

## Miljöproblem inte bara koldioxid

Tidigare i år lade två lågprisflygbolag i Indien och ett i Irland en rad kolossala beställningar på fotogendrivena flygplan. Dessa 1 270 flygplan bidrog till flygindustrins bästa försäljning under första halvåret sedan 2010, men leveransdatum i början av 2030-talet för många av flygplanen innebär att de kommer att flyga och släppa ut klimatvärmade koldioxid, långt efter mitten av seklet. Hur kan netto-noll CO2 vara möjligt till 2050 med så många fotogendrivena plan på beställning nu? Nya miljöproblem dyker hela tiden upp när man försöker åtgärda gamla.

[A Manhattan Project for the climate](#)  
[Siktar högre](#)  
[Den Mörka Sidan Av Grönt](#)

Atmosfäriska forskare beräknar att kommersiell luftfart idag är ansvarig för 5% av den globala uppvärmningen av atmosfären. CO2-utsläpp står för cirka 2,5% och resten kommer från utsläpp av andra växthusgaser, kväveoxider och även partiklar och vattenånga, som förvandlas till kondensstrimmor och moln. De 5% är inte mycket just nu, men andelen kan växa när andra sektorer arbetar för att minska sina utsläpp. Samtidigt beräknas passagerarantalet fördubblas eller till och med tredubblas fram till 2050, vilket ökar luftfartens andel av utsläppen till var som helst mellan 10% och 37% av den globala totalen. Vad kan då göras?

Det Montreal-baserade International Air Transport Association, IATA, vars medlemmar transporterar 83% av världens passagerare och gods, vill uppnå netto-noll koldioxidutsläpp för flygare 2050. IATA uppmanar införandet av hållbara flygbränslen, SAF, tillverkade av förnybara råvaror som återvunna matoljor, jordbruksavfall och skogsavfall. Målet är att flyga flygplan på 100% SAF.

Men "hållbara bränslen" måste skapas genom en energikrävande industriprocess. Utvecklingskostnaden kommer att bli enorm och tidsramarna långa. Hållbara bränslen kan så småningom minska nivåerna av ytterligare CO2 som släpps ut i atmosfären, men eliminering av NOx och ihållande kondensstrimmor kan inte garanteras, vilket kan lämna så mycket som 70% av luftfartens negativa klimatpåverkan oförminskad.

Ingen kan heller säga säkert att tillräckligt med SAF kan produceras för att nå netto-noll. IATA uppskattar att cirka 449 miljarder liter SAF kommer att behövas årligen år 2050 för att uppnå det målet, men 2022 producerades bara 300 miljoner liter.

Flytande väte som förbränns direkt i jetmotorer eller omvandlas till el via bränsleceller för att driva motorer, skulle befria flygningar från CO2-utsläpp, eftersom det inte finns något kol i deras kemi att släppa ut. Airbus samarbetar med CFM International och Rolls-Royce med easyJet, ett lågprisflygbolag i Storbritannien, för att få vätgasdrivna flygplan på marknaden senast 2035. Men väte har också sina problem.

CFM International, joint venture mellan GE i USA och Safran i Frankrike, samarbetar med Airbus om sitt ZEROe-initiativ för att utveckla två typer av vätgasmotorer och utvärdera fyra kandidatflygplan, som skulle bränna väte och / eller generera el med bränsleceller. Andra organisationer bedriver också forskning om möjliggörande teknik, inklusive allt från provriggar till brännkammare, bränsleinsprutare, kryogena pumpar, bränsletransportfrågor på flygplan och bränslelagring.

För närvarande är väteflygplansforskningen spridd över flera olika inhemska och panregionala insatser. Bland dem är Europeiska unionens 27-nationers 654 miljoner euro Clean Aviation-program, som inkluderar det tyska flyg- och rymdcentrets Ultra Performance Wing-projekt, där forskare utvecklar en effektiv flygplansvinge för väteflygplan och en annan design för SAF-



flygplan.

Men man kan inte förvänta sig att tillräckligt många av dem flyger i tid för att ge ett stort bidrag till nettonollmålet. Så varför tar det så lång tid att utveckla dessa nya flygplan?

För det första har vi de tekniska utmaningarna med att utveckla motorn och flygplanet och att ha kryogena tankar på ett flygplan och sedan hantera kryogent bränsle hela vägen tills det kommer till motorn och sedan bränna det. Forskningen måste utvidgas till att omfatta lätta, hållbara kryogena bränsletankar, ventilsystemen för vätgasen och styrsystemen.

