

Framtidens flyg

ISSN 1653-0942  
978-91-86673-57-4  
Riksdagstryckeriet, Stockholm, 2014

# Framtidens flyg

Trafikutskottets arbetsgrupp för forskningsfrågor har låtit ta fram en studie om framtidens flyg, avgränsad till civilt flyg. Beslutet om studien fattades vid trafikutskottets möte 2013-09-14. Några aspekter som arbetsgruppen ville få belysta är forskning och utveckling kring flygbränsle, flygmotorer, flygplanskonstruktion, trafikledning (bl.a. trafikrutter och grön flygning) och utsläpp. En viktig utgångspunkt har varit flygets nuvarande och framtida påverkan på miljön och klimatet samt förutsättningarna för ett framtida hållbart flyg.

Att beskriva området ställer krav på fackkompetens, och utskottets arbetsgrupp menade därför att det fanns skäl att låta forskare vid universitet, högskolor eller institut sammanställa kunskap inom området. Mot den bakgrunden gavs fyra forskare och experter i uppdrag att ta fram faktaunderlag om kunskapsläget. Dessa är: Ulf Ringertz, Kungliga Tekniska Högskolan (flygplanskonstruktion), Tomas Grönstedt, Chalmers (motorer), Martin Hagström, Totalförsvarets forskningsinstitut FOI (bränslen) och Tomas Mårtensson, FOI (flygtrafikledning). Tomas Grönstedt fick dessutom i uppdrag att ha ett samordningsansvar.

Samtliga experter har ombetts belysa frågor om utsläpp och flygets påverkan på miljön och klimatet inom varje expertområde. I uppdraget har ingått att identifiera såväl tekniska lösningar som kan tänkas vara i bruk 2030 som mer långsiktiga och visionära innovationer och projekt.

Uppdragstagarna har arbetat självständigt utifrån direktiv från trafikutskottets arbetsgrupp och utvärderings- och forskningssekreterariatet. De svarar själva för sina underlag.

Arbetsgruppen för forskningsfrågor har gett Jonas Åkerman, forskare vid Kungliga Tekniska Högskolan med ett systemperspektiv på trafik- och miljöforskning, i uppdrag att kort kommentera faktaunderlagen.

Forskningssekreterare Anna Wagman Kåring har sammanställt rapporten och skrivit kapitel 1–4. I arbetet har också Linda Kennemyr, föredragande vid trafikutskottets kansli, forskningssekreterare Lars Eriksson och Hannah Saldert, praktikant, deltagit.

Rapporten inleds med ett kapitel om flygets utveckling och prognoser över det framtida flygandet. Kapitel 2 behandlar flygets miljöpåverkan och utsläppsrätter. Kapitel 3 diskuterar svensk och internationell flygteknisk forskning och utveckling, starka svenska forskningsområden samt den svenska flygtekniska forskningsagendan. Kapitel 4 sammanfattar de fyra externa experternas avsnitt och ger en samlad bild av rapportens resultat. Kapitel 5 består av Ulf Ringertz faktaunderlag om flygplanskonstruktioner, kapitel 6 är Tomas Grönstedts underlag om motorer, kapitel 7 Martin Hagströms underlag om bränslen och kapitel 8 Tomas Mårtenssons underlag om flygtrafikledning. Kapitel 9 är Jonas Åkermans kommentar.

Bilagan beskriver några olika aktörer inom flygsektorn.

Trafikuskottets forskningsgrupp, som i arbetet med denna rapport haft följande konstellation, överlämnar härmed rapporten.

Stockholm i april 2014

*Lotta Finstorp (M), ordförande*

*Suzanne Svensson (S)*

*Annika Lillemets (MP)*

*Lars Tysklind (FP)*

*Anders Åkesson (C)*

*Tony Wiklander (SD)*

*Bengt Berg (V)*

*Annelie Enochson (KD)*



# Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	5
Sammanfattning .....	6
1. Flygets utveckling .....	8
Flygets sekel.....	8
Flygmarknaden – från statligt intresse till hård konkurrens .....	9
100 svenska flygår.....	10
2. Flygets utsläpp och miljöpåverkan.....	13
Vad släpper flyget ut? .....	13
Utsläppsmål.....	14
Handel med utsläppsrätter .....	14
Biobränslen .....	16
3. Forskning och utveckling inom flyget.....	18
Teknikutveckling inom det internationella flyget .....	18
EU-satsningar på flygutveckling .....	19
Svensk forskning och utveckling .....	21
En inhemsk flygindustri .....	21
Akademi och industri i samarbete .....	22
Starka forskningsområden.....	23
En forskningsagenda för flyget .....	24
4. Expertunderlagen om framtidens flyg.....	26
Drivkrafter för utveckling .....	26
Utvecklingslinjer.....	27
Flygplanskonstruktioner .....	27
Motorer.....	29
Bränslen .....	30
Flygtrafikledning.....	33
Möjligheter och hinder för ett hållbart framtida flyg.....	34
5. Ulf Ringertz: Flygplanskonstruktioner.....	38
6. Tomas Grönstedt: Flygmotorer .....	66
7. Martin Hagström: Bränslen.....	92
8. Tomas Mårtensson: Flygtrafikledning .....	108
9. Jonas Åkerman: Kommentarer.....	143
 <i>Bilaga</i>	
Några aktörer inom flyget .....	146

## Sammanfattning

De fyra experter som har ombetts lämna underlag till rapporten är ense om att det finns tekniska och operativa lösningar för ett framtida hållbart flyg. De visar att det pågår effektiviseringar såväl inom ramen för etablerade tekniker och metoder som med hjälp av mer radikala lösningar. Rapporten visar att tekniska och flygoperativa åtgärder kan komplettera varandra. Implementeringen av mer innovativa och omvälvande lösningar pågår parallellt med utvecklingen av den befintliga tekniken. Införandet av ny teknik går olika fort inom olika områden.

Det finns i rapporten flera exempel på tekniska lösningar och flygoperativa åtgärder som troligtvis kommer att vara införda 2030. Det finns också exempel på mer omvälvande förändringar inom teknik och flygledning som skulle kunna leda till ökad effektivitet men som inte tros vara i drift före 2050.

Hindren för införande av ny teknik är stora. Ett är att utveckling av ny flygteknik tar tid. Höga säkerhetskrav gör att ny teknik prövas under lång tid innan den kan certifieras. Flygplan, motorer och bränsle har utvecklats tillsammans och är beroende av varandra. Flygmarknaden är till sin natur en global marknad, och alla flygplan ska kunna tanka och landa i princip överallt, vilket skapar långa omställningstider. Stora investeringskostnader och hård konkurrens leder till en försiktighet hos aktörer som investerar i ny flygteknik. Utvecklingen av biobränslen bör inte leda till konkurrens med matproduktion eller koldioxidutsläpp under själva tillverkningsprocessen. Många parter och länder ska komma överens när ny teknik och ny flygledning ska introduceras.

De praktiska och ekonomiska hindren är alltså omfattande och anledningen till att många tror på förbättringar inom ramen för etablerad teknik snarare än en mer språngartad utveckling. Det utesluter inte att mer radikal teknik införs inom vissa teknikområden.

Något som skulle kunna förändra utvecklingen är priset på drivmedel – höjda drivmedelskostnader kan leda till att mer radikal teknik snabbare tas i bruk. Bränslepriset har historiskt haft stor pådrivande effekt på flygteknikutvecklingen, eftersom det är en betydande och svåröversäglig utgift för flyget.

I rapporten framförs att det är mer kostnads- och energieffektivt att använda förnybara drivmedel inom andra transportslag än luftfart, då det ställs särskilt höga krav på jetbränsle. Även om det finns godkända förnybara flygbränslen är både kostnaden och energiåtgången fortfarande högre än för andra användningsområden för samma bränsle.

Införandet av såväl ny teknik som flygoperationella åtgärder leder ofta till olika avvägningar. Inte sällan ställs miljömässiga mål mot flygets kapacitet. Likaså ställs olika miljöeffektiviseringar mot varandra.

Experterna menar att det finns bättre möjligheter att åstadkomma mer omfattande miljöförbättringar genom teknisk utveckling av flygplan och motorer

än med hjälp av flygoperativa åtgärder. Det innebär dock inte att man ska avstå från att genomföra effektiviseringar inom det flygoperativa området.

I rapporten framförs att internationellt samarbete och långsiktighet är den bästa grunden för ett hållbart framtida flyg. Snabba förändringar bedöms däremot vara ovälkomna i en sektor som redan karakteriseras av stor osäkerhet. Nationella regler bedöms inte ha någon mer betydande inverkan på det globala flyget.

Jonas Åkerman drar i sin kommentar slutsatsen att utsläppen från flyget kommer att öka om inte flygets årliga tillväxttakt blir lägre än vad de flesta prognoser pekar på. Det är tveksamt om en sådan utsläppsökning är möjlig att förena med uppnåendet av EU:s och Sveriges långsiktiga utsläppsmål.

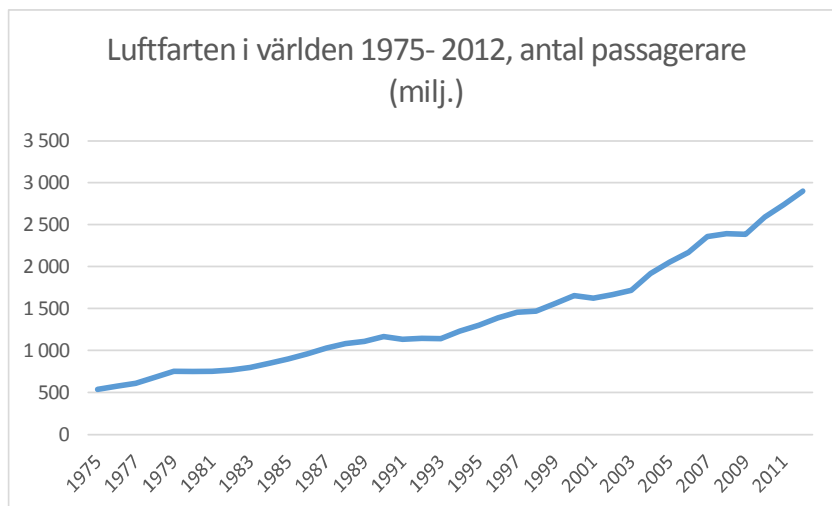
Kapitel 4 sammanfattar de fyra externa experternas respektive avsnitt och ger en samlad bild av rapportens resultat.

