

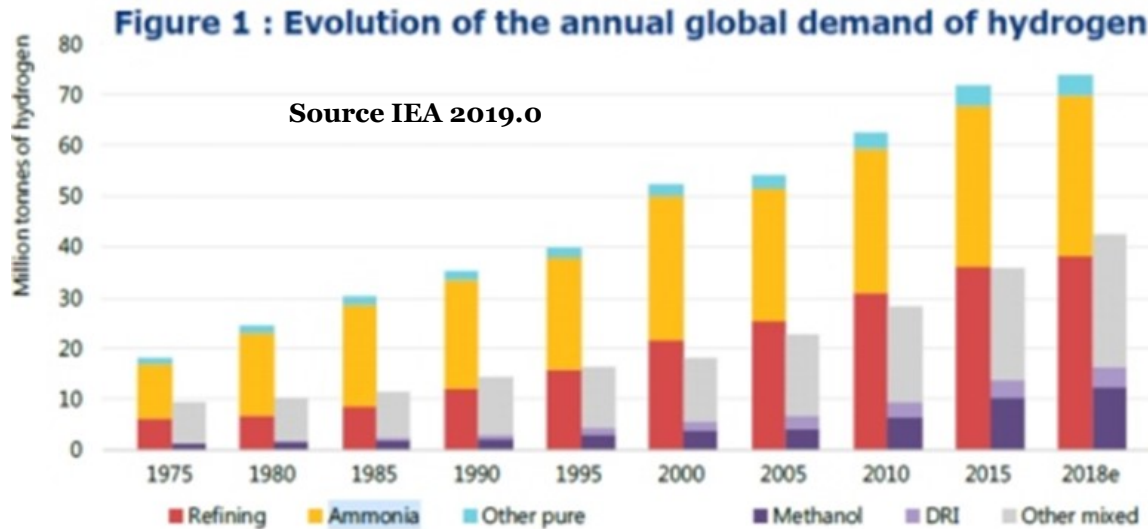
Väte-hur nära är det?

Väte betraktas alltmer som en av de mest lovande nollutsläppsteknologierna för framtida flygplan. Trots det faktum att väte har en energitäthet per enhet som är tre gånger högre än traditionellt flygbränsle, måste man emellertid ta itu med en rad utmaningar innan en omfattande användning kan ske.

Lettre de l'AAE – N°120 – Jan.-Mar. 2021 : [Link to pdf document](#)

[Hydrogen in aviation: how close is it? - Innovation - Airbus](#)

[Aerospace America: The way to net-zero](#)



Rena elflygplan är inte en praktisk lösning just nu utom för korta distanser. Vätgas har däremot potential att revolutionera luftfarten. När det omvandlas av bränsleceller till kraft för elmotorer öppnar det vägen till praktiskt taget utsläppsfri flygning. Inte heller modifierade gasturbiner som drivs direkt av väte avger någon koldioxid. De kvarvarande kväveutsläppen från denna koldioxidfria väteförbränning kan reduceras till ett minimum med tekniska medel.

Väte är idag en industrigas, som används i raffineringsprocessen för avsvavling av bränslen och för att tillverka ammoniak, en komponent i kvävehaltiga gödselmedel och sprängämnen, samt metanol för den kemiska industrin. Men i framtiden kommer väte inte bara att användas för flyget. Det sägs vara morgondagens energi, den nya oljan, det ultimata vapnet mot klimatförändringarna.

Internationella energibyran (IEA) förutspår en snabb tillväxt av marknaden för väte. Vätgas kan användas för gödningsmedel och kemikalier, kanske för stål, flyg och sjöfart och kan hitta begränsade nischer inom landtransporter. Ståltillverkning är en av de största svårigheterna med industriell utfasning av fossila bränslen. De tillhörande koldioxidutsläppen, varav hälften beror på användningen av kol för att "reducera" järnmalmen, kommer snart att stå för 10 procent av de totala utsläppen. Ståltillverkare planerar att använda väte för att reducera malmen innan de smälter den i elektriska ugnar. För att fasa ut fossila bränslen i världens stålindustri måste vätgasproduktionen ungefär fördubblas.