Den andra utmaningen är bristen på grön vätgasinfrastruktur, produktionen av väte genom elektrolys av vatten med endast förnybar el. Över 95% av den vätgas som produceras idag kommer från fossila bränslen, så industrin har en enorm utmaning att utveckla en grön vätgasproduktionsindustri.

Ett kilo väte producerar tre gånger energin hos ett kilo fotogen, men nackdelen är att ett kilo flytande väte tar upp fyra gånger volymen av ett kilo fotogen. Det har stora konsekvenser för var man placerar bränsletankarna och passagerarna. Den extra volymen kräver extra stora tankar som måste vakuumsoleras för att hålla det flytande vätet vid kryogena temperaturer på minus 235 C och de måste flytta från vingarna till flygkroppen. Då blir antalet passagerare väldigt litet. Nya flygkroppar måste utformas för att rymma dessa vakuumsolerade kryogena tankar, och det måste göras utan att kraftigt påverka sätesantalet.

Därför utvärderar Airbus i sitt ZEROe-projekt fyra koncept för att avgöra vilka som är möjliga att få ut på marknaden senast 2035. Två har ganska konventionella cylindriska flygkroppar, en för två väteförbrännande turbofläktar och en för två väteförbrännande turboprop. På båda slutar flygplanets trycksatta volym nära vingarnas bakkant, och de kryogena flytande väteankarna placeras i området bakom det bakre trycksottet.

## Miljöproblem

Vätet måste hållas under minus 253 grader Celsius över alla flyghöjder och atmosfäriska temperaturer. Den valda isoleringen måste också bibehålla vätet som en vätska under en betydande tidsperiod på marken, liksom under flygningen, så att flygbolagen kan använda flygplanet på ett liknande sätt som idag.

I den tredje kandidaten, en blandad ving kropp, placerar Airbus turbofläktarna i ett hölje ovanpå vingen, och de kryogena bränsletankarna sitter under vingen, dolda inuti den aerodynamiska kompositstrukturen.

Det har länge varit känt att luftfartens totala bidrag till den globala uppvärmningen är mycket större än enbart dess koldioxidutsläpp. Det råder allmän enighet om att den totala effekten kan bli nästan tre gånger så stor. Även om det är obestridligt att det fortfarande finns en betydande grad av osäkerhet i den exakta storleken på dessa effekter, är den samstämmiga uppfattningen att de alltid ger ett betydande bidrag till den globala uppvärmningen.

Här är det inte säkert att väte är så mycket bättre än fotogen. Kväveoxider, eller NOx, skapas när kväve och syre från luften reagerar när vätet brinner. Blandningen av kväveoxid och kvävedioxid i avgaserna, gemensamt känd som NOx, är betydande. Dessa föreningar är inte växthusgaser. I atmosfären på hög höjd initierar de komplexa kemiska reaktioner, som påverkar koncentrationerna växthusgaserna ozon och metan. Ozonnivåerna ökar och därmed uppvärmningen, medan metanet och dess uppvärmning minskar. Resultatet är ändå en nettoökning av uppvärmningen. Klimat effekterna av NOx troddes tidigare vara ungefär hälften av luftfartens CO<sub>2</sub>. Det senaste arbetet tyder dock på att de faktiskt kan vara större än CO<sub>2</sub>.

Det finns två källor till NOx. Den första, snabba NOx, är relaterad till mängden kväve i bränslet. Den andra, termisk NOx, är kopplad till högtemperaturprocesserna i motorn. Fotogen innehåller mycket lite kväve och därför är snabb NOx inte ett särskilt stort problem idag. Men ammoniak (NH<sub>3</sub>) lanseras för närvarande som ett möjligt, icke-kolhaltigt, flygbränsle, så det är klart att snabb NOx kan bli ett problem.

Termisk NOx är det direkta resultatet av uppvärmning av luft till mycket höga temperaturer i förbränningskammaren. Detta gör att vissa syre- och kanske också kvävemolekyler dissocieras. När dessa dissocierade gaser passerar genom turbinstegen svalnar de och rekombinationen börjar. Men inte alla atomer återgår till sina ursprungliga molekylära kväve- och syretillstånd utan vissa kombineras för att bilda kväveoxiderna.

