verkligen kunna markera bladen i 17 graders vinkel och/eller göra slitsarna i navet i 53 graders vinkel, för alla bladen? Jag tror att rekommendationerna om 15 respektive 45 grader grundar sig i detta, de duger ofta, och de är relativt enkla att uppnå.

Vi har sett att cylindergeometrin resulterar en viss avvikelse gentemot helixgeometrin, särskilt när det gäller fördelningen av stigningsvinkel längs bladet. Avvikelsen är betydande på små radier nära navet. Å andra sidan är det ju på större radier som propellerbladet är mest verksamt. Om vi ska försöka optimera, så är det i första hand de yttre delarna av bladet som ska ligga nära helix-geometri.

En jämförelse mellan cylinder- och kongeometri, samt förhållandet till helix

Många modellflygare lägger ut sina propellerblad utmed en rak, cirkulär stympad kon. Man får då konisk geometri som bättre approximerar helixen än den cylindriska (ekvation 4 i appendix).

Cylindern karakteriseras av att alla dess generatriser är parallella. Detta gäller dock inte på en kon, figur 14. På en kon är inte generatriserna parallella, om man drar ut dem så kommer de till slut att skära varandra i en punkt, konens spets.

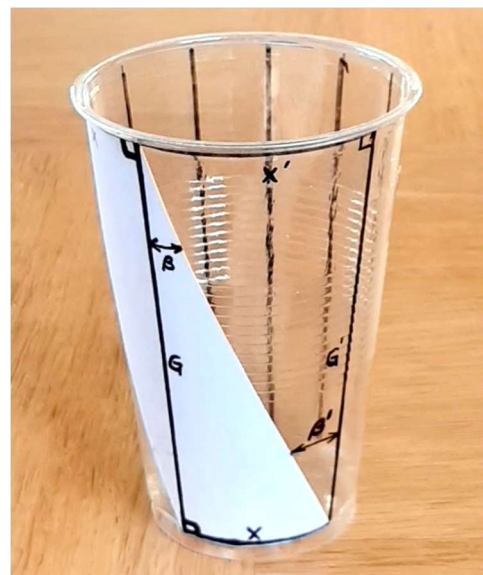
I det föregående har vi studerat hur man på cylindern entydigt kan lägga linjer i en sned vinkel β mot generatriserna, och sedan orientera sina propellerblad efter dessa. Om vi ska göra motsvarande på en kon så måste vi vara medvetna om att resultaten blir olika beroende på hur vi definierar snedvinkeln.



Figur 14. Generatriser på cylinder respektive kon.

För att illustrera detta så använder vi figur 15. Utgående från generatrisen G lägger vi snedvinkeln β från konens storända. I lilländan på konen kommer bågen mellan generatrisen och snedlinjen att ha längden x . Vid högra ändpunkten av x drar vi så en ny generatris G' längs konens storända blir x' , som av lätt insedda skäl kommer att vara större än x . Snedvinkeln med utgångspunkt från konens lillända blir nu β' .

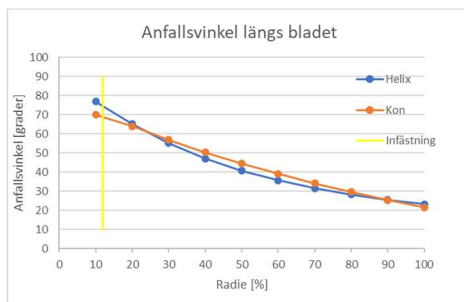
På en cylinderyta, med parallella generatriser så hade β och β' naturligtvis blivit lika. Men, på konytan kommer β' att vara större än β , ekvation (5) i appendix.



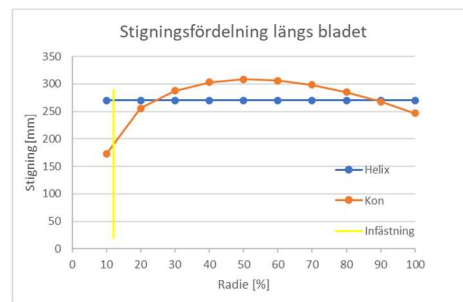
Figur 15. Geometri på kon.

Alltså, en och samma snedlinje utmed en kon har olika vinkel mot en generatris beroende på om vinkelspetsen ligger på konens storända eller på dess lillända. Det här spelar roll när vi formulerar sambanden i Excel-bladet.