# 1. Flygets utveckling

## Flygets sekel

Passagerarflygningar påbörjades under 1910-talet. Den civila luftfarten slog igenom efter andra världskriget, och antalet resenärer har därefter ökat stadigt. År 1975 var antalet flygpassagerare ca 500 miljoner. Motsvarande siffra 2011 var 2,7 miljarder (se figur).

**Figur 1**



Källa: Trafikanalys: Luftfart 2012, Statistik 2013:6, tabell 7.1 samt ICAO. Utvecklingen visar linjefartens utveckling, exklusive stater som inte är anslutna till ICAO.

Internationella prognoser pekar på en fortsatt ökning av flygandet. FN:s flygorgan ICAO väntar sig att antalet passagerare i linjetrafik kommer att växa från 2,7 till 6 miljarder mellan 2011 och 2030. Antalet fligheter tros öka från 30 till 60 miljoner.<sup>1</sup> Flygbolagens internationella organisation IATA tror på en ökning med 31 procent mellan 2012 och 2017.<sup>2</sup> Även flygplanstillverkarna förutspår mer flygtrafik: Boeing pekar på en tillväxt för passagerartrafiken med 5 procent per år fram till 2030.<sup>3</sup> Airbus tror på en fördubbling mellan 2012 och 2027.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ICAO: *Global Air Transport Outlook to 2030 and trends to 2040*, 2013.

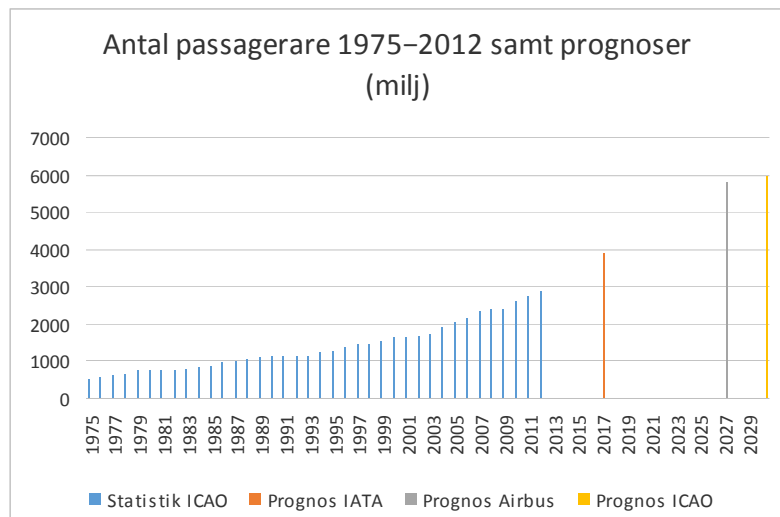
<sup>2</sup> IATA: [www.iata.org/pressroom/pr/pages/2013-12-10-01.aspx](http://www.iata.org/pressroom/pr/pages/2013-12-10-01.aspx).

<sup>3</sup> Boeing: [www.boeing.com/boeing/commercial/cmo/](http://www.boeing.com/boeing/commercial/cmo/).

<sup>4</sup> Airbus:

[www.airbus.com/company/market/forecast/?eID=dam\\_frontend\\_push&docID=33621](http://www.airbus.com/company/market/forecast/?eID=dam_frontend_push&docID=33621).

Figur 2



Källor: IATA: [www.iata.org/pressroom/pr/pages/2013-12-10-01.aspx](http://www.iata.org/pressroom/pr/pages/2013-12-10-01.aspx), Boeing: [www.boeing.com/boeing/commercial/cmo/](http://www.boeing.com/boeing/commercial/cmo/) och Airbus: [www.airbus.com/company/market/forecast/?eID=dam\\_frontend\\_push&docID=33621](http://www.airbus.com/company/market/forecast/?eID=dam_frontend_push&docID=33621).

Luftrummet räcker till för att rymma ett ökat flygande. Det är visserligen trångt i luftrummet över Europa, USA och delar av Asien, men mycket av tillväxten kommer att ske i dagens utvecklingsländer. Däremot kommer kapaciteten på och kring flygplatser som redan i dag är hårt belastade inte att rätta till om prognoserna blir verklighet.

## Flygmarknaden – från statligt intresse till hård konkurrens

I samband med första världskriget blev flyget ett statligt intresseområde i många länder, inte minst som ett militärt och säkerhetspolitiskt verktyg. Ett exempel är Lufthansa, som var helt statligt kontrollerat och som under 1920- och 1930-talen gjorde Tyskland till världsledande inom flygplans-tillverkning.<sup>5</sup>

Avregleringar av flygmarknaden inleddes i USA i slutet av 1970-talet. Det blev startskottet för stora förändringar av flygmarknaden i hela världen. Avregleringarna i kombination med uppkomsten av ett flertal lågprisbolag satte de stora bolagen under press. Konkurrensen på flygmarknaden hårdnade, och passagerarna blev mer prismedvetna. För att behålla sin konkurrenskraft gent-

<sup>5</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 9–14.

emot lågkostnadsbolagen har de traditionella bolagen blivit tvungna att minska sina kostnader genom omstruktureringar och effektivitetsökningar.<sup>6</sup>

Internet har inneburit nya möjligheter för flyget – numera kan man enkelt köpa biljetter till hela världen via sin dator. Betalningen sker via nätet, och fysiska biljetter blir alltmer ovanliga. Det är en av förklaringarna till att flygbolagens kostnader för försäljning har minskat kraftigt.<sup>7</sup>

Utmaningarna för flygbolagen har fortsatt under 2000-talet. Terrorattacken den 11 september 2001, svininfluensan 2009, lågkonjunkturen 2008/2009 och vulkanutbrottet på Island 2010 är exempel på några faktorer som har förändrat villkoren för flygmarknaden på sätt som varit svåra att förutse.<sup>8</sup> Det senaste decenniet har präglats av marknadsanpassningar och fusioner.

De största bolagen (sett till antal passagerare 2012) är amerikanska: United Airlines, Delta Airlines, American Airlines och Southwest Airlines. På tio-i-topplistan finns tre europeiska bolag: Lufthansa, Ryanair och Air France.

För att kunna erbjuda resor till många olika destinationer och för att kunna hävda sig i den hårda konkurrensen har flygbolagen bildat olika allianser. I dag är det tre allianser som dominerar den internationella marknaden: One World, Sky Team och Star Alliance.

## 100 svenska flygår<sup>9</sup>

De första svenska flygbolagen bildades 1919. Redan samma år startades den första reguljära utrikeslinjen, mellan Malmö och Köpenhamn. År 1924 grundades flygbolaget ABA (Aktiebolaget Aerotransport), som under 1930-talet kom att tas över av staten och slutligen under 1940-talet blev helt statligt ägt. År 1943 grundades Svensk Interkontinental Lufttrafik AB (Sila) av Marcus Wallenberg.

När andra världskriget var slut bildades SAS av ABA, Sila samt ett norskt och ett danskt flygbolag. Parallellt fanns flera andra mindre flygbolag som ofta ägdes av dagstidningar, främst avsedda för distribution. År 1957 bildade SAS och flera av de stora dagstidningarna samt TT och Pressbyrån ett gemensamt inrikesflygbolag, Linjeflyg. SAS och Linjeflyg delade upp inrikeslinjerna mellan sig.

Statens dominans inom trafikflyget var stor under efterkrigstiden. SAS och Linjeflyg gavs en särställning, och det var svårt för andra bolag att bedriva passagerartrafik i Sverige utan att samarbeta med SAS och Linjeflyg.

Under 1950- och 1960-talen påbörjades chartertrafik från Sverige. Ett av de första svenska charterbolagen var Transair som startade som leverantör av dagstidningar men snart började sälja resor till södra Europa.

<sup>6</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:1*, s. 22.

<sup>7</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:1*, s. 19–22.

<sup>8</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 19.

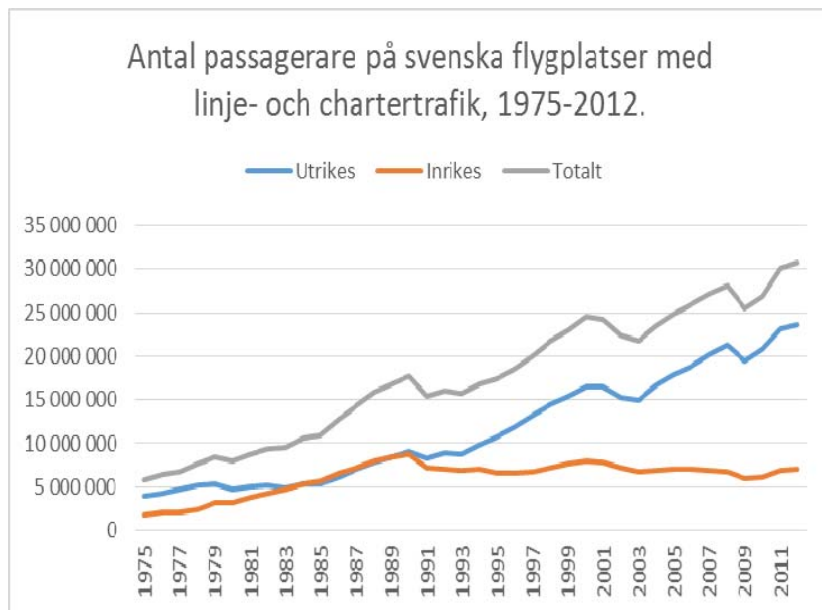
<sup>9</sup> Avsnittet bygger framför allt på Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 23–32.

Under 1980-talet fick det svenska inrikesflyget sitt stora genombrott. Linjeflyg satsade på fler kategorier av resenärer, och priserna sänktes. Flyget tog för första gången upp kampen med andra transportmedel om att vara ett möjligt alternativ för den breda allmänheten. Under 1990-talet minskade dock antalet inrikespassagerare. Orsaken var bland annat den ekonomiska krisen, moms på resor och ökad konkurrens från tåget.

År 1992 beslutade regeringen om en total avreglering av inrikesmarknaden. Efter avregleringen har inrikesmarknaden präglats av snabba förändringar. Bland annat har ett flertal lågkostnadsbolag etablerat sig.

Sedan mitten av 1990-talet har också flygplatssystemet förändrats. Den svagare tillväxten för inrikesflyget har gjort att flera flygplatser har fått läggas ned. Sedan början av 2000-talet har också flera tidigare statliga flygplatser kommunaliserats.<sup>10</sup>

**Figur 3**



Källa: Trafikanalys: *Luftfart 2012*, Statistik 2013:6.