Samma mängd skulle förmodligen behövas för att fasa ut fossila bränslen i handelsflottan, i form av ammoniak, vilket är lättare att kondensera, lagra, transportera och använda som bränsle i fartygsmotorer. Detsamma skulle återigen behövas för att fasa ut fossila bränslen i flygtrafiken på me-

dellång och lång sikt, i form av syntetisk fotogen, som kombinerar väte och återvunnet kol från atmosfären, i väntan på hypotetiska flytande väteflygplan och införande av komplex leveranslogistik.

Vätgas kan också lagra energi i saltlösning eller överföras från mycket soliga och / eller blåsiga områden till regioner med hög efterfrågan. Den skulle kunna transporteras dels i form av vätgas i rörledningar, dels i form av ammoniak i fartyg och rörledningar. I en global ekonomi som närmar sig noll nettoutsläpp kommer dessa behov att bli betydande.

Alla dessa vätgasintensiva tillämpningar ökar i dag, även om det är mindre omtalat än vätgasdrivna flygplan. Svenska ståltillverkare har färdigställt en pilotanläggning för CO₂-fri stålproduktion och andra förbereder sig för att följa efter. Fartygsmotortillverkare arbetar redan med att anpassa dem till ammoniak, och varv arbetar med att utforma ammoniakdrivna lastfartyg.

Japan överväger att importera enorma mängder ammoniak från Australien eller Mellanöstern för sina koleldade kraftverk för att minska koldioxidutsläppen. Detta kommer att kräva mängder av vätgas, mycket mer än förbrukningen av den bränslecellsfordonsflotta som förväntas i Japan. Totalt kommer det att behövas hundratals miljoner ton vätgas för den ekologiska omställningen av världsekonomin. Är detta möjligt, är det realistiskt?

Det finns flera sätt att producera vätgas utan utsläpp av växthusgaser. Den vanligaste är vattenelektrolys. Den elektriska strömmen separerar vattenmolekylen i väte och syre. Detta är inget nytt: elektrolys var kärnan i tillverkningen av ammoniak- och kvävegödselmedel under större delen av 1900-talet, särskilt i Norge, Kanada, Egypten, Peru och Zimbabwe, där vattenkraften var riklig.

Väte

Men kommer det att vara möjligt att producera tillräckligt med "grönt" elektrolytiskt väte med hjälp av förnybara energikällor - och framför allt tillräckligt snabbt? De förnybara energikällor vars potential är praktiskt taget obegränsad är vind- och solenergi, men deras största nackdel är att de är variabla och inte "kontrollerbara". Variationen i vind- och solproduktionen gör användningen av elektrolytiskt väte ovanligt komplicerad.

Vätgas kommer troligen inte att produceras med "överskott" av förnybar energi, el som annars går förlorad när produktionen överstiger efterfrågan. Sådana överskott är fortfarande sällsynta. Att bygga elektrolys på denna bräckliga bas skulle vara en högriskinvestering, och den vätgas som produceras på detta sätt skulle till stor del vara otillräcklig. Ytterligare förnybar kapacitet måste byggas om man inte på marginalen vill använda fossilkraftverk eller kärnenergi, åtminstone inledningsvis.

Eftersom el är svår att lagra måste produktionen alltid balansera efterfrågan, i sig variabel. Vattenkraft från dammar och kärnkraft, där dessa är möjliga, kan lindra problemet utan att lösa det, eftersom kärnkraft i synnerhet inte är idealisk för drift begränsad till när efterfrågan på el är hög eller vind- och solproduktion låg, eller båda samtidigt.

Elektrolys, som är ansluten till elnätet, kan fungera i tider av hög förnybar produktion. För tider av låg produktion eller mycket hög efterfrågan måste vätgasen kunna lagras, men dess lagring är också svår och kostsam. Om saltavlagringar finns under jord kan håligheter grävas i marken och fyllas med komprimerat väte, som i Texas och Storbritannien. I avsaknad av geologiska möjligheter är lagring ovan jord i reservoarer möjlig men dyr. Vätet måste komprimeras mycket, det tränger in i stål och gör det sprött. Reservoarer är inte tänkbara för långsiktig lagring utan endast för buffertlagring i ammoniak, metanol, syntetiska kolväten eller järnmetallanläggningar. Och även i de fallen kommer dessa anläggningar att överdimensioneras för att minska kostnaden för buffertlagring genom flexibel, variabel drift.