Jag har ännu inte undersökt propellrar med konisk geometri i praktiken, bara testat olika parametrar i Excel-bladet. Men, det verkar klart intressant, här finns dels en möjlighet att utnyttja även koniska förpackningar som diverse burkar och även topparna på vissa PET-flaskor, och därmed en möjlighet att komma ytterligare lite närmare en helixgeometri. Övre delen på en Fun-Light flaska är konisk på ett sätt som borde passa en mindre propeller. $D_1=80$ mm i storändan, $D_2=50$ i lilländan, samt höjd $H=100$ mm, jag lade in dessa värden i mitt blad tillsammans med; propellerdiameter 200 mm, stigning 270 mm snedvinkel $\beta'=22$ grader, vinkel vid nav 70 grader och radie vid nav 12 mm, och fick så resultaten i figur 16.

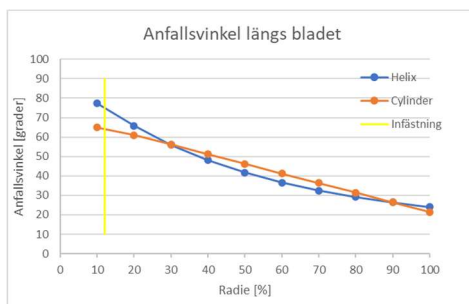


Figur 16 a. Konisk jämfört med helix.

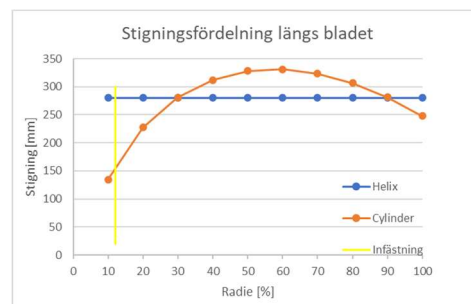


Figur 16 b. Konisk jämfört med helix.

Samma värden på propellerdiameter, navdiameter och stigning, men med cylinderdiameter 60 mm, snedvinkel $\beta=15$ grader och vinkel vid nav 65 grader, gav istället resultatet i figur 17.



Figur 17 a. Cylindrisk jämfört med helix.



Figur 17 b. Cylindrisk jämfört med helix.

Jag har inte lagt ned något arbete på att optimera det här, jag vill bara visa exempel på en jämförelse. Vi ser att värdena för den koniska följer motsvarande för helixen något bättre, än motsvarande för den cylindriska, men skillnaderna är inte dramatiska. De som formar sina blad på en cylinder eller kon har ju friheten att optimera sina former för ändamålet. Om vi ska göra propellerbladen av plastförpackningar så är vi istället bundna till de cylinderdiametrar och konformer som är tillgängliga. För att efterlikna helixens icke-linjära vinkelfördelning är det fördelaktigt med relativt kraftig konicitet. Många i handeln förekommande förpackningar är bara svagt koniska, varför skillnaden mot cylinder blir liten.

Även i det här fallet har jag för några fall jämfört resultaten från mitt eget blad med motsvarande från Rash's. Rash utgår ju ifrån anfallsvinkeln vid bladets spets och räknar sig inåt mot navet, alltså enligt vinkeldefinitionen β i figur 15. I mitt eget blad fortsatte jag som i fallet med cylindergeometri, och räknar istället från navet och utåt, enligt vinkeldefinitionen β' . Med tanke på de olikheter som naturligtvis föreligger mellan mitt och Rash's angreppssätt tycker jag ändå att överensstämmelsen är väldigt bra. Excelbladet för kon fungerar på samma sätt som det för cylindern. Lösenorden för att ändra indata är "KonPrim" respektive "KonVar".

Propellerdiameter för olika antal blad

Antag att vår modell flyger bra med en tvåbladig snurra. I ett visst flygtillstånd påverkas propellern av ett vridande moment M och roterar med vinkelhastigheten ω (omega), varvid den ger dragkraften F . Vi vill nu få till en propeller med flera blad. Hur stor ska den göras? Om vi bara ökar antalet blad så kommer vi rimligtvis också att behöva öka vridmomentet för att orka driva runt propellern. En första ansats är alltså att en propeller med flera blad ska ha minskad diameter.

Om vi utgår från de s.k. lagarna för geometriskt likformiga (samma P/D) propellrar (ref. 2) så finner vi att dragkraften är proportionell mot diametern upphöjt till fyra. Om vi antar att propellern med n stycken blad kan anses som likformig med en tvåbladig dito och att båda ger samma dragkraft, så får vi ekvation 6 i appendix. Ur denna kan vi sedan beräkna den n -bladiga propellerens diameter i förhållande till den tvåbladiga, tabell 3.

Tabell 3. Diameter på n -bladig propeller i förhållande till tvåbladig för olika antal blad.