Utrikestrafiken har under samma period haft en stadig tillväxt. Lågkostnadsbolagen har även där tagit betydande marknadsandelar. Utrikestrafiken har traditionellt varit knuten till ett fåtal flygplatser, men fler och fler flygplatser har fått utrikestrafik.

Prognoserna för det svenska inrikesflyget är osäkra men indikerar en svag ökning. Antalet inrikespassagerare uppskattas vara strax under 4 miljoner

<sup>10</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 30.

2030 och strax däröver 2050.<sup>11</sup> Prognoserna för utrikesflyget till och från Sverige pekar på en fortsatt ökning, uppemot 35 miljoner resenärer 2030.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> Arne Karyd: *Fossilfri flygtrafik? Underlagsrapport till utredningen om fossiloberoende fordonsflotta*, 2013, s. 5.

<sup>12</sup> Arne Karyd: *Fossilfri flygtrafik?* s. 6.



## 2. Flygets utsläpp och miljöpåverkan

### Vad släpper flyget ut?

Flygets miljöpåverkan består bland annat av utsläpp av växthusgaser. Dessa har olika påverkan på klimatet. Vissa (till exempel koldioxid, CO<sub>2</sub>) har direkt påverkan genom att ha en ökande effekt på jordens medeltemperatur. Koldioxid utgör en stor andel av utsläppen och stannar också kvar länge i atmosfären.<sup>13</sup> Kväveoxidutsläpp har å andra sidan en indirekt effekt genom att påverka balansen av ozon- och metangaser (ozonpåverkan värmer och metanpåverkan kyler klimatet). Samspelet är komplext och beror på utsläppshöjden.<sup>14</sup>

Utsläpp av vattenånga får andra konsekvenser i atmosfären än på jordytan. Vid vissa atmosfärförhållanden bildas kondensationsstrimmor (k-strimmor) som kan övergå till moln, vilket i sin tur påverkar klimatet. Hur stor påverkan k-strimmorna har på klimatet är svårt att bedöma. Det går ibland att undvika att strimmor uppstår genom att ändra flyghöjd, men det innebär å andra sidan ökad bränsleåtgång och därmed ökade koldioxidutsläpp. Avvägningen är därför inte självklar.<sup>15</sup>

Det är svårt att göra exakta beräkningar av vilken klimatpåverkan flyget har. Påverkan från koldioxidutsläppen är väl belagd, men det är svårare att bedöma effekterna av andra utsläpp.<sup>16</sup> Mängden och det exakta innehållet i utsläppen beror också på vilken sorts motor som används, bränslets sammansättning och när i flygprocessen som utsläppen mäts.<sup>17</sup>

Flygets utsläpp de senaste 40 åren har vuxit marginellt snabbare än mänsklighetens totala koldioxidutsläpp.<sup>18</sup> Flyget beräknas stå för ungefär 2 procent av de totala koldioxidutsläppen i världen.<sup>19</sup> Det svenska flyget beräknas stå för 4–5 procent av Sveriges totala utsläpp av koldioxid. Den högre andelen för Sverige än världen i sin helhet beror på att Sverige har en i övrigt renare energiförsörjning med lägre utsläpp.<sup>20</sup> Vägtrafiken utgör den största andelen, nämligen 30 procent av Sveriges koldioxidutsläpp. Om även utrikes flyg och sjöfart räknas in i transportsektorns utsläpp står transportsektorn för nästan hälften (47,6 procent) av Sveriges utsläpp av koldioxid.<sup>21</sup> Det svenska inri-

<sup>13</sup> Luftfartsstyrelsen: *Flygtendenser 2007:04*, s. 5. Tomas Grönstedts avsnitt.

<sup>14</sup> Tomas Grönstedts avsnitt. Joyce E. Penner m.fl.: *Aviation and the global atmosphere*, Cambridge University Press, 1999, avsnitt 1.3 *Emissions and environment*. Finns tillgänglig på: [www.grida.no/publications/other/ipcc\\_sr/?src=/climate/ipcc/aviation/index.htm](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/aviation/index.htm).

<sup>15</sup> SMHI: [www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/paverkar-k-strimmor-klimatet-1.11421](http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/paverkar-k-strimmor-klimatet-1.11421).

<sup>16</sup> Tomas Grönstedts avsnitt.

<sup>17</sup> Joyce E. Penner m.fl. 1999, avsnitt 1.3.

<sup>18</sup> Tomas Grönstedts avsnitt.

<sup>19</sup> [www.iata.org/pressroom/facts\\_figures/fact\\_sheets/pages/environment.aspx](http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/pages/environment.aspx).

<sup>20</sup> Swedavia: [www.swedavia.se/om-swedavia/detta-ar-swedavia/swedavia-i-almedalen/hallbarhet-och-miljo/fakta-om-flyget/](http://www.swedavia.se/om-swedavia/detta-ar-swedavia/swedavia-i-almedalen/hallbarhet-och-miljo/fakta-om-flyget/).

<sup>21</sup> Transportstyrelsen: [www.transportstyrelsen.se/sv/Luftfart/Miljo-och-halsa/Vanliga-fragor-och-svar/](http://www.transportstyrelsen.se/sv/Luftfart/Miljo-och-halsa/Vanliga-fragor-och-svar/).

kesflygets utsläpp av växthusgaser har minskat med ungefär 15 procent sedan början av 2000-talet.<sup>22</sup>

Flygets utsläpp av koldioxid och andra utsläpp beräknas globalt stå för 3,5 procent av människans totala påverkan på klimatet.<sup>23</sup>

## Utsläppsmål

År 2010 enades samtliga 190 medlemsländer i FN:s flygorgan ICAO om en resolution för att hantera flygets klimatpåverkan. Resolutionen innehåller tre övergripande mål: förbättrad bränsleeffektivitet, koldioxidneutral tillväxt från 2020 och en global standard för koldioxidutsläpp.<sup>24</sup>

Flygbranschen har genom sin internationella organisation IATA enats om målet att flygets utsläpp till 2020 ska minska med 1,5 procent per år och ha en koldioxidneutral tillväxt från 2020. Flygets utsläpp 2050 ska vara halverade jämfört med 2005.<sup>25</sup>

EU-kommissionären för transportfrågor samlade 2010 en grupp för flygforskningsfrågor (High Level Group on Aviation and Aeronautics Research). Gruppen publicerade 2011 en vision, Flightpath 2050. I Flightpath 2050 sätter man upp målet att flygets utsläpp ska minska med 75 procent per passagerarkilometer till 2050 jämfört med 2000.

Amerikanska flyg- och rymdmyndigheten NASA har satt upp forskningsmål för att minska bränsleanvändning, utsläpp och buller. Jämfört med 1998 ska flygplanen använda 60 procent mindre bränsle 2025. För utsläppen är målet att minska emissioner av kväveoxider med 80 procent till 2025.<sup>26</sup>

## Handel med utsläppsrätter

Handel med utsläppsrätter är ett ekonomiskt styrmedel för att minska klimatpåverkan baserat på principen att den som förorenar ska betala (polluter pays principle eller PPP).<sup>27</sup> Genom Kyotoprotokollet och EU:s system för ut-

<sup>22</sup> Naturvårdsverket: [www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/](http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/).

<sup>23</sup> I den uppgiften räknas inte den mycket svårbedömda kondenscirruseffekten in, alltså att kondensationsstrimmor kan bidra till bildande av cirrusmoln. IPCC Special Report: Aviation and the Global Atmosphere, 1999: [www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf). Se även Tomas Grönstedts avsnitt där han hänvisar till fler källor.

<sup>24</sup> ICAO: *ICAO Resolution A37-19 Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Climate change*.

<sup>25</sup> IATA: [/www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2009-10-10-01.aspx](http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2009-10-10-01.aspx).

<sup>26</sup> Jämfört med 1998 ska flygplanen använda 33 procent mindre bränsle 2015, 50 procent mindre 2020 och 60 procent mindre 2025. För utsläppen har NASA som mål att minska emissioner av kväveoxider under start och landning med 60 procent till 2015, 75 procent till 2020 och 80 procent till 2025. Under cruiseflygning ska nivåerna sänkas med 55 procent till 2015, 70 procent till 2025 och 80 procent till 2025, se NASA: [www.aeronautics.nasa.gov/pdf/green\\_aviation\\_fact\\_sheet\\_web.pdf](http://www.aeronautics.nasa.gov/pdf/green_aviation_fact_sheet_web.pdf).

<sup>27</sup> Riksrevisionen: *Klimat för pengarna? Granskningar inom klimatområdet 2009–2013*, RiR 2013:19, s. 20.

släppshandel (EU ETS) har en marknad för växthusgaser skapats, där utsläpp av koldioxid eller koldioxidekvivalenter har blivit en handelsvara. Med utsläppsrätt menas rätten att släppa ut ett ton koldioxidekvivalenter under en fastställd period.<sup>28</sup> För att andelen utsläpp faktiskt ska minska sätter EU-kommissionen ett tak som sedan sänks varje år (cap and trade principle).<sup>29</sup> Nuvarande tak har som mål att utsläppen ska minska med 21 procent till 2020 jämfört med 2005 års utsläppsnivå.

I början var transportsektorn undantagen från EU:s handel med utsläppsrätter, men sedan 2012 omfattas även flyg. Hösten 2013 beslutades dock att endast flygningar inom EU ska ingå, i väntan på att ICAO enats om ett globalt marknadsbaserat styrmedel för flyget, något som ska ske senast 2016 för att kunna träda i kraft 2020.<sup>30</sup>

I dagsläget blir flygbolagen tilldelade 82 procent av utsläppsrätterna gratis, 15 procent auktioneras ut och 3 procent hålls i reserv till snabbt växande flygbolag och nyinkomna aktörer på marknaden.<sup>31</sup> Tilldelningen av utsläppsrätter baseras för passagerartrafiken på personkilometer och för godstrafiken på tonkilometer under 2010. Flyget ingår i en egen kvot och har separata utsläppsrätter (EUAA, European Union aviation allowance eller europeisk utsläppsrätt för flygoperatörer).<sup>32</sup>

Utsläppshandeln i sin helhet visar på varierade effekter. EU-kommissionens egen rapport från 2012 visar att EU ETS har skapat en fungerande marknad för koldioxidutsläpp, vilken har lett till reella utsläppsminskningar i linje med målet för 2020. Dock har den ekonomiska krisen och bestämmelser inom övergången till den tredje åtagandeperioden lett till en obalans mellan utbud och efterfrågan på kort sikt med möjliga negativa konsekvenser på lång sikt.<sup>33</sup> Kommissionen har därför lagt ett förslag om ”backloading”, alltså att en mängd utsläppsrätter som skulle auktioneras ut åren 2013 till 2015 i stället kommer att auktioneras ut mellan åren 2019 och 2020, för att stabilisera utbud och efterfrågan.<sup>34</sup> Flera studier visar att priserna på utsläppsrätterna har varit för låga för att det ska ha någon direkt påverkan på utsläppen.<sup>35</sup> Utifrån Naturvårdsverkets uppföljningar av utsläppshandelns effekt såg

<sup>28</sup> Europaparlamentets och rådets direktiv 2003/87/EG, artikel 3a.