Kommer denna "gröna" vätgas att vara konkurrenskraftig? Det gäller här att jämföra grön vätgas med direkt produktion av väte från fossil energi genom ångreformerings av naturgas eller partiell oxidation av kol. Vätgas produceras idag av naturgas eller, i Kina, från kol, vilket resulterar i koldioxidutsläpp på 830 miljoner ton per år, ungefär lika mycket som luftfarten. Idag produceras mer än 70 miljoner ton väte varje år, vars primära utvinningskälla är naturgas (så kallat grått väte).

Ett kilo fossil vätgas kostar nu mellan 1 och 2 US\$ jämfört med 4 till 5 US\$ per kilo grönt väte. Kostnaderna för vind och särskilt solenergi fortsätter dock att sjunka och även elektrolyskostnaderna kommer att minska. De senaste tio åren har kostnaden för förnybar energi dividerats med tre när det gäller vind och tio när det gäller solenergi. Lite i taget blir förnybara energikällor konkurrenskraftiga. Det är redan billigare att bygga en ny solcellsanläggning i ett område med starkt solsken än att fortsätta elda kol i en befintlig anläggning. Mellan 2014 och 2019 fördubblades den globala produktionen av vindkraft medan den globala solenergiproduktionen fyrdubblades. Grön vätgas kommer snart att konkurrera åtminstone med de andra huvudformerna av "koldioxidsnålt" väte: "blått" och "turkost" väte.

2

Blå vätgas produceras av gas eller kol, med avskiljning och lagring av koldioxid. Turkost väte innebär pyrolysis av metan med utsläpp av väte och fast kol, det senare mycket uppskattat av däcktillverkare. Processen förbrukar lika mycket eller till och med lite mer gas än ångreformerings, men fem gånger mindre än elektrolys. Pilotanläggningar är under uppbyggnad i Tyskland och Australien, och de första kommersiella anläggningarna byggs i USA.



En stor del av grön vätgas kommer att produceras i områden med höga energiresurser och låg efterfrågan och sedan exporteras till områden med hög efterfrågan. I vissa fall, till exempel mellan Nordafrika och Europa, kommer det att exporteras som rent väte via rörledningar.

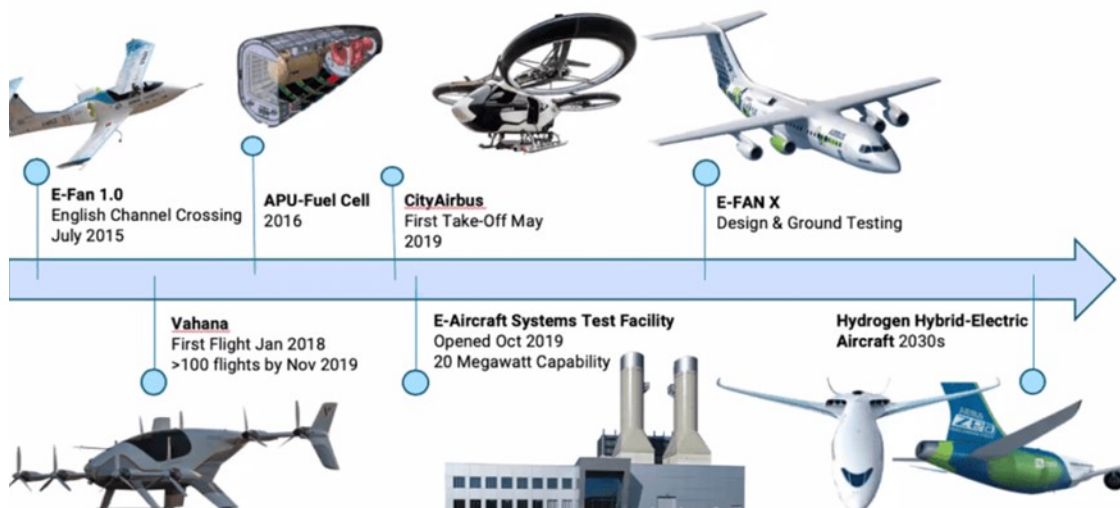
Oftare kommer väte att transporteras med fartyg eller användas lokalt för att producera ammoniak, metanol, syntetiska kolväten (särskilt fotogen) och till och med metalliskt järn. Förlusterna till följd av successiva omvandlingar kan komma att absorbera huvuddelen av den ekonomiska fördelen med fjärrproduktion.