Antal blad n	D_n/D_2
2	1,0
3	0,90
4	0,84
5	0,80
6	0,76

Om geometrisk likformighet ska bibehållas så ska alltså P/D vara konstant, det innebär att även stigningarna ska förändras på samma sätt som diametrarna, alltså P_n/P_2 ska också följa tabell 3.

Det här är naturligtvis väldigt grovt, eftersom vi helt bortser från diverse fenomen och effekter som säkert spelar roll. Det är i alla fall något att börja med, jag har inget bättre. Gör propellern med lite mindre diameter och stigning om den ska ha flera blad, sedan behöver man förmodligen justera snoddens dimensioner också.

Propellerbladen

Nu blir det praktik. Steg ett är att välja ut en lämplig plastförpackning, alltså en PET-flaska med cirkulär cylindrisk form och slät yta, utan en massa rillor och krusiduller (det går att hitta sådana).

När flaskan är tom och ren så är det bara att kapa bort topp och botten, och sedan med hjälp av en mall och märkpenna rita upp bladen på materialet. Lägg svepet runt en glasflaska med markeringar som den i figur 18. Bitarna klipps sedan till med en bra sax.

Om man bedömer att materialets tjocklek är otillräcklig, så kan man enkelt göra förstärkningsbitar som limmas närmast navänden på bladet, figur 19. En förstärkningsbit gör avsevärd skillnad. Till peanuts (fig. 7) och annat smått klarar man sig helt utan förstärkningar, till större propellrar behöver man kanske två eller rentav tre bitar utanpå varandra.



Figur 18. PET-flaska, uppklippt PET-flaska med en uppsättning blad markerade och även en glasflaska med 15-graders markeringar som hjälp för uppritandet. PET-svepet viras runt den markerade flaskan, mallen läggs utanpå i markeringarnas riktning, sedan är det bara att rita, och klippa.



Figur 19. Blad till propellern i figur 1 med tillhörande förstyvningar. Blänket i delarna ger en indikation om deras lutning i förhållande till flaskans axel.

Som redan nämnts, när man klipper upp en PET-flaska så kan man ibland råka ut för att mantelsvepet inte förblir helt cirkulär cylindriskt, utan kanske något koniskt. Det beror på flaskans tillverkningsprocess, man värmer upp ett litet flaskämne inuti en form och blåser så upp flaskan till sin slutgiltiga form. Om då godstjockleken blir olika utmed flaskan så kommer det att påverka formen på det uppklippta svepet. Det bästa man kan göra i så fall är att lägga alla bladen utefter samma kant. Det händer också att svepet antingen öppnar sig eller sluter sig, alltså att dess krökningsradie i uppklippt tillstånd är annat än den ursprungliga flaskans radie. Detta får man ta hänsyn till om man ska använda kalkylbladet.

Propellernavet

Navet ska ha en lagring för propelleraxeln, vanligtvis en bit rör av aluminium eller mässing. Det kan vara bra att borra hålet och fästa lagringen på ett tidigt stadium, då har man en bra referens när man senare ska fästa propellerbladen i rätt vinkel.

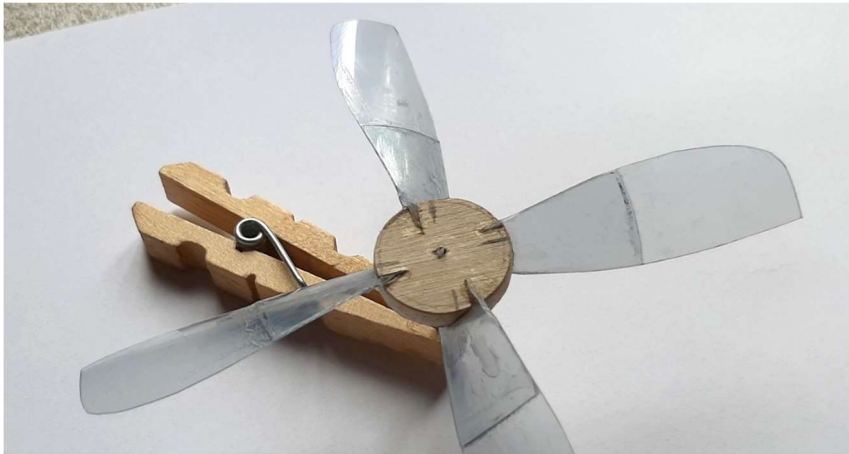
Navets utformning kommer att bero på det antal blad som propellern ska ha. Enklast är tvåbladigt, då kan man göra navet av en rak bit list eller rundstav som slitsas i vardera änden. En fyrbladig propeller görs enkelt genom att korsa två sådana navbitar som bladen sedan fästs vid.