<sup>29</sup> Riksrevisionen: *Utsläppshandel för att begränsa klimatförändringen – Fungerar det?* RiR 2012:27, s. 9.

<sup>30</sup> Regeringskansliet: Faktapromemoria 2013/14:FPM36. Europeiska kommissionen (2013) *Förslag till Europaparlamentets och rådets direktiv om ändring av direktiv 2003/87/EG om ett system för handel med utsläppsrätter för växthusgaser inom gemenskapen, med hänsyn till genomförandet 2020 av en internationell överenskommelse om tillämpning av en global marknadsbaserad åtgärd för utsläpp från internationell luftfart*. KOM (2013) 722 slutlig.

<sup>31</sup> EU-kommissionen: [ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/allowances/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/allowances/index_en.htm).

<sup>32</sup> Statens energimyndighet: *EU:s system för handel med utsläppsrätter*, ET 2012:50, s. 9.

<sup>33</sup> EU-kommissionen: *Rapport från kommissionen till rådet och Europaparlamentet. Tillståndet för den europeiska koldioxidmarknaden 2012*. KOM (2012) 652, 2012, s. 11.

<sup>34</sup> Statens energimyndighet: *Utvecklingen på utsläppsmarknaden 2013. En beskrivning och analys av den globala utsläppshandeln*. ER 2013:29, s. 12.

<sup>35</sup> Riksrevisionen: *Utsläppshandel för att begränsa klimatförändringen – Fungerar det?* RiR 2012:27, s. 23.

man mellan åren 2005 och 2011 att koldioxidutsläppen minskade långsammare i de sektorer som omfattades av utsläppshandeln än inom de icke-handlande sektorerna.<sup>36</sup>

Några länder, till exempel Storbritannien, har infört flygskatter.<sup>37</sup> Skatten infördes 1994 och har höjts successivt. Skatten ökar med resans längd och ligger i dag mellan 100 kronor och 4 000 kronor.<sup>38</sup>

## Biobränslen

Det forskas mycket om alternativ till petroleumbaserade flygbränslen. Det går att framställa jetbränsle ur många vegetabiliska och animaliska råvaror. I dag är två processer godkända, och fler väntas bli certifierade de närmaste åren. Man flyger dock inte med enbart biobränsle vid passagerartrafik, utan det blandas med traditionellt bränsle. Processerna för att tillverka alternativt jetbränsle är mer komplicerade och energikrävande och därmed dyrare än tillverkning av biobränsle för andra ändamål. Ett sätt att göra drivmedelsproduktionen mer energieffektiv är att kombinera den med biovärmeverk, något som har studerats vid Arlanda.<sup>39</sup>

Tillverkningsprocesserna kan i sig dessutom generera koldioxidutsläpp, och olika processer och råvaror har därför olika nettoeffekter på miljön. I sökandet efter alternativ till petroleumbaserade bränslen måste också tillverkningsprocessens påverkan på möjligheterna till annan användning av resurser vägas in. Det är till exempel inte önskvärt att framställning av biobränslen slår ut viktig matproduktion. Råvaror av biologiskt ursprung har vanligtvis även lägre energidensitet, vilket gör att logistiken av tillförsel av råvara blir betydligt mer omfattande och energikrävande än om petroleum används som råvara. Olika vegetabiliska råvaror kräver också olika jord- eller vattenkvalitet, och mark- och vattenåtgången vid odling kan variera mycket.<sup>40</sup>

---

<sup>36</sup> Naturvårdsverket: [www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslappshandel/](http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslappshandel/).

<sup>37</sup> House of Commons Library: [www.parliament.uk/briefing-papers/sn00413.pdf](http://www.parliament.uk/briefing-papers/sn00413.pdf).

<sup>38</sup> HM Revenue and Customs: [www.hmrc.gov.uk/rates/apd.htm](http://www.hmrc.gov.uk/rates/apd.htm).

<sup>39</sup> Martin Hagströms avsnitt.

<sup>40</sup> UCLA Institute of Environment and Sustainability: <http://www.environment.ucla.edu/reportcard/article7320.html>. Forskning och framtid: [fof.se/tidning/2010/7/det-dubbelgrona-branslet](http://fof.se/tidning/2010/7/det-dubbelgrona-branslet). Samtal med Martin Hagström 2014-03-25.

Beroende på vilken råvara och vilken process man använder går det gissningsvis åt ca 5 till 10 gånger så mycket (antal kg) biomassa jämfört med råolja som råvara till processen att framställa flygbränsle. Det betyder en ökning med upp till tio gånger eller mer (biomassa har lägre densitet än petroleum) i logistiken för tillförsel av råmaterial.<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Samtal med Martin Hagström 2014-03-25. Tomas Ekbohm m.fl.: *Förstudie för biobaserat flygbränsle för Stockholm–Arlanda Flygplats*, 2009 s. 56.

### 3. Forskning och utveckling inom flyget

#### Teknikutveckling inom det internationella flyget

Från 1930-talet till 1960-talet utvecklades flygplan och motorer snabbt, och nya modeller togs i bruk. Sedan 1970-talet har utvecklingen varit mer fokuserad på bättre driftsekonomi och säkerhet i mindre steg fram till dagens trafikflygplan.

Sedan 1990-talet har flygindustrin påverkats av ett internationellt miljötänkande. Flygets miljöpåverkan har uppmärksammats, och man har sökt tekniska lösningar för att komma till rätta med miljöproblemen, såsom lättare plan, mer effektiva motorer eller alternativa bränslen.<sup>42</sup>

Flygsäkerheten ställer förstås höga krav på utveckling av ny teknik. Generellt tar de flesta produkterna inom flygområdet lång tid att utveckla, men de har i gengäld lång livslängd.<sup>43</sup> Dagens flygplansmodeller har funnits länge: Ett exempel är Boeings storsäljare 737, som togs i bruk 1967 och som fortfarande tillverkas. Ett enskilt flygplans livstid är ungefär 25–30 år.

För flygbolagen är inköp av flygplan ett avgörande beslut. Flygplanen ska vara i drift i många år, vilket kräver avancerade analyser av den framtida marknaden. I en bransch som är mycket konkurrensutsatt och konjunkturkänslig kan ett felaktigt beslut få ödesdigra konsekvenser. Detta kan leda till att det ibland finns en ovilja hos exempelvis flygbolag att ta stora risker. Som ett led i att anpassa sig till marknadssituationen har några bolag valt att i stället långtidshyra plan.<sup>44</sup>

Sedan 1990-talet har det skett en våg av fusioner inom flygplanstillverkningen. I dag råder i princip ett duopol, där flygplanstillverkarna Boeing och Airbus helt dominerar marknaden och noga bevakar varandras utvecklingsarbete. Vid sidan av dessa har bolagen General Electric, Pratt & Whitney och Rolls-Royce stor inverkan på den tekniska utvecklingen av exempelvis motorer för det civila flyget.<sup>45</sup> Flygplanstillverkare i Ryssland, Kanada, Brasilien, Japan och Kina är relativt starka på marknaden för regional- och medeldistansflygplan för 50 till 150 passagerare. Bombardier och Embraer försöker också ge sig in på marknaden för plan med plats för 120 till 150 passagerare.<sup>46</sup> Bombardier C, Embraer E-Jets, Sukhoi Superjet och Mitsubishi Regional Jet närmar sig A320 och B737, och Kina storsatsar på sina Comac ARJ21 och C919.<sup>47</sup>

År 2008 bad amerikanska NASA fyra ledande aktörer inom forskning och industri (General Electric, Boeing, Massachusetts Institute of Technology, MIT, och Northrop Grumman) att skissa på en framtida utveckling för flyget

<sup>42</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 6.

<sup>43</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s 27–29.

<sup>44</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:1*, s. 23.

<sup>45</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s 27–29.

<sup>46</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 6.

<sup>47</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s 29.

och utveckla olika koncept som kunde möta framtida krav på lägre bränsleförbrukning, reducerade utsläpp och minskat buller fram till 2030.<sup>48</sup> År 2011 bad man Lockheed Martin, Boeing och Northrop Grumman att studera koncept för flygplan möjliga att pröva 2025.<sup>49</sup> NASA:s projekt har resulterat i lösningar som ofta nämns i diskussionen om framtidens flyg.

## EU-satsningar på flygutveckling

EU har det senaste decenniet tagit flera initiativ som berör flygteknisk forskning.

Flyget är viktigt för EU-ländernas ekonomi. Enligt EU finns det ca 450 flygbolag och över 700 flygplatser i Europa. Flyget omsätter 600 miljarder euro och ger över 8 miljoner arbetstillfällen.<sup>50</sup> Med argumentet att forskning och utveckling stöder Europas konkurrensförmåga inom flygområdet samlade EU-kommissionären för forskning 2001 en grupp intressenter för att ta fram en europeisk vision för flygrelaterad forskning, European Aeronautics: a vision for 2020.<sup>51</sup>

Visionen ledde fram till olika rekommendationer, bland annat om långsiktigt samarbete mellan olika intressenter, och den utmynnade i inrättandet av Acare (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe).<sup>52</sup> Acare är ett initiativ inom ramen för EU:s sjunde ramprogram för forskning och ett samarbete mellan olika offentliga och privata aktörer. Acare formulerar strategiska forskningsagendor.