För att möta behovet av rent grönt väte kommer produktionen därför att vara nära användaren. Utöver vissa "nischer" inom landtransporter som nämns ovan, i raffinering och vissa andra industrier, och framför allt järn- och stålindustrins växande behov, är det inom själva elsystemen som "lokal" produktion av vätgas så småningom kommer att äga rum.

Elektrifieringen av ekonomin - elfordon, värmepumpar, elektromagnetiska tekniker och till och med elektrolyser - bör paradoxalt nog förenkla hanteringen av variabilitet. Liksom elektriska varmvattenberedare som sprider förbrukning kommer dessa nya användningsområden att vara baserade på lagring, oavsett om de är nödvändiga (bilbatterier) eller billiga (värmelagring). Som reserv när behovet är högt kommer deras användning därför att öka andelen förnybara energikällor i elmixen och minska användningen av lagring och toppvärme.

För flygindustrin förväntas grönt väte spela en nyckelroll för att tillhandahålla bränsle till framtidens flygplan, men frågan är om det kommer att finnas tillräckligt för flygets behov. Idag går vägen till netto nollutsläpp för många andra industrier också genom grönt väte. Faktum är att denna typ av väte, när den produceras helt av förnybar energi, framstår som den mest lämpliga för en helt hållbar energiomställning för de flesta sektorer.

Airbus demonstrator roadmap progressing at pace



För närvarande representerar grönt väte mindre än 1% av den totala vätgas som produceras. Detta förväntas dock förändras. När regeringar runt om i världen siktar på mer ambitiösa klimatmål förväntas grönt väte, härrörande från speciellt elektrolys av vatten, spela en framträdande roll i framtidens energimix.

Tecknen pekar på en positiv trend just nu. Kostnaden för förnybar energi sjunker i en överträffad takt. Och investeringar i elektrolysatorer, den "rena" tekniken som används för att separera väteatomer i vatten, blomstrar runt om i världen. Som ett resultat kan produktion av kapacitet för grönt vätegas multipliceras med 50 under de närmaste sex åren, enligt vissa uppskattningar. Detta innebär att grönt väte kan vara på väg att leverera upp till 25% av världens energibehov fram till 2050.

Den gröna vätegasövergången från en nischaktör till en konkurrenskraftig och utbredd koldioxidsnål energigigant kommer att kräva betydande investeringar för att öka kapaciteten. Den internationella energibyråns (IEA) vätegasprojektdatabas har nästan 320 nya demonstrationsprojekt för grönt vätegasproduktion runt om i världen. Detta motsvarar totalt cirka 200 MW extra elektrolyskapacitet. Och nya projekt läggs till nästan varje vecka.

I Europa har mindre än 1 GW / år elektrolyskapacitet installerats med ytterligare 1,5-2,3 GW i planerade pro-

jekt. Europeiska kommissionen tillkännagav emellertid nyligen långsiktiga planer på att installera minst 40 GW elektrolyskapacitet eller upp till 10 miljoner megaton grön vätegas till 2030. Som en del av dessa planer kan större elektrolysatorer med upp till 100 MW kapacitet istället för den nuvarande 20 MW-kapaciteten förväntas byggas 2024 och installeras tillsammans med efterfrågan. Om det uppnås skulle detta förvandla Europa till världens största producent av grönt väte.

Och Europa är inte ensamt i sina ambitioner, andra länder visar att de inte ligger långt efter. Australien har en av världens största volymer av produktionskapacitet för grön vätegas, inklusive cirka 30 GW rörlighetsprojekt. I Asien kan regionens elektrolyskapacitet nå +10 GW under det kommande decenniet, driven av efterfrågan från Japan, Sydkorea och Kina. USA börjar också komma ikapp med planer på att utveckla gröna vätemegaprojekt i Kalifornien, Texas och Utah.