Figur 20. Ämne till vanlig tvåbladig högergående propeller med nav av balsalist.

Jag har också gjort nav av rondeller som skiktlimmats av balsa och plywoodbitar på en bit rundstav (fig. 21). När det har torkat så kan rundstaven klämmas fast försiktigt i chucken på bormaskinen, och rondellen formas med sandpappersblock. Bladen fästs i slitsar som först sågas med en fintandad ryggsåg (Zona-såg) och sedan ryms upp med sandpapper, det är faktiskt enklare än det låter.

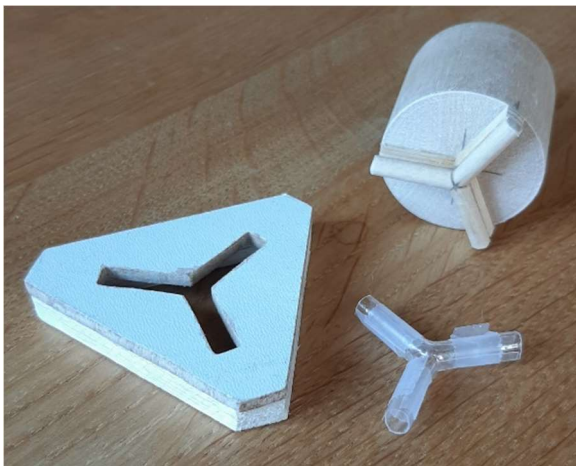
Eventuellt kan de också bearbetas med en Dremel-maskin försedd med ett tunt diamantslipstift. Om man dristar sig till att använda keramiska slipskivor ska man veta att dessa är väldigt sköra och att Dremel-maskinen går med mycket högt varvtal. Då är det extra viktigt med skyddsglasögon! Ett diamantbelagt stift av stål är klart bättre här.



Figur 21. Ämne till en fyrbladig högergående propeller.

Ett nav i form av en rondell gör det enkelt att senare förse propellern med en spinner.

Till flerbladiga propellrar med spinner gör man lämpligtvis en rondell enligt det ovanstående. Trebladigt utan spinner är avsevärt svårare. Man *kan* (jag har gjort det också) foga ihop tre bitar till en Mercedesstjärna, men man behöver förstärka fogen i mitten för att det ska hålla, det är inte helt enkelt. Jag gjorde senare ett formpressningsverktyg (figur 22) så att man kan formpressa två navhalvor av plast. Efter pressning skär man rent från överflödigt material och limmar ihop halvorna. Figur 23 visar halvorna hoplimmade, surrade med tråd och ett tunt skikt av epoxy utanpå alltihop. En axellagring har monterats och ett av de tre bladen är på gång.



Figur 22. Formpressningsverktyget och ett par ihoptejpadе navhalvor.



Figur 23. Nav av formpressade halvor med ett av propellerbladen.

Propellerbladen limmas till bitar av rundstav som sticks in i i navet. Slitsarna i rundstavarna gjordes som tidigare, med Zona-såg och sandpapper. Det visade navet är gjort för 4 mm rundstav. Propellerbladens anfallsvinkel kan därmed justeras innan bladen fästs permanent. Att bara pressa in rundstavsändarna i navet så att man sedan kan ändra på stigningsvinkeln är onekligen tilltalande. Jag har gjort så ibland, men jag har också förlorat propellerblad på det viset, på större och snabb-

roterande växlade propellrar. Bladen kan helt enkelt ryckas loss av centrifugalkraften under flygning, med kraftiga vibrationer som följd. Att sedan försöka hitta ett sådant propellerblad i högt gräs är helt utsiktslöst.

Figur 24 visar Tigerkatten med två trebladiga direktdrivna snurror. En höger- och en vänstergående, nav av formpressade halvkor som i figur 22. Diameter 145 mm, stigning 195 mm, vikt knappt 3 gram styck. Sedan växlarna tagits bort kunde jag också ta bort vikten i stjärten, en viktbesparing på totalt 4-5 gram. Modellen flög utmärkt med samma snoddar som jag använt tidigare till de växlade, något mindre propellrarna, 4 strängar $\frac{3}{32}$ " i vardera nacellen.



Figur 24. Klart för provflygning.