Siim Kallas, EU-kommissionär med ansvar för transportfrågor, sammankallade 2010 en grupp med representanter från forskning och industri. Gruppen, High Level Group on Aviation and Aeronautics Research, formulerade året därpå en vision för Europas framtida flygforskning.<sup>53</sup>

Single European Sky (SES) lanserades av Europakommissionen 1999. Flygbolagen måste i dag ofta anpassa sina flighter efter exempelvis nationsgränser, ansvarsområden och militära zoner. Varje land har sina egna bestämmelser, rutter, kontrollstationer och system för sitt luftrum. Brister i samarbete och planering gör att trafikledningen i Europa är ineffektiv. Man kan därför sällan flyga den kortaste vägen mellan två destinationer; i genomsnitt är en flight i Europa 50 kilometer längre än fågelvägen. Enligt den ansvarige EU-kommissionären medför EU:s fragmenterade luftrum varje år extrakostnader på nästan 5 miljarder euro för flygbolagen och deras kunder.<sup>54</sup>

<sup>48</sup> NASA: [www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/future\\_airplanes.html#](http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/future_airplanes.html#).

<sup>49</sup> NASA: [www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/flight\\_2025.html](http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/flight_2025.html).

<sup>50</sup> Acare: [www.acare4europe.com/about-acare](http://www.acare4europe.com/about-acare).

<sup>51</sup> EU-kommissionen:

[ec.europa.eu/research/growth/aeronautics2020/pdf/aeronautics2020\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/growth/aeronautics2020/pdf/aeronautics2020_en.pdf).

<sup>52</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s. 27–29.

<sup>53</sup> EU-kommissionen:

[ec.europa.eu/transport/modes/air/high\\_level\\_group/hlg\\_aviation\\_aeronautics\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/modes/air/high_level_group/hlg_aviation_aeronautics_en.htm).

<sup>54</sup> EU-kommissionen: [ec.europa.eu/commission\\_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/06/sesplus2\\_en.htm](http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/06/sesplus2_en.htm)

För att möta det ökande flygandet menade EU att det behövs gemensamma regler och rutiner i Europa. SES och dess efterföljare SES II har som mål att möta framtida kapacitets- och säkerhetsbehov med hjälp av lagstiftning.<sup>55</sup>

En hörnsten i SES är att luftrummet i Europa delas in i nio samarbetszoner, så kallade funktionella luftrumsblock (Functional Airspace Blocks, FAB). Arbetet med att förverkliga den nya indelningen startades 2004, och zonerna skulle ha varit genomförda 2012. Det är dock endast Sverige/Danmark och Storbritannien/Irland som har förverkligat sina respektive områden. EU-kommissionen har riktat hård kritik mot flera medlemsländer för att arbetet går så långsamt.<sup>56</sup>

År 2004 påbörjades Sesar, The Single European Sky ATM Research, som ska pågå till 2020 och som stödjer SES med tekniska lösningar. Sesar ska utveckla tekniska och operativa förutsättningar för det gemensamma europeiska luftrummet för att möta den väntade trafikökningen. Sesar finansieras av EU, flygindustrin och Eurocontrol (den europeiska organisationen för säkrare flygtrafiktjänst).

Clean Sky är ett europeiskt flygforskningsprogram som startade 2008. Clean Sky har en budget på 1,6 miljarder euro och är därmed det största samlade flygforskningsprogrammet i europeisk historia.<sup>57</sup> EU-kommissionen står för halva kostnaden och flygindustrin för resten. Syftet med Clean Sky är att påskynda förverkligandet av gröna utvecklingsinsatser och förkorta den tid det tar för nya lösningar att komma ut på marknaden. Clean Sky har stötts av ett antal mindre EU-projekt för att utveckla delsystemteknik med en budget på 50 till 100 miljoner euro. Tekniken valideras och testas nu på motornivå i Clean Sky. År 2014 påbörjas en andra period, Clean Sky 2, som ska pågå till 2024. Inom Clean Sky 2 är målet att göra tekniken mer mogen genom att flyga fullständiga demonstratorer.

Inom EU driver kommissionen sedan 2011 ett projekt för att öka användningen av biobränslen. European Advanced Biofuels Flight path Initiative genomförs i samverkan med medlemsstaternas myndigheter, flygbolag, flygplanstillverkare och bränsletillverkare.<sup>58</sup> Målsättningen för projektet är att inom Europa ha en årlig förbrukning av minst 2 miljoner ton biobaserat jetbränsle 2020. EU-kommissionens vitbok från 2011 anger att målsättningen för flyget är en 40-procentig användning av hållbara bränslen med lågt fossilt kolinnehåll.<sup>59</sup>

---

<sup>55</sup> EU-kommissionen:

[ec.europa.eu/transport/modes/air/single\\_european\\_sky/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/modes/air/single_european_sky/index_en.htm).

<sup>56</sup> EU-kommissionen om FAB: [ec.europa.eu/transport/modes/air/single\\_european\\_sky/fab/](http://ec.europa.eu/transport/modes/air/single_european_sky/fab/).

För EU-kommissionens kritik, se [europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-860\\_sv.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-860_sv.htm).

<sup>57</sup> Clean Sky: [www.cleansky.eu/content/article/mission-objectives](http://www.cleansky.eu/content/article/mission-objectives).

<sup>58</sup> EU-kommissionen: [ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/flight\\_path\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/flight_path_en.htm).

<sup>59</sup> EU-kommissionen: *Färdplan för ett gemensamt europeiskt transportområde – ett konkurrenskraftigt och resurseffektivt transportsystem*, 2011, s. 9.



## Svensk forskning och utveckling<sup>60</sup>

### En inhemsk flygindustri

Det första svenskkonstruerade flygplanet byggdes 1910. Svensk flygplans-tillverkning i något större skala kom i gång senare under 1910-talet. De flesta av de tidiga tillverkarna inriktade sig på flygplan som kunde säljas till Krigsmakten.

Den dominerande tillverkaren av flygplan i Sverige blev från slutet av 1930-talet Svenska Aeroplan AB, Saab. Dess första egna konstruktion blev Saab 17 som flög i början av 1940-talet. 29 Tunnan premiärflög 1948 och blev Västeuropas första pilvingade jaktflygplan. Andra kända konstruktioner har varit 32 Lansen, 35 Draken, 37 Viggen och 39 Gripen.

Saab har också tillverkat civila flygplan. Efter kriget utvecklade Saab det civila passagerarflygplanet Saab 90 Scandia. Produktionen blev dock kortvarig, då försvaret begärde att Saab skulle satsa alla resurser på 29 Tunnan i början av 1950-talet. Förutom trafikflygplanet Scandia och allmänflygplanen Safir och Safari har Saab bidragit med två flygplan i turbopropkategorin, Saab 340 (i trafik 1984) och Saab 2000 (i trafik 1994).

Saab både utvecklar egna stridsflygplan och deltar i olika samarbeten. Saab och Boeing träffade i december 2013 avtal om att tillsammans konkurrera om en affär med det amerikanska flygvapnet, och Brasilien har beslutat att lägga en order på Saab 39 Gripen. Den civila produktionen av helt egna flygplan är nedlagd, men däremot medverkar Saab i utveckling och produktion av trafikflygplan för både Airbus och Boeing. Företaget deltar också i EU:s stora forskningsprogram Clean Sky om framtidens flygplan.

Svensk flygmotortillverkning startade år 1930 i Trollhättan hos företaget Nohab Flygmotorfabrik som 1941 blev Svenska Flygmotor AB och därefter bytte namn till Volvo Flygmotor. Efter 1994 användes namnet Volvo Aero och sedan år 2012 går företaget under namnet GKN Aerospace Sweden.

Motorerna till 29 Tunnan, 32 Lansen och 35 Draken har samtliga tillverkats i Trollhättan på licens från de Havilland och Rolls Royce. Motorn till 37 Viggen är en av Volvo Flygmotor omkonstruerad civil Pratt & Whitney-motor. Motorn i 39 Gripen är en omkonstruerad F404-motor där Volvo Aero/GKN står för omkonstruktionen och har helmotoransvaret.

Med kunskaper från den militära flygmotortillverkningen har Volvo Aero/GKN gradvis tagit steget in i den civila flygmotorbranschen. I mer än 90 procent av alla civila flygmotorer för plan med över 100 passagerare finns i dag svensktillverkade flygmotorkomponenter. Företaget har specialiserat sig på tillverkning och utveckling av motorstrukturer och samarbetar i dag med samtliga stora motortillverkare. Exempel på några aktuella motorprogram där GKN Aerospace är med är GEnx (Boeing 787), Rolls Royce Trent XWB

<sup>60</sup> Avsnittet bygger till stora delar på Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2010:2*, s. 36–40. Uppgifterna om Volvo Aero och GKN Aerospace Sweden är framtagna av Tomas Grönstedt.

(Airbus 350 XWB) och PW 1000G (Airbus 320neo, Bombardier CSeries, Irkut MS-21 och Mitsubishi MRJ). En dominerande del av GKN Aerospace Swedens verksamhet bedrivs i dag på den civila flygmotorsidan.

GKN Aerospace ingår i olika europeiska forskningsprojekt tillsammans med övriga europeiska flygmotorindustrier för att utveckla framtidens flygmotorer. Ett exempel är Clean Sky, där GKN är med i fyra av sex motordemonstratorer för framtidens hållbara och gröna motorer.

Forskning och utveckling av flygteknik i Sverige bestod tidigare i hög grad av utveckling av egna, hela system. En internationell trend som också märks i vårt land är att man i stället deltar som en av flera parter i internationella projekt. I Sverige syns en trend mot färre patentansökningar och patent inom flygområdet. En förklaring kan vara just det ökade internationella samarbetet.<sup>61</sup>

### Akademi och industri i samarbete

De *lärosäten* som bedriver mest forskning inom civilt och militärt flyg är Kungliga Tekniska högskolan, Linköpings universitet, Chalmers tekniska högskola, Luleå tekniska universitet, Högskolan Väst och Högskolan i Skövde. Samarbetet med industrin är omfattande.<sup>62</sup> Till exempel inom området flygmotorer finns starka länkar i kedjan mellan de olika stegen från projekt med lägre teknologisk mognadsgrad till färdiga produkter. I denna stegvisa process spelar instituten en viktig roll för att tekniken inte ska förbli halvmogen och riskera att aldrig nå fram till färdiga produkter.