Den ökade tillgängligheten av grönt väte väntas bidra till att sänka dess kostnader med så mycket som 30% till 2030 och 50% till 2050. Airbus tror att sjunkande kostnader för förnybar energi och uppskalning av vätegasproduktion kan göra grönt väte konkurrenskraftigt med befintliga alternativ, såsom fossilt flygbränsle och bioproducerade hållbara flygbränslen SAF.

Airbus förväntar sig att grön vätegas ska driva deras framtida utsläppsfria flyg-

plan när de kommer ut på marknaden 2035. Boeing föredrar däremot att satsa på SAF. Man tror inte att det kommer att finnas tillräckligt med förnybar, kolfri energi för att skapa tillräckligt med väte och om man tillverkar väte genom att bränna kol lurar vi oss själva. Vätegasplan skulle faktiskt öka kolet i atmosfären förutsatt att flytande väte skulle produceras som idag med elektricitet som till 60% kommer från fossila bränslen.

Vem som satsar rätt återstår att se. Grönt väte är en viktig del av Airbus strategi för att leda avkolningen av flygindustrin. Men man tar en risk ty för att väte ska kunna nå sin potential i framtiden måste man utveckla nya drivlinetekniker som bränsleceller, elmotorer och kryotankar för flytande väte vid -253 °C. Det betyder att många saker måste förändras inuti den välbekanta cylindriska flygplanskroppen samtidigt som man fortfarande kommer att behöva uppfylla samma höga säkerhetskrav som idag.

Sist men inte minst är det frågan om hur man får fram vätet till flygplanen. Det första steget är att producera väte på lämpliga platser, så småningom i stora volymer. Det är dock lika viktigt att etablera logistikkedjan för att transportera vätet från produktionsplatsen till flygplanets bränsletankar. För detta ändamål måste tankteknik utvecklas för lastbilar, tåg och fartyg och rörligheter och tillfälliga väteförvaringsanläggningar måste byggas.

Ett kilo vätgas innehåller energin från 3,5 liter bensen och avger ingen koldioxid, men det har låg densitet. Det krävs fyra liter flytande väte vid $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, eller nästan åtta liter om det komprimeras, för att ersätta en liter bensen.

Den teknik, som utvecklats inom fordon- och rymdindustrin, måste göras kompatibel med kommersiella flygplansoperationer, särskilt genom att minska vikten och kostnaden. En specifik utmaning är hur man lagrar väte ombord på flygplanet. Idag är flytande vätelagring bland de mest lovande alternativen, medan lagring av vätgas som komprimerad gas innebär utmaningar med nuvarande vikt och volymkrav. Färglös och luktfri, i ett slutet utrymme exploderar den i låg koncentration.

Dessutom kommer flygindustrin att behöva uppnå samma eller bättre säkerhetsmål med väte än vad som redan har uppnåtts med befintliga bränslen. Det finns omfattande säkerhetsåtgärder vid utformningen och driften av dagens fotogendrivna flygplan. Detta strikta tillvägagångssätt har säkerställt branschens säkerhet genom åren. Framtida väteframdrivningssystem måste uppnå likvärdiga eller bättre säkerhetsnivåer.

En annan viktig utmaning för utbredd användning är kostnader för hanteringen på flygplatser. För att väte verkligen ska uppnå en omfattande användning inom flyg, måste det göras tillgängligt på flygplatser över hela världen och framsteg inom detta område är i sin linda. En huvudutmaning är att utveckla de storskaliga transport- och infrastrukturlösningar, som krävs för att förse flygplatserna med de nödvändiga mängderna vätgas.

En nyligen genomförd IEA-studie föreslår att en alternativ användning av befintlig infrastruktur, inklusive miljontals kilometer rörledningar, som används idag för transport av naturgas, kan vara en kostnadseffektiv lösning. Större mängder vätgas kunde då transporteras via rörledning från produktionsanläggningar, medan mindre kvantiteter kunde transporteras med lastbil.

Dessutom kan vissa flygplatser utveckla nödvändig infrastruktur för att stödja vätgasproduktion på plats, särskilt om



en förnybar energiförsörjning ligger i närheten. Airbus samarbetar för närvarande med både flygplatser och flygbolag för att säkerställa sådan vätgasinfrastruktur. Detta inkluderar forskning om hur all flygplatsassocierad marktransport (dvs. lastbilar, passagerarbussar etc.) skulle kunna avkolas under 2020-talet med hjälp av ett stegvis tillvägagångssätt, vilket förväntas bana väg för tillgång till vätgas för flygplan över 2030-talets tidsram.