Det är uppenbart att NOx-generering är relaterad till bränsleförbränning och följaktligen skulle utsläppen minska om denna minskades. Utvecklingen av allt mer värmeeffektiva motorer har dock inneburit ökade förbränningstemperaturer och därmed mer termisk NOx. Oavsett vilket bränsle som används kommer NOx därför sannolikt att vara problematiskt. Även om ytterligare CO<sub>2</sub>-utsläpp skulle elimineras helt och hållet med väte kan luftfarten fortfarande ge ett betydande bidrag till den globala uppvärmningen genom sina NOx-utsläpp.

Och även väteförbränning producerar vattenånga och kondensstrimmor. Liksom fotogenmotorer gör idag skulle väteturbiner



producera vattenånga som ett resultat av väteförbränningens kemi i luft. Två vätemolekyler kombineras med en syremolekyl för att skapa en hel del värme plus två vattenmolekyler. När varm, fuktig luft från motorns avgaser kommer i kontakt med den kalla luften på höjd kan iskristaller bilda reflekterande kondensspår eller kondensstrimmor. Dessa kan i sin tur bilda cirrusmoln som fångar värme i atmosfären.

Motoravgaserna är heta och på grund av vattenbildning under fotogenförbränning fuktiga. De innehåller också sot. Om atmosfärstemperaturen är under minus 40 ° C kondenserar avgasvattenånga på sotpartiklarna eller på damm i den omgivande luften och dropparna fryser för att bilda iskristaller. Dessa kristaller reflekterar solljus och en synlig strimma bildas. Om den omgivande luften är torr kommer endast vattenånga från motorn att förvandlas till iskristaller och dessa kommer snabbt att försvinna när isen sublimerar tillbaka till vattenånga. Den resulterande strimman kommer att vara kort och släpa bara några kilometer bakom flygplanet. Om flygplanet råkar flyga genom ett luftområde som är tillfälligt övermättat med avseende på is, kommer motsatsen att utvecklas genom kondensering av inte bara avgasvattenången utan även vattenånga från den omgivande luften.

I detta speciella fall bildas en "ihållande" strimma, med de karakteristiska mycket långa, dubbla parallella vita linjerna orsakade av att iskristallerna fångas i flygplanets efterföljande virvelsystem. Ihållande kondensstrimmor kan vara hundratals kilometer långa, med en genomsnittlig livslängd på flera timmar. När de åldras kan de utvecklas till moln.

Regioner av isövermättad luft är vanliga på de norra breddgraderna, där det mesta av världens luftfart äger rum.

Det är inte förvånande att strimmorna kan störa jordens strålningsenergi balans och de gör det på två olika sätt. För det första, under dagen, reflekterar iskristallerna en del av den inkommande solstrålningen tillbaka till rymden. Detta har en kylande effekt och strålningsdrivningen är negativ. För det andra absorberar och fångar samma iskristaller en del av den utgående termiska energin. Denna effekt, som i allmänhet är starkast på natten, ger en nettouppvärmningseffekt, det vill säga en nettopositiv strålningskraft. Detta är en mycket förenklad beskrivning av en extremt komplex process som har varit föremål för intensiv studie i minst 30 år.

## Miljöproblem

Endast ungefär en av 20 fotogendrivna flygningar producerar ihållande strimmor. CO<sub>2</sub> som produceras av flygningen finns i atmosfären i hundratals år, men strimmorna bara en bråkdel av en dag. Men under de få timmarna kan klimatpåverkan vara ungefär densamma som från CO<sub>2</sub>. Atmosfärforskare har starka bevis för att klimatpåverkan av kondensstrimmor från fotogendrivna plan kan vara lika mycket som den som orsakas av CO<sub>2</sub> som de släpper ut. Med andra ord kan ytterligare 2,5% av den globala uppvärmningen bero på kondensstrimmor.

För att ta reda på hur utsläppen från en vätgasmotor skiljer sig från fotogen planerar DLR, German Aerospace Center, tillsammans med Airbus, att genomföra en serie experiment under flygning där två jetdrivna Arcus segelflygplan, som visas här, en som drivs av fotogen, den andra av väte, följs av ett DLR-plan fullmatat med atmosfäriska sensorer. De data som fås bör avslöja storleken, fördelningen och densiteten hos vattenånga, NO<sub>x</sub>-nivåer och partiklar, vilket gör det möjligt för forskare att göra jämförelser mellan fotogen och vätestrimmor vid olika höjder.