Finansieringen av den flygtekniska forskningen kommer framför allt via Vinnova, EU-projekt, Försvarets materielverk (FMV), Försvarmakten, Stiftelsen för strategisk forskning och Vetenskapsrådet.<sup>63</sup> Försvaret har dock under en rad år dragit ned på sin flygforskning.<sup>64</sup>

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, bedriver avancerad forskning och utveckling inom området flygteknik. FOI besitter specialkompetens inom bland annat strömningsmekanik, hållfasthet och utsläpp.<sup>65</sup>

Vinnova understryker behovet av att stödja kompetens på lång sikt. Därför betonar man vikten av att upprätthålla kompetensen inom det civila flyget.<sup>66</sup>

I början av 1990-talet fick Vinnova i uppdrag att tillsammans med FMV, Försvarmakten, Saab och Volvo Aero starta *Nationella flygtekniska forskningsprogrammet*, NFFP. NFFP har pågått sedan 1994 och inriktar sig på flygforskning för både civilt och militärt bruk. Syftet med NFFP är att vidareutveckla och samordna forskningsresurserna vid industrier, forskningsinstitut, universitet och högskolor och bidra till att stärka den svenska industrins konkurrensförmåga. Det ska även stärka landets förmåga att aktivt delta i och dra

<sup>61</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s. 27–29.

<sup>62</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s. 27–29.

<sup>63</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s. 27–29.

<sup>64</sup> Transportstyrelsen: *Flygtendenser 2011:2*, s. 29.

<sup>65</sup> FOI: [www.foi.se/sv/Vara-tjanster/Kunskapscentrum/Flygteknik/](http://www.foi.se/sv/Vara-tjanster/Kunskapscentrum/Flygteknik/).

<sup>66</sup> Samtal med Vilgot Claesson, Vinnova, 2014-03-12.

nytta av internationellt forsknings- och teknologisamarbete. NFFP 6, som pågår mellan 2013 och 2016, har en total budget på 440 miljoner kronor, varav hälften kommer från staten och hälften från industrin.<sup>67</sup>

En demonstrator är en plattform där tänkta egenskaper hos framforskade idéer och teknik kan testas och utvärderas. Programmet *Grönt flygtekniskt demonstrationsprogram* (GF Demo) påbörjades 2012 och syftar till att stärka den svenska flygindustrins konkurrenskraft internationellt genom stöd just under demonstrationsfasen, som för flygindustrin är ett speciellt utsatt skede. Avsikten är att programmet ska bidra till att grön teknologi snabbare kan införas i civila flygplan och deras tillhörande system. Programmet ska också stötta och möjliggöra ett starkt svenskt deltagande i internationella civila demonstrationsprogram av typen Clean Sky och Sesar. Programmet är en fortsättning på Flygtekniskt utvecklings- och demonstrationsprogram (FLUD, påbörjat 1994) och administreras av Vinnova.

### Starka forskningsområden

Sverige är i dag särskilt framstående inom några områden. I en majoritet av dagens civila flygmotorer finns det svensktillverkade komponenter. På motorområdet har Sverige en stark ställning inom lättvikts- och tillverkningsteknik. Starka kunskapsområden finns också inom strömningsteknik, helhetsförmåga och konceptstudier, hållfasthetslära och materialteknik. Inom ramen för programmet Clean Sky utvecklar svenska aktörer roterande strukturer till okapslade turbofläktmotorer.<sup>68</sup>

Vid sidan av motorer befinner sig svenska forskare i fronten vad gäller utveckling av material. Kompetensen är god inom området kompositmaterial, där svenska leverantörers styrka bland annat är konceptutveckling och helhetslösningar. Både Saab och GKN är starka inom området lättviktsmaterial. Ytterligare ett område är human-machine interface (HMI), alltså gränssnittet mellan människa och teknik (exempelvis en pekskärm). Radarteknik och sensorer är likaså ett område där Sverige hävdar sig väl.<sup>69</sup>

2012 års forskningsproposition pekade ut den flygtekniska forskningen som ett framgångsrikt forskningsområde. Sverige har enligt propositionen en stark internationell position. Flygindustrin har en väl utvecklad och fungerande samverkan med universitet, högskolor och industriforskningsinstitut samt med små och större företag inom industrin. Det finns en stark länk mellan grundforskning och produktutveckling inom landet och en industriell kompetens inom avancerad teknologi.<sup>70</sup>

Även om den svenska flygtekniska forskningen haft sämre förutsättningar under ett antal år, ser läget för flygforskningen ljusare ut än på länge. Saabs

<sup>67</sup> Vinnova: [www.vinnova.se/sv/Var-verksamhet/Gransoverskridande-samverkan/Samverkansprogram/Nationella-flygtekniska-forskningsprogrammet/](http://www.vinnova.se/sv/Var-verksamhet/Gransoverskridande-samverkan/Samverkansprogram/Nationella-flygtekniska-forskningsprogrammet/).

<sup>68</sup> Samtal med Vilgot Claesson, Vinnova 2014-03-12. Tomas Grönstedts avsnitt.

<sup>69</sup> Samtal med Vilgot Claesson, Vinnova 2014-03-12. Tomas Grönstedts avsnitt.

<sup>70</sup> Regeringens proposition 2012/13:30 *Forskning och innovation*, s. 112–113.

avtal med Boeing och framgångarna för Gripen får goda effekter för hela området, även det civila flyget.<sup>71</sup>

### En forskningsagenda för flyget

Två svenska *flygforskningsagendor* har tagits fram. Den första, NRA Flyg 2010, publicerades 2010. Den andra, NRIA Flyg 2013, utarbetades inom ramen för Vinnovas program för strategiska forsknings- och innovationsagendor. Agendorna har tagits fram i ett samarbete mellan universitet, högskolor, institut, företag, intresseorganisationer och myndigheter. Intresseorganisationen Svenskt Flyg ansvarade för processledningen av den senare agendan.

Visionen i *NRIA 2013* är att den svenska flygforskningen och flygutvecklingen 2050 med gott resultat riktar in sig på att agera samarbetspartner i internationella projekt och att vara leverantör av delsystem till dessa. Universitet och högskolor samarbetar i nätverk med marknadsbehov för ögonen, och det finns ett övergripande forum för flygområdet.<sup>72</sup>

Agendan innehåller fyra rekommendationer. Den första är att satsa på demonstratorer, där ny teknik kan prövas och utvärderas. Anledningen är att just den fas i utvecklingsarbetet då ny flygforskning ska tillämpas är mycket känslig och avgörande för om ny forskning leder till en säljbar produkt. Agendan föreslår också att man stärker arenorna för flygproduktion, framför allt med hjälp av åtgärder för små och medelstora företag så att produktionen stannar i landet. För det tredje föreslås att forskningsnätverken och deras kontakt med företagen stärks i syfte att snabbare få ut forskningens resultat på marknaden. Slutligen efterlyser man ett forum för flygforskningsfrågor. Avsikten är att få en tydligare inriktning och samsyn kring vilka insatser som behövs. Forumet föreslås överta arbetet med att vart tredje år formulera en flygforskningsagenda.<sup>73</sup>

Agendan pekar ut sex prioriterade och i internationellt perspektiv starka forskningsområden.<sup>74</sup>

- Helhetsförmåga och konceptstudier, då man fokuserar på hela system och hur kunskaper om helheten ger insikter i vilka krav som ska ställas på systemets delar.
- Grundläggande flygteknik, såsom aerodynamik, flygmekanik och hållfasthet.
- Integrerad struktur. Här ryms bland annat forskning om hur kompositer, lättviktsmaterial och nanoteknologi kan bidra till en effektiv struktur.
- Intelligent system och sensorer, vilket inbegriper studier av automation, samverkan mellan människa och system, samt sensorer.
- Framdrivning (motorteknologi).

<sup>71</sup> Samtal med Vilgot Claesson, Vinnova 2014-03-12.

<sup>72</sup> NRIA Flyg 2013, s. 11.

<sup>73</sup> NRIA Flyg 2013, s. 6–7.

<sup>74</sup> NRIA Flyg 2013, s. 16–17.

- Flygtrafikledning (air traffic management, ATM).

NRIA 2013 menar att insatserna för framtiden bör koncentreras till de områden där Sveriges kompetens och förmåga är mest konkurrenskraftig. Framför allt syftar man då på motor- och flygplansutveckling. Den svenska förmågan är över lag mycket svagare när det gäller utveckling av biobränslen. ATM är ett viktigt område, men NRIA 2013 menar att dessa utmaningar bara kan mötas tillsammans med en positiv flygplans- och motorutveckling.<sup>75</sup>

---

<sup>75</sup> NRIA Flyg 2013, s. 18.

## 4. Expertunderlagen om framtidens flyg

I detta avsnitt refereras de underlag som fyra externa experter har tagit fram på uppdrag av utskottet. Först beskrivs vilka drivkrafter för förändring som experterna har identifierat, sedan följer en sammanfattning av forskningsfronten inom flygplanskonstruktion, motorer, bränsle och flygtrafikledning. Ett avslutande avsnitt diskuterar den övergripande frågan om hur tekniska och operationella åtgärder kan bidra till att framtidens flyg blir hållbart.

### Drivkrafter för utveckling

De fyra underlagen ger en samstämmig bild av vilka problem flyget brottas med och vilka incitamenten är för att utveckla tekniken och finna nya lösningar.

Olika **utsläpp** och hur de påverkar **miljön** är en viktig drivkraft för utveckling. Flygplan släpper ut koldioxid, vattenånga, kväveoxider och i mindre omfattning kolväten, svaveldioxid och sotpartiklar. Utsläppen får global påverkan, även om de koncentreras till regioner med tät trafik.

Bränslet utgör en stor och svåröversäglig del av **kostnaderna** för flyget, och det ligger i flygbranschens intresse att få ned bränsleförbrukningen. Ett flygbolag kan ha 50 procent av sina totala kostnader i form av bränslekostnader och det finns därför starka drivkrafter för branschen att hitta mer bränslesnåla och miljövänliga lösningar. Med tanke på att tillgången till olja är osäker på lång sikt vill man minska sitt beroende av fossila bränslen.

Flygbranschen är förstås också medveten om att flygets utsläpp är en politisk fråga och föremål för **regleringar** i form av exempelvis utsläppsrätter. Forsknings- och utvecklingsarbete krävs för att nå olika utsläppsmål.

Flyget i Europa präglas av **ineffektivitet** på flera sätt, till stor del som en följd av det fragmenterade luftrummet. Flygledningen sköts ofta nationellt, och regler och avgifter skiljer sig mellan olika länder. Ineffektiviteten leder till flygvägsförlängningar, vilket i sin tur orsakar utsläpp och buller. Ineffektiviteten skapar kostnader och förhindrar en framtida kapacitetsökning.

Flera stora **flygplatser** har nått taket för sin kapacitet. Om passagerarflyget ökar enligt prognoserna kommer framtidens utmaningar till stor del att handla om att kunna hantera flödet av passagerare på flygplatsen och att åstadkomma en bra infrastruktur för resor till och från densamma.