För att främja användningen av vätgas på flygplatser och bygga ett europeiskt flygplatsnät för att ta emot framtida vätgasflygplan tillkännagav Airbus den 21 september ett partnerskap med det franska industrigas- och teknikföretaget Air Liquide och flygplatsoperatören Vinci Airports.

Den franska flygplatsen Lyon-Saint Exupery kommer att vara pilotplats för projektet och kommer att få en vätgasdistributionsstation 2023 för att leverera väte till flygplatsens markfordon. Mellan 2023 och 2030 kommer partnerskapet att arbeta med utbyggnaden av infrastrukturer för flytande vätgas som ska göra det möjligt att tillhandahålla vätgas i tankarna på framtida flygplan. År 2030 kommer de tre parterna att undersöka möjligheten att utrusta Vinci Airports europeiska nätverk av 25 flygplatser med de vätgasproduktions-, lagrings- och leveransanläggningar, som behövs för användning på marken och i flygplan.

Förutom att infrastrukturen måste komma på plats måste också flygplanen utveckla. Airbus planerar att satsa mer än en miljard euro fram till 2024 för att studera olika koncept och bygga en demonstrator, som kan leda till ett

vätgasdrivet passagerarplan för 100 till 200 personer. Om allt går bra kommer företaget sedan att spendera miljarder mer på konstruktion, certifiering och tillverkning av produktionsversionen så att flygbolagen kan börja flyga med dem 2035. I det mest optimistiska scenariot skulle de ursprungliga versionerna av dessa flygplan ha en maximal räckvidd på 3700 kilometer, tillräckligt bra för att komma från Chicago till Los Angeles eller Peking till Tokyo, men inte för att korsa Atlanten. Så för riktigt långa distanser kommer Airbus parallellt att stödja den fortsatta utbyggnaden av hållbara bioflygbränslen.

Det senaste konceptet visar ett plan utrustat med sex vätgaspoddar, tre på varje vinge, var och en med sin egen flytande vätgasbehållare, kylsystem, bränslecell för att generera el och motor för att driva rotorerna. Poddarna kan snabbt bytas ut för tankning eller underhåll. Det skulle innebära att bränslet inte skulle ta plats i flygkroppen. Designen kan varieras mellan fyra eller sex poddar för olika passagerarantal och flygavstånd.

Andra koncept inkluderar ett tvåmotorigt turbopropplan och en dubbelturbofläkt. Båda skulle bära sitt vätebränsle i flygkroppen istället för i vingarna så att man kan ha längre, smalare vingar med bättre förhållande mellan lyft och motstånd.

Naturligtvis skulle en nackdel vara mindre utrymme för passagerare, eftersom väte måste lagras i sfäriska eller cylindriska tankar för att hålla bränslet kallt, och detta skulle ta en tredjedel av utrymmet i flygkroppen.

Dessa koncept kräver också att dragkraft levereras av turbomotorer som är mindre och mer bränsleeffektiva än dagens fotogendrivna motorer. Motorerna skulle vara dimensionerade för kryssning istället för stigning. För stigning skulle de kompletteras med bränsleceller som skulle generera elektricitet för att öka dragkraften.

Det mest futuristiska av de fyra koncepten är en blandad vingkropp. Det kan vara den bästa designen för att maximera den volym som krävs för att transportera passagerare tillsammans med de sfäriska eller cylindriska väteankarna.

Utmaningarna är stora, men vätegasdrivna flygplan är inte nya. US Air Force flög med vätegasflygplan på 1950-talet och Sovjetunionen med vätegasdrivna trafikflygplan i slutet av 1980-talet. Sovjet flög faktiskt ett testplan för vätegasförbränning, Tupolev Tu-155, under flera år med början 1988.

Det största säkerhetsproblemet med väte är hur man inaktiverar bränsletankarna för att minska brandfarligheten. Dagens trafikflygplan gör det genom att ventilerar ångor från bränsletankarna och fylla luftutrymmet i tankarna med en inert gas som kväve. Man måste ta reda på hur man säkert ventilerar vätegas som kokas av från flytande väte.