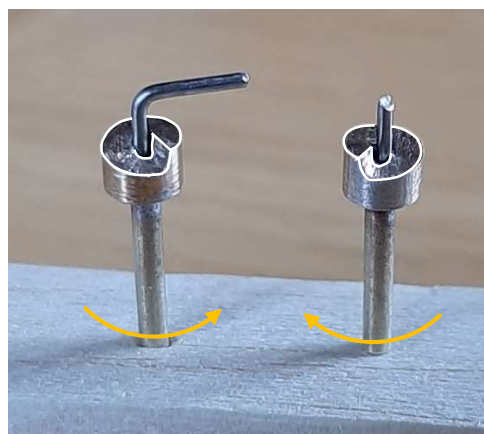
Senare målades propellrarna och försågs med små spinnare. Jag gjorde längre snoddar med något klenare tvärsnitt och fick därmed in fler varv. Modellen flög utmärkt (utom tävlan) på Stibner Memorial 2022. Propellrarna fick då även vidkännas viss markkontakt utan problem.

Frigångsanordning

Navet behöver förses med en frigångsanordning så att propellern kan snurra fritt sedan gummimotorn har slutat driva. Det finns flera olika varianter för detta, personliga preferenser och tillgängligt utrymme i navet får avgöra valet. Ibland kan man dölja dessa saker med en spinner.

Figur 25 visar en variant av frigång av samma slag som de på köpta plastpropellrar. Ett par bitar ihoplödda mässingsrör, en bit som passar på propelleraxeln, och en lite tjockväggigare bit som passar utanpå. I den sistnämnda gör man urtag med hjälp av nålfilar och/eller en Dremel-maskin. Titta på en köpepropeller hur det ska se ut. Se till att fila urtagen åt rätt håll, det är här det avgörs om propellern blir höger- eller vänstergående.

Gör inte urtagen för grunda, det är viktigt att den bockade änden på propelleraxeln får ordentligt grepp. Min Westland Welkin missade sina tävlingsstarter på Stibner Memorial 2022 precis på grund av slarv med detta.

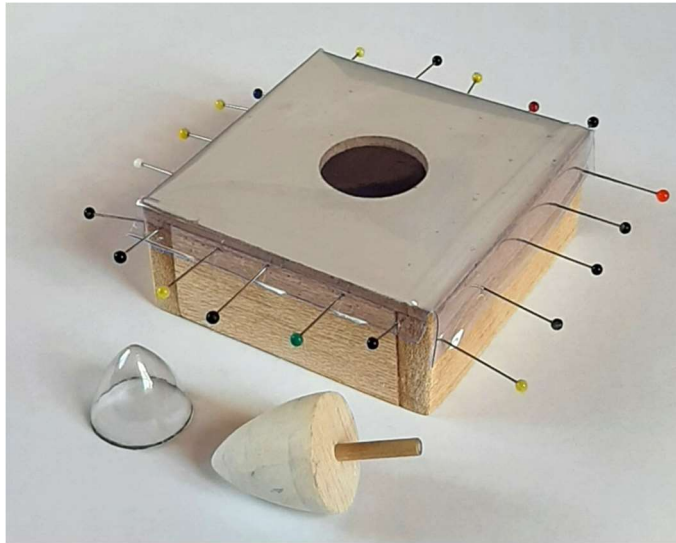


Figur 25. Propellerbussningar för frigång.

Spinners

Många förebilder har ju propeller med spinner. Jag har gjort flera spinners genom att formpressa plast på samma sätt som man gör med kabinhuvar. Till spinners kan man med fördel använda sådant som inte duger till kabinhuvar, alltså färgat material och även lite tjockare plast. Experimentera gärna!

Samma verktyg kan många gånger användas till olika storlekar på spinners, helt enkelt genom att man kapar bort olika mycket material i storändan sedan man har pressat. Med ett lite större verktyg kan man alltså även göra mindre spinners, det är bra.



Figur 26. Formpressningsverktyg till spinners.

Ska du sätta spinnern på en propeller som den i fig. 21 så gör du först slitsarna i navrondellen, trär därefter på spinnern och markerar så urtagen för bladen. Sedan kan du fästa bladen i navet, och till sist också "skruva" på spinnern.

Att formpressa plastdetaljer är en ädel konst, tidvis mycket tålamodsprövande. Vanligtvis går det åt några försök innan man får till grejor som man är nöjd med. Plastens alla olika egenskaper, hur mycket man värmer, formverktyget, allt spelar in. En viktig aspekt är att plastmaterialet som ska pressas *nålas* fast runt periferin på honan, tejp funkar inte när det blir varmt. Notera särskilt i figur 26 hur nålarna har placerats, på det här viset är de inte i vägen när man ska värma plasten över en spisplatta, och nålarna sitter där plasten inte värms så mycket. Honan ska göras av ett hyfsat stabilt material, gärna masonite eller liknande så att hålets kanter inte deformeras under användning. Wellpapp fungerar inte här och balsa kanske är synd att använda till detta ändamål. Notera också att hanen har ett litet skaft så att man kan hålla den medan man pressar. Sådana här små detaljer är avgörande för om man ska lyckas, eller om det bara ska krångla. Det viktiga är att inte ge upp, nästa gång går det bättre...