Ytterligare en drivkraft för utveckling är att minska bullret. Nya jetmotorer har minskat bullret med ca 20 decibel sedan 1970-talet, men **bullerfrågan** är ett av de viktigaste lokala miljöproblemen.

Ökad **flygsäkerhet** är givetvis också ett viktigt skäl för utveckling. Inom flygsektorn finns hårda regler för certifiering av exempelvis motorer och bränsle. Säkerhetsarbetet är centralt i utvecklingen av flygplanets konstruktion, motorerna, bränslet och utnyttjandet av luftrummet. ICAO håller sam-

man det internationella arbetet för flygsäkerhet. I Europa arbetar Europeiska byrån för luftfartssäkerhet (Easa) med flygsäkerhet.

## Utvecklingslinjer

Vilka tendenser kan då experterna se inom områdena flygplanskonstruktion, motorer, bränsle och flygtrafikledning?

### Flygplanskonstruktioner

**Vingarnas** utformning har stor betydelse för planets lyftkraft och luftmotstånd. Det pågår mycket forsknings- och utvecklingsarbete för att hitta bästa möjliga vingar till olika flygplan. Vingens area, tvärsnittsprofil, spännvidd, vinkel mot kroppen och anfallsvinkel (med vilken vingen möter luften) är avgörande för lyftförmågan. Lägst luftmotstånd har ett flygplan med långa slanka vingar, som på segelflygplan. Moderna trafikflygplan har ofta en svept (bakåtvinklad) vinge, då det ger lägre luftmotstånd vid farter nära ljudets hastighet. Stridsflygplan har i stället mindre spännvidd och triangelformade vingar som löper längs med flygplanskroppen, då det ger minsta möjliga luftmotstånd vid riktigt höga farter. Vingens tvärsnittsprofil är mycket viktig för en rad egenskaper hos flygplanet, till exempel luftmotståndet och lyftkraften, och vingprofilen måste samtidigt klara regn, is och smuts utan att egenskaperna drastiskt förändras.

Boeings Sonic Cruiser, med så kallade deltavingar, var i början av 2000-talet ett försök att skapa ett mycket snabbt passagerarflygplan för långflygningar. Japanska Hondajet, ett mindre jetflygplan, har vingar utformade för en stor andel laminära (icke-turbulenta) strömmar i hög fart, och motorerna är placerade ovanför vingarna. Det görs också försök med flygplan som kan ändra form på vingen under flygning, men det har hittills inte tillämpats inom det civila flyget.

**Flygplanskroppens** utförande bidrar också till lyftkraften, och forskning pågår för att effektivisera planens utformning. Kropparna är strömlinjeformade för att minska luftmotståndet. Att flygplan är cylinderformade beror på att det är bästa möjliga utformning för att åstadkomma trycksättning av kabinen, något som är nödvändigt på hög höjd. Försök pågår med annorlunda utformade konstruktioner. Global Flyer har tre kroppar för att bättre fördela tyngden över vingen som skapar lyftkraften. MIT:s Double Bubble är ett flygplan med betydligt bredare kropp och motorerna integrerade i kroppen längst bak, allt för att förbättra effektiviteten.

Flygplanets **vikt** är förstås också av stor betydelse för planets effektivitet. I traditionella plan är ofta mycket av vikten placerad i själva kroppen medan en jämn viktfordelning mellan kropp och vingar är önskvärd för att minska belastningen på vingen, framför allt vingroten nära flygplanets kropp. Det är en av anledningarna till att bränslet ofta förvaras i vingarna. Olika försök med integrering av kropp och vinge (blended wing body) pågår, eftersom det

skulle ge en ännu jämnare viktfordelning och därmed göra det möjligt att bygga ännu lättare plan. Det finns dock flera nackdelar med så kallade flygande vingar. En är att det skulle behövas landningsställ under hela planet för att klara av hårda landningar, men det skulle i sin tur kräva att landningsbanorna på världens alla flygplatser byggdes om. Det är också svårare att åstadkomma aerodynamisk effektivitet med en flygande vinge eftersom planet saknar stabilisatorer och stjärtparti. Flygande vingar är också svårare att trycksätta än traditionella flygplan.

Flygplan måste byggas i *material* som klarar höga belastningar men ändå är lätta. De flesta flygplan är byggda i lättmetall som limmas eller nitas. En nackdel med lättmetall är att det kan uppstå sprickor vid tillverkningen, sprickor som sedan växer vid belastning. En annan nackdel är att det kan vara svårt att åstadkomma ytor och utformningar som ger lågt luftmotstånd. Allt fler flygplan byggs därför av kompositmaterial (ofta blandningar av epoxiplast förstärkt med glas- eller kolfiber). Med komposit går det att konstruera vingar med högre styvhet och styrka, och det går att göra större och mer komplicerade delar i ett stycke än vad som är möjligt i lättmetall. Avigsidan är att man inte kan automatisera produktionen. Kompositmaterial reagerar också annorlunda vid skador, vilket ställer krav på ny kunskap och hantering.

Som tidigare nämnts tar utveckling av flygplan tid och kräver stora resurser. Det görs försök att hitta alternativ till *storsäljarna* Boeing 737 och Airbus 320. Hittills har de två stora tillverkarna dock valt att uppgradera befintliga modeller i stället för att ersätta dem med nya typer av flygplan. Boeings Sonic Cruiser, som presenterades i början av 2000-talet, var ett försök att utveckla en ny konfiguration. Planet var mindre, försett med deltavinge och kunde flyga fort, men krävde mer bränsle och var därmed dyrt i drift. Boeing valde att i stället satsa på den mer konventionella 787 (Dreamliner), som började användas 2009.

Bland de *riktigt stora flygplanen* dominerar fortfarande Boeing 747 (Jumbojet). Flygplanet debuterade under andra halvan av 1960-talet och har nyligen lanserats i en ny version. I samma storleksklass utvecklar Airbus den så kallade Superjumbon A380, som togs i bruk 2007. Men försäljningen av planen går mindre bra. Fokus bland flygbolagen verkar snarare vara på de något mindre så kallade wide body-planen, såsom Airbus 350, Boeing 787 och Boeing 777.

Under en period har *propellerflygplan* varit mindre efterfrågade. De bedöms kunna få en renässans om bränslepriserna höjs och man accepterar en något lägre flyghastighet. Tidigare utvecklades och flögs också *överljudsplan*, exempelvis Concorde och Tupolev TU-144. Utvecklings- och driftskostnaderna för överljudsplan är dock höga, och de anses inte realistiska. Eventuellt kan de komma att användas som mindre affärsplan.

Det görs försök att flyga med *solceller*. Solceller kan användas för flygning i låg fart, med stor uthållighet och räckvidd. Utvecklingen bedöms som intressant, men en praktisk tillämpning i större skala ligger långt fram i tiden.



Schweiziska Solar Impulse och NASA:s Helios och är exempel på två varianter.

Det pågår en mer experimentell utveckling utanför industrin. Många sedermera framgångsrika konstruktioner har faktiskt sitt ursprung i olika privatpersoners småskaliga experiment.

Det kan gå att nå en reduktion av bränsleförbrukningen med 50 procent på längre sikt, men för att nå större vinster än så krävs mer radikala koncept eller att man accepterar längre restider. Ytterligare reducering kan också uppnås om man anpassar flygplanets utformning till den optimala flygbanan, vilket till exempel kan innebära en snabb stigning och sedan en lång landning. Dagens flygplan är dock inte anpassade för den sortens flygning. Mest troligt är att utvecklingen går mot en ökad samverkan mellan flygplan och motor. Om förutsättningarna för flyget ändras mer radikalt kan man däremot tänka sig avsevärt förändrade flygplan.

Internationellt samarbete och långsiktighet är den bästa grunden för positiva förändringar. Snabba, genomgripande förändringar är däremot ovälkomna i en sektor som redan präglas av osäkerhet. Nationella regler bedöms inte ha någon större verkan.

För att sammanfatta är det inte troligt att flygplanens utformning ändras på något drastiskt sätt fram till 2030. Till 2050 är det däremot troligt att en betydande effektivisering sker.

## Motorer

Även om dagens jetmotorer är mycket mer effektiva än de tidiga motorerna finns det fortfarande potential till förbättring. Det är i dag endast ungefär 40 procent av det arbete som maximalt skulle kunna utvinnas ur bränslet som tas till vara. Resten går förlorat genom ineffektivitet i olika delar av motorn.

Ett aktivt utvecklingsarbete för att attackera förluskällorna pågår, och förbättringstakten på motornivå uppskattas till mellan 0,5 och 1 procent per år, beroende på hur radikal teknik som kommer att införas. Fram till 2050 beräknas det alltså vara möjligt att sänka bränsleförbrukningen med ungefär 20 procent inom ramen för förbättringar av befintliga motortyper. Tillämpas mer radikal teknik kan effektiviteten öka med ytterligare 15–20 procent. Sammantaget skulle utvecklingen alltså kunna leda till 35–40 procents minskad bränsleförbrukning.

Ett exempel på mer radikal teknik är en *mellankylt avgasvärmväxlande motor*. Den tar delvis till vara avgasvärmens som uppstår i motorn. Därmed behöver man inte värma upp luften lika mycket, och det går åt mindre bränsle. Tekniken bedöms som mogen, och motorn skulle kunna införas inom 10 till 15 år.

I en *pulsdetonationsmotor* är det möjligt att skapa tryckökning under förbränningen, och bränslet snarare exploderar än förbränns. Pulsdetonationsmotorn kan leda till 10 till 15 procents mindre bränsleförbrukning, men tekniken är inte tillräckligt utvecklad för att tas i bruk förrän uppskattningsvis kring 2050.

Ytterligare ett område är de material som används i motorn. Så kallade *keramiska matriskompositer* gör att kylningen av turbinerna blir mindre krävande eller kan tas bort helt, vilket sparar bränsle. Kompositerna har redan börjat införas, och de väntas få stor betydelse för framtidens motorer.

*Okapslade turbofläktmotorer* testades redan på 1980-talet, men intresset svalnade i takt med lägre oljepriser. Motorn har dock fått ny uppmärksamhet de senaste åren. Att motorn är okapslad innebär att rotorbladen ligger utanpå motorn. En vanlig motor driver en propeller i motorns front, men i en okapslad turbofläktmotor sitter propellerbladen i dubbla, motroterande, öppna kransar i motorns bakre del. Motorn gör att man kan flyga relativt snabbt och samtidigt öka effektiviteten och därmed sänka bränsleåtgången, i synnerhet vid något lägre hastighet än den som oftast tillämpas i dag. Tekniken är relativt mogen, och riskerna bedöms som måttliga, varför okapslade turbofläktmotorer kan väntas tas i bruk inom 10 till 15 år.