Ett annat problem är att flytande väte är väldigt kallt - minus 253 grader Celsius. Därför skulle de bränslecellskomponenter som genererade elektricitet för framdrivning vara tunga och kräva mycket isolering, speciellt vid höga höjder. Airbus undersöker hur man kan kyla det elektriska systemet för att göra det supraledande, vilket skulle minska storleken och vikten på de elektriska komponenterna och mängden genererad värme.

Eftersom supraledning minskar det elektriska motståndet kan konstruktörer reducera ett 3000-volts system för elektrisk framdrivning till 500 volt, vilket halverar vikten på isolering, styrenheter, kablar, elmotorer och andra elektriska komponenter samtidigt som värmen de genererar minskar.

Ett högspänningssystem skulle kräva mer elektrisk isolering för att förhindra bågbildning på höga höjder, så med lägre spänningar och mindre isolering kan de elektriska komponenterna vara

The concept planes

Airbus wants us to be flying on hydrogen-powered airliners by 2035. What might the planes look like? Possibly like one of the below concepts from the company.

	PASSENGERS	PROPULSION	ENGINES	EXHAUST	RANGE
Blended-wing body	200	Hybrid turbofans driven by hydrogen combustion and electricity generated by fuel cells	2	Water vapor and trace gases to be determined by research	3,700 km
Pod	Undecided	Wholly fuel-cell powered; removeable pods each contain hydrogen fuel cells, a liquid hydrogen tank, cooling system and electric motor to turn a propeller	4 or 6	Water vapor	Undecided
Turbofan	200	Hybrid turbofans driven by hydrogen combustion and electricity generated by fuel cells	2	Water vapor and trace gases to be determined by research	3,700 km
Turboprop	100	Hybrid turbofans driven by hydrogen combustion and electricity generated by fuel cells	2	Water vapor and trace gases to be determined by research	1,850 km

SOURCE: Airbus

mindre. Med mindre värme från elektriska komponenter kan man ha mindre kylsystem, vilket också sparar vikt. Supraledning skulle också minska elektriska förluster med mer än hälften, så flygplanet skulle behöva mindre elkraft och dess vätegas skulle räcka längre.

En av de största utmaningarna vid väteförbränning är bränslesystemet. Det riktigt knepiga är att få bränslet in i brännkammaren. En vätska vid minus 253 grader Celsius måste ledas till en het motor och omvandlas till gas samtidigt som temperaturen och trycket regleras exakt under vägen.

Ett annat problem är att lagra flytande väte på flygplanet utan att det väger för mycket, eftersom bränsletankarna vanligtvis är dubbelväggiga och isolerade.

Airbus har fram till 2025 att ta beslut om att gå vidare. Beslutet beror inte bara på om man har en genomförbar design utan också om tillräcklig vätegasbränsleproduktion och distribution kommer att vara på plats till 2035. Vägen till vätegas inom luftfarten är fortfarande lång.

Man behöver också ändra allmänhetens uppfattning om väte. I över 40 år har väte använts i stora mängder som industriell kemikalie och som bränsle för utforskning av rymden. Faktum är att flera miljoner kubikmeter väte

transporteras och hanteras varje år. Men allmänhetens uppfattning om vätegasens säkerhet är fortfarande blandad. Endast 49,5% av respondenterna i en nyligen genomförd undersökning ansåg att vätegas är "allmänt säkert." Genom åren har denna uppfattning utan tvekan formats negativt av incidenter som Hindenburg-katastrofen 1937, då ett vätegasfyllt luftskepp fattade eld..

Vad som är intressant med undersökningen är dock att 73,2% av deltagarna svarade positivt på den andra frågan om "villighet att använda vätegasdrivna transportsätt." Eftersom väte i allt högre grad blir en grundpelare i utvecklingen av nya transportlösningar som bilar och bussar, kommer troligen allmänhetens uppfattning om väte att förändras, vilket bör ha en positiv inverkan på vätegas i flygplan.

Oavsett så kommer väte under de närmaste åren att vara den kanske viktigaste tekniken för att råda bot på flygets koldioxidutsläpp, tillsammans med ren eldrift och biobränslen.