Jag brukar värma i köket över en av plattorna på elektriska spisen. En bra handske rekommenderas på den handen som håller honan med plasten. En varmluftspistol fungerar naturligtvis också att värma med, men det är betydligt större risk att man värmer plasten ojämnt än över en spisplatta.

Jag har utvecklat en känsla av att tjockare plast är lättare att formpressa, förmodligen för att den tjockare plasten inte svalnar lika snabbt som tunnare dito.

Propelleraxlar

Axlarna görs naturligtvis av pianotråd, krokar för gummit bockas. Jag gör numera alltid mina krokar i form av S-krokar, se vidstående artikel (3). S-kroken är inte alldeles enkel att göra, men klart värd besväret, en mycket bra metod för att undvika att gummisnodden klättrar på sin krok.

Balansering

En propeller ska vara balanserad. Obalans skapar vibrationer och orsakar dålig verkningsgrad. Den enklaste formen av balansering är *statisk* balansering. Det innebär att propellern väger jämt på sin axel, om man sätter snurr på propellern så ska den stanna i ett godtyckligt läge. Om den alltid stannar med samma blad hängande nedåt så är den *inte* balanserad, i sådana fall har den

(åtminstone) ett blad som väger för mycket. Om man har en sådan propeller börjar man med att kontrollera att alla bladen är geometriskt likadana. Om obalansen kvarstår efter korrigeringar så får man lägga till massa på lätta sidan, t.ex. genom att lägga lite epoxilim tills man uppnår jämvikt. Att skrapa bort material (added lightness) på tunga sidan funkar inte så bra på våra blad av plastflaska.

En propeller kan också vara *dynamiskt obalanserad* trots att den är i statisk balans. Det innebär att den vibrerar under drift. Detta tillstånd kan t.ex. bero på olikheter mellan bladens anfallsvinklar eller i den radiella massfördelningen. Det här tillståndet är avsevärt svårare att åtgärda på en färdig propeller. Men, vid de relativt låga rotationsvarvtal som vi gummimotorflygare hanterar så är (vanligtvis) denna effekt inget större problem, dock viktig att känna till. Enbladiga propellrar som används på vissa oldtimermodeller kan råka ut för det här, med avsevärda vibrationer som följd.

Avslutningsvis

Propellrar finns visserligen att köpa färdiga men det ligger en oerhörd tillfredsställelse i att kunna göra saker själv. En omsorgsfullt byggd modell ska ju naturligtvis krönas med en likaledes omsorgsfullt egentillverkad propeller. Dessutom vill man kanske testa några olika propellerparametrar.

Fotot till höger visar visserligen inte så mycket av själva modellen, men förmedlar förhoppningsvis känslan av att resultatet är mödan värd. Min tvåmotoriga semiskala Westland Welkin (fig. 1) flyger (en bra bit bort) över Tinnerö eklandskap, strax utanför Linköping i augusti 2021. Fin fri flygning i fint väder över ett fint fält. Man känner sig rätt nöjd vid sådana där pastorala tillfällen.

Det här projektet började i all blygsamhet men svällde avsevärt i omfattning under resans gång. Arbetet har givit mig själv flera nya och intressanta insikter, och jag hoppas bara att det ska inspirera andra också. Lycka till!



Figur 27. Modellen i figur 1 i luften.

Referenser

- (1) Fred H. Rash, Bucket Prop for Excel 2010, Hippocket aeronautics
- (2) R. H. Warring, Airscrews for the Aeromodeller, Harbour Publishing Co. Leicester 1942
- (3) Hans Karlsson, S-krokar för gummimotordrift, SMOS hemsida

Hans Karlsson, Linköping

Appendix, använda formler

Stigningsvinkel vid helix-geometri

Stigningen P är konstant för alla olika värden på r .
Trigonometrin ger oss att:

$$\tan \alpha_{spets} = \frac{P}{\pi \cdot D}$$

Eller, för en godtycklig radie r :