En *växlad fläkt* innebär att det finns en växel mellan fläkten och turbinen i motorn. På så sätt kan man göra större turbofläktmotorer utan att behöva minska turbinens varvtal, vilket annars är fallet. Tekniken har börjat införas och visar goda resultat. Bedömningen är dock att okapslade fläktmotorer kommer att bli mer effektiva än växlade fläktmotorer i framtiden.

Flygbranschen hyser inga större förhoppningar om utvecklingen av *batterier* som huvudsaklig energikälla för passagerarflygningar. Anledningen är att flyg kräver stor energitäthet, mycket större än exempelvis vägtrafik. Förbättringstakten för batterier har hittills legat kring 2 eller 3 procent per år. Boeing har utvecklat ett framtidskoncept som bygger på hybridteknik, Sugar Volt. Men om Boeing ska kunna flyga med Sugar Volt som planerat år 2050 skulle det kräva en nästan tredubbel utvecklingstakt, vilket inte kan anses realistiskt. På motsvarande sätt bedöms inte *bränsleceller* kunna utgöra ett möjligt alternativ som huvudenergikälla för kommersiell passagerartransport under överskådlig tid, då de i dag når ungefär samma energieffektivitet som batterier. Batterier och bränsleceller väntas dock kunna användas i exempelvis hjälpkraftaggregat och liknande tillämpningar.

## Bränslen

Flygplan tankas med jetbränsle (Jet A, eller flygfotogen) som tillverkas av råolja. Brist på fossila bränslen har under de senaste 100 åren lett till försök att hitta alternativa bränslen. Till exempel innebar andra världskriget, bojkotten av apartheidregimen i Sydafrika och 1970-talets oljekris att man intensifierade utvecklingen av icke-fossila bränslen.

Man kan göra flygbränsle av flera olika råvaror. Exempel på vegetabiliska råvaror är socker, sojaböner, oljedådra (ger camelinaolja), purgerbuske (ger jatrophaolja), olika sorters energigräs och halofyter (växter som trivs i saltvatten). Alger har en potential, bland annat eftersom de växer snabbt och ger stor avkastning per kvadratmeter jämfört med många andra råvaror. Alger kan också gå att odla i avloppsvatten, vilket kan vara en fördel. Vidare går det att använda olika biprodukter från skogs- och jordbruk, liksom hushållsavfall,

använd matolja eller animaliska fetter. Kol, naturgas och vätgas kan också utgöra råvara. Försök har gjorts att framställa flygbränsle av vatten och luft, men den processen kräver enormt stora energimängder.

Det finns flera orsaker till varför det tar tid att utveckla icke-fossila flygbränslen.

- Flygplan, motorer och bränsle har utvecklats tillsammans under lång tid, och det går inte att byta ut en av länkarna i den kedjan. Icke-fossila bränslen måste därför kunna fungera som och blandas med det konventionella bränslet.
- Höga säkerhetskrav gör att det tar lång tid att utveckla godkända flygbränslen, eftersom dålig kvalitet kan leda till fatala konsekvenser.
- Utvecklingen av nya bränslen innebär mycket stora utvecklings- och investeringskostnader, medan marknaden fortfarande är liten och osäker. Till exempel behövs bortåt 1 miljon liter bränsle enbart för att kunna få ett bränsle certifierat.
- Alla plan ska kunna tanka överallt i hela världen, och tekniska lösningar och regelverk måste därför kunna införas internationellt och för hela flygplansflottan. Det gör att det politiska multilaterala arbetet har stor betydelse för möjligheten att införa alternativa bränslen.
- Strävan efter hållbara bränslen avser även själva produktionsprocessen. En råvara som leder till minskad global matproduktion eller som i sig orsakar stora koldioxidutsläpp kan inte betraktas som hållbar.

I dag finns två certifierade processer för att tillverka jetbränsle som inte är petroleumbaserat, FT och HEFA. Ytterligare ett antal förväntas bli certifierade inom några år. De senaste fem åren har antalet flygningar med flygbränslen av biologiskt ursprung ökat. Man flyger dock inte enbart på alternativt bränsle, utan detta blandas med traditionellt bränsle.

Med **FT-processen** (Fischer–Tropsch) kan man tillverka flytande syntetiskt drivmedel genom att förgasa fast kol och bilda vätskeformade kolväten. De första försöken gjordes så tidigt som på 1920-talet, och metoden användes under andra världskriget och i Sydafrika under apartheidtiden. Förutom kol kan naturgas eller biomassa användas i FT-processen. Metoden ger rena drivmedel som skapar lägre halter av skadliga restprodukter när de förbränns. År 1999 certifierades FT för användning upp till 50 procents inblandning och 2008 som ett helt eget flygbränsle. Det Sydafrikabaserade företaget Sasol använder FT-processen och står för den enda storskaliga produktionen av alternativa jetbränslen i dag.

**HEFA-processen** (hydroprocessed esters and fatty acids) certifierades 2011. Råvaror till HEFA kan vara olja från fettrika växter, som jatrophaolja, camelinaolja, sojaolja och algolja eller animaliska fetter. Råvarorna väte- och värmebehandlas för att man ska kunna få fram ett jetbränsle.

Målsättningen är att kunna tillverka jetbränsle från en stor mängd förnybara råvaror. Socker och cellulosa utgör en stor del av de förnybara råvarorna, och mycket arbete ägnas åt att utveckla tekniker för att omvandla dessa till

bränsle, även om de kräver relativt många processteg från råvara till färdigt bränsle. En metod som väntas bli godkänd är *ATJ* (alkohol till jetbränsle) som förvandlar socker via alkohol till jetbränsle. En annan är *HDCJ* (hydro-treated depolymerized cellulosic jet), som utgår från lignocellulosa.

Processerna att framställa bibränslen är i sig energikrävande. HEFA-processen har till exempel en energieffektivitet på 38 procent. Dessutom krävs det fler processteg för att tillverka jetbränsle än andra drivmedel, vilket ytterligare minskar energieffektiviteten. Att framställa jetbränsle med HEFA har en så låg energieffektivitet som 6 procent.

Flygbolagen är mycket känsliga för variationer i bränslepriserna. Under de senaste tre åren har priset på jetbränsle legat mellan 0.69 och 0.88 USD per liter. Det är svårt att hitta en tillförlitlig uppgift om priset på alternativa jetbränslen. USA:s försvarsmakt har köpt FT-bränsle för 0.99 USD per liter och HEFA för 10.11 USD per liter. Enligt vissa uppgifter ligger kostnaden för att framställa HEFA på 1.01 till 1.16 USD per liter. Kostnaden för HEFA-bränsle är särskilt beroende av råvarupriserna.

Man försöker utveckla teknik för att använda *vätgas* som flygbränsle. Vätgas har dock andra egenskaper än konventionellt jetbränsle, och för att använda vätgas måste nya flygplan och motorer utvecklas. Dessutom krävs en egen global distributionskedja, vid sidan om den för konventionellt bränsle. EU-projektet Cryoplane studerade ett vätgasdrivet passagerarplan. Boeings vätgasdrivna Phantom Eye (ett obemannat spionplan) flögs första gången 2012. Vätgasdrivna bränsleceller kan också användas för att producera elektricitet som behövs när planet är på marken. Det minskar de lokala utsläppen kring flygplatsen, men bidrar i mycket liten utsträckning till en minskad användning av jetbränsle.

I Sverige är det *Swedish Biofuels* som har kommit längst med tillverkning av icke-fossilt flygbränsle. Swedish Biofuels utvecklar en process för att konvertera alkohol till jetbränsle. Pilotanläggningen vid KTH i Stockholm (som finansierats av det amerikanska försvarets forskningsråd Darpa och FMV) producerar ungefär 5 ton jetbränsle om året. Bränslet har testats av det amerikanska flygvapnet, och uppgifter gör gällande att det motsvarar uppställda krav. Resultaten från testerna är för närvarande föremål för analys för en möjlig certifiering.

I dagsläget bedöms det vara mer kostnads- och energieffektivt att använda förnybara drivmedel inom andra transportslag än luftfart, då de högt ställda kraven på jetbränsle innebär att tillverkningsprocesserna blir energi- och kostnadskrävande. I dag går det att producera FT-bränsle till ett konkurrenskraftigt pris, och det är möjligt att drivmedelsproduktion som kombineras med värmeverk kan komma att bli lönsam. Även om det alltså finns godkända förnybara bränslen som i dag används vid passagerarflygningar är både kostnaden och energiåtgången fortfarande högre än för andra användningsområden för samma bränsle.

## Flygtrafikledning

Tomas Mårtensson pekar på att flygtrafiktjänstens möjligheter att påverka flygets utsläpp av koldioxid är liten. I EU utgör flygtrafiktjänstens bidrag 6 procent av flygets totala utsläpp. Samtidigt menar han att det finns ett antal åtgärder som kan genomföras och som kan ge relativt snabba effekter.

Den kanske mest kända flygoperativa åtgärden för att minska bränsleåtgången är **gröna inflygningar**. En vanlig inflygning innebär ofta att man flyger i "trappsteg" ned mot flygplatsen, något som bullrar och drar mycket bränsle. Konceptet med grön inflygning innebär att piloten planerar flygningen så att inflygningen sker som glidflygning med motorerna på mycket lågt varvtal. På detta vis sparar man bränsle och minskar bullerbelastningen. Det ställer dock större krav på besättningen och är svårt att genomföra när det är mycket trafik.

**Bränsleoptimal fart** innebär att man flyger med en hastighet som gör att bränslet utnyttjas så effektivt som möjligt. Den bränsleoptimala farten är lägre än den hastighet man oftast flyger med i dag och skulle förstås leda till längre flygtider och minskad kapacitet. Ju högre flyghöjd, desto högre bränsleoptimal fart och vice versa. På inrikesflygningar kommer man oftast inte upp till bränsleoptimal höjd, vilket man gör under en långflygning.

Ett annat tillvägagångssätt för att spara bränsle är att använda mindre flygplan och **mellanlandningar**. Trots att man måste genomföra ytterligare en bränslekrävande stigning efter en mellanlandning sparar det bränsle jämfört med att flyga med ett större flygplan. Stora flygplan har nämligen oproportionerligt mycket mer bränsle ombord än mindre flygplan. Restiden blir naturligtvis längre när man måste mellanlanda för att tanka.

Att vid långa