Kan det vara möjligt att känna igen kombinationen av atmosfäriska och motoravgasförhållanden som är nödvändiga för att producera kondensstrimmor och cirrusmoln? Om svaret är ja kan piloter uppmanas att ändra höjd eller motorinställningar och effektivt stänga av den klimatskadliga kondensstrimman. Om det fungerar som förväntat kan kondensstrimmor från fotogenflygningar också stängas av, så även de flygbolag som för närvarande köper flygplan i rekordantal idag kommer omedelbart att kunna minska sin klimatpåverkan.

Om resultaten av segelflygproven är ogynnsamma är det oklart vad som kan göras. Vattenångavgaserna kan inte kondenseras eller på annat sätt hanteras eftersom det är en del av dragkraften som driver planet framåt. Om väteflyg skulle producera en hel del kondensbaserad klimatuppvärmning - kanske till och med mer än fotogen - skulle poängen med att byta till väte gå förlorad.

Elproducerande bränsleceller är ett annat alternativ för koldioxidfria flygresor, men förmodligen för mindre flygplan. De avger vatten som avgaser, men de förväntas inte generera kondensstrimmor lika lätt som väteförbränningsmotorer, om alls. Deras avgaser är svalare vid 100 till 180 grader Celsius jämfört med 1 800 grader för jetmotorn, och vattnet koncentreras till större droppar.

Genom att förgasa en del av det flytande vätet kan bränsleceller generera elektricitet för att komplettera förbränningen av flytande väte samt tillhandahålla varje flygplans "icke-framdrivande" elektriska energibehov - till exempel driva underrede, kontrolltor, kabinsystem och avionik.

Med den fjärde ZEROe-kandidaten studerar Airbus en ännu större roll för bränsleceller, att tillhandahålla all kraft och framdrivning. Flera "pods" var och en innehållande vätebränsleceller, en flytande vätetank och en elmotor skulle ställas upp längs flygplanets vingar och frigöra värdefullt utrymme i flygkroppen. Det totala antalet poddar är ännu inte bestämt, men fyra (två på varje vinge) och sex (tre på varje vinge) är bland de konfigurationer som Airbus överväger. Fördelen med denna design skulle vara att poddarna kan bytas ut efter behov, vilket gör det enkelt att tanka och underhålla, och att designen enkelt kan skräddar-



sys för olika flygområden genom att ändra antalet poddar.

De flesta företag som utvärderar bränsleceller, som drivs av komprimerad vätgas lagrad i icke-kryogena tankar, riktar sig till regionala kortdistansflygningar. Och provflygningar pågår. ZeroAvia i Storbritannien har flugit en 19-sitsig Dornier-228 twin prop ett antal gånger, liksom Kalifornien-baserade Universal Hydrogen med en 40-sitig De Havilland Canada Dash 8-300.

Vätebränsleceller innehåller platina, en sällsynt metall som främjar omvandlingen av avgaser till mindre skadliga gaser i katalysatorerna i bilar, men 99% av platinan i använda bränsleceller och katalysatorer kan återvinnas. Dessutom kommer bilar så småningom att ersättas av elfordon, så efterfrågan på platina kommer inte att öka avsevärt när efterfrågan växer på bränsleceller.

Då är problemen större med rent elflyg och dess batterier. De släpper inte ut någon CO<sub>2</sub> och ger inga kondensstrimmor, men en öppen fråga är om flygindustrin kan påverka var nickel, kobolt och andra metaller till batterierna kommer ifrån. Leveranskedjan kommer sannolikt att förbli inrättad för att tillgodose fordonssektorns krav. Sjuttio procent av världens kobolt utvinns från gruvor i Demokratiska republiken Kongo, där barnarbete och arbetarnas säkerhet är problem. När det gäller nickel hävdar kritiker att Indonesien, världens största producent, bearbetar metallen med kolintensiv, kolproducerad el, medan dess gruvmetoder förorenar vatten, förstör skogar och stör ursprungsbefolkningen.