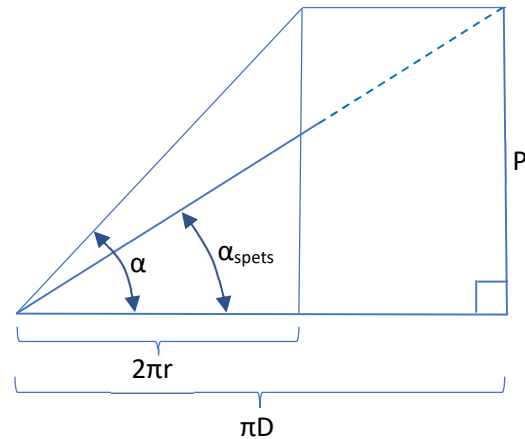
$$\tan \alpha = \frac{P}{2\pi \cdot r}$$

Stigningen P på radien r blir således:

$$P = 2\pi \cdot r \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

Stigningsvinkeln α på radien r ges alltså av:

$$\alpha = \arctan \frac{P}{2\pi \cdot r} \quad (2)$$



Figur A1. Stigningsgeometri.

Vinkeln α blir *inte* en linjär funktion av radien r , eftersom arcusfunktionerna inte är linjära.

Cylindergeometri

Bladet är markerat streckat på cylinderytan.
Cylindern har radien r . Bladet lutar vinkeln β mot cylinderns axel, och även mot en parallell generatris G på cylinderytan.

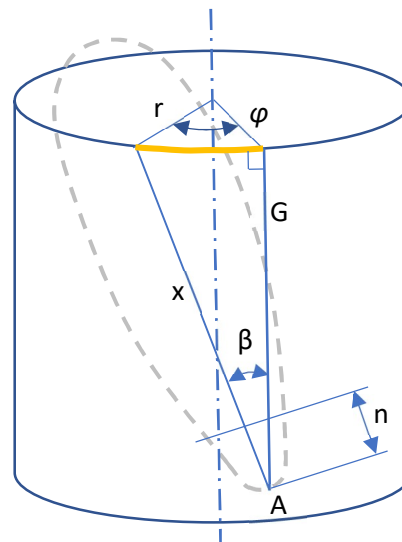
Vi söker bladvinkeln φ på en godtycklig sträcka x från propelleraxeln A . Vinkeln φ är nominellt noll vid A , och växer med ökande x . Vid $x=n$ fästs bladet mot navet, och får därmed där den vinkel vi ger infästningen.

Den orange bågen i figuren har längden $r \cdot \varphi$. Om vi breder ut cylinderytan på ett plan så kommer sträckan x , bågen $r \cdot \varphi$ och generatrisen G att bilda en rätvinklig triangel, trigonometrin ger oss att:

$$\sin \beta = \frac{r \cdot \varphi}{x}$$

Alltså:

$$\varphi = \frac{x}{r} \sin \beta \quad (3)$$



Figur A2. Cylindergeometri.

Vinkeln φ kommer alltså variera linjärt med sträckan x , eftersom både radien r och vinkeln β är konstanter.

Vän av ordning noterar säkert att när vi mäter anfallsvinkeln på en propeller så sker det utefter sträckan x , inte som vi (förenklat) har gjort här, utefter generatrisen G på cylinderytan.

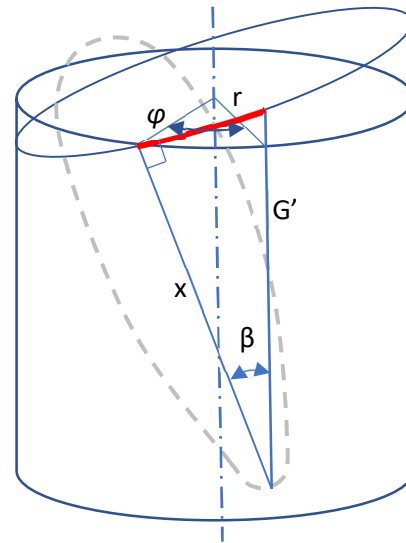
Låt oss titta närmare. Om vi på samma sätt som tidigare breder ut cylinderytan i figur A3, så har vi nu en rätvinklig triangel med hypotenusan G' och ena kateterna x . Den andra katetern, röda bågen längs ellipsen blir: $\frac{r \cdot \varphi}{\cos \beta}$, vi får således:

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{r \cdot \varphi}{x \cdot \cos \beta}$$

Alltså, precis som tidigare:

$$\varphi = \frac{x}{r} \sin \beta$$

Vinkeln φ kommer att variera linjärt med sträckan x .