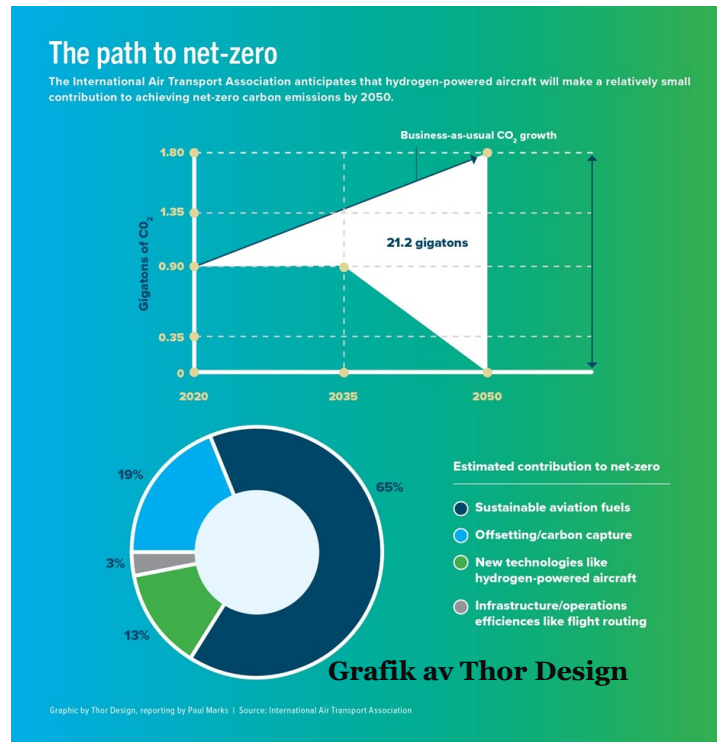
Ett alternativ kan vara gruvor på havsbotten, men forskare studerar också om de gruvfria zonerna på havsbotten, som redan har avsatts av Internationella havsbottenmyndigheten, kommer att vara tillräckliga för att upprätthålla den biologiska mångfalden hos djur- och mikroorganismer som lever där.

En experimentell klass av batterier som i stort sett inte använder några andra metaller än litium kan göra frågan om var man kan få metaller lättare att lösa. Även om forskare fortfarande är i de tidiga stadierna av att utveckla dem, är litium-luftbatterier en kandidat för att driva flygplan om ett decennium eller så eftersom var och en kan producera fem gånger kraften per kilo av ett Tesla-batteri. En lovande litium-luftdesign utvecklad av Illinois Institute of Technology har bara litium i sin anod och en katod som innehåller molybden, som bryts i flera länder, inklusive USA och Kina, eller skapas som en biprodukt av kopparbrytning. Men forskarna tror att de kan göra katoden av kol- och kvävebaserade material, tillsammans med en elektrolyt fri från metaller.

## Miljöproblem

Litiumbrytning kommer med sina egna utmaningar. I en metod extraheras litiumsalter från pooler av saltvatten, vilket kan förorena färskvatten. I en annan grävs litium upp, men det genererar massor av koldioxidutsläpp. Dessutom kontrollerar Kina

enligt uppgift en växande andel av litiumgruvorna runt om i världen. Institute for Energy Research, en konservativ tankesmedja i Washington, DC, förutspår att Kina år 2025 kommer att kontrollera 32% av litiumgruvorna jämfört med 24% år 2022.



Vad är då den troliga blandningen av flygplan som kommer att dominera i framtiden? IATA tror att hållbara bränslen SAF och i viss mån väte kommer att vara dominerande 205. Mission Possible Project, ett konsortium av företag som förespråkar avkolning, förväntar sig att hållbara flygbränslen tillverkade av förnybara kolkällor kommer att dominera flygmarknaden år 2050, mätt i procent av energibehovet. Specifikt beräknas batteridrivna flygplan utgöra 2% av efterfrågan, följt av vätgasdrivna flygplan på någonstans mellan 13% och 32% och SAF-drivna flygplan på cirka två tredjedelar. Enligt denna uppfattning kommer batteriframdrivning att begränsas till mindre flygplan, medan SAF kan släppas in i dagens fotogendrivna plan och befintliga försörjningskedjor med liten eller ingen hårdvarumodifiering. Vätgasdrivna flygplan kommer att behöva nya flygplanskonstruktioner, ny framdrivning och nya bränsleleverans- och

lagringsinställningar.

Den nuvarande strategin för att minska luftfartens miljöpåverkan är begränsad till utvecklingen av en ny generation bränsleeffektiva flygplan och eliminering av ytterligare koldioxidutsläpp genom införande av "hållbara bränslen", plus vissa mindre förbättringar av mark- och luftburen verksamhet och vissa effektivitetsförbättringar av flygledningstjänsten.

Eftersom dessa flygplan inte finns i dag, även om alla tekniska problem och driftsproblem skulle övervinnas, finns det inte tillräckligt med tid fram till 2050 för att de ska kunna påverka CO<sub>2</sub>-målet i någon större utsträckning. Om flygindustrin ska få nettooll flygplan att flyga tidigare än 2050 behövs det en fokuserad forsknings- och utvecklingsinsats som liknar J. Robert Oppenheims Manhattan-projekt.