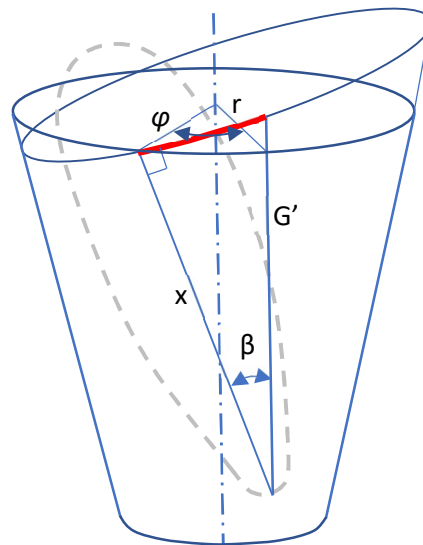


Figur A3. Cylindergeometri.

Om vi istället tänker oss propellerbladet på ytan av en rak stympad kon, figur A4 så inser vi att förhållandena blir väldigt lika dem på cirkulär cylindern. Men, nu kommer även radien r att bli en funktion av sträckan x , $r=r(x)$:

$$\varphi = \frac{x}{r(x)} \sin \beta \quad (4)$$

Det här betyder att vinkeln φ inte längre varierar linjärt med x . När radien är mindre, närmare konens spets, kommer *vinkeländringen* att vara större än längre från spetsen där radien är större. Slutsatsen blir att den koniska geometrin bättre approximerar helixgeometrin än den cirkulär cylindriska.



Figur A4. Kongeometri.

Definitionen av snedvinkeln β kan göras på två olika sätt, detta har en viss betydelse. Vi ska titta närmare på det, figur A5.

I konens storända har vi radien $R_1=D_1/2$, i lilländan har vi radien $R_2=D_2/2$. Vi utgår från ekvation (4):

$$\varphi = \frac{x}{r(x)} \sin\beta$$

Där ju x mäts längs den sneda linjen.

Om vi nu låter x vara den sneda linjens hela längd så kan vi för vinkeln i lilländans plan skriva:

$$\varphi_2 = \frac{x}{R_2} \sin\beta$$

Och, på samma sätt för vinkeln i storändan:

$$\varphi_1 = \frac{x}{R_1} \sin\beta'$$

Men, vinklarna φ_1 och φ_2 är lika. Vi har skurit konen på längden med två plan som vardera innehåller konaxeln och en generatris, Vinkeln mellan dessa plan är konstant längs konen. Vi får därmed sambandet mellan vinklarna β och β' :

$$\frac{\sin\beta'}{\sin\beta} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5)$$

Eftersom R_1 är större än R_2 , så måste också β' vara större än β .

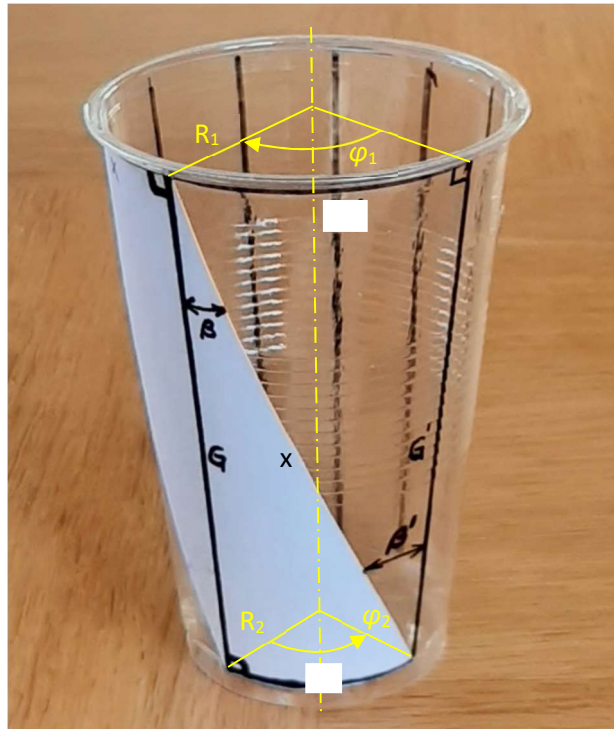
Likformighetslagarna

För geometriskt likformiga propellrar har man bl.a. sambandet för dragkraften:

$F = \text{konstant} \cdot D^4$. Alltså dragkraften är proportionell mot ett antal konstanter och propellerdiametern upphöjt till fyra, *per blad*. Om vi nu tänker oss två propellrar, en med två blad och diametern D_2 , den andra med n st. blad och diametern D_n , samt att dessa (djärvt?) kan anses vara geometriskt likformiga och ge samma dragkraft kan vi alltså skriva:

$$F = \text{konstant} \cdot 2 \cdot D_2^4 = \text{konstant} \cdot n \cdot D_n^4, \text{ ur vilket vi får:}$$

$$\frac{D_n}{D_2} = \sqrt[4]{\frac{2}{n}} \quad (6)$$



Figur A5. Geometri på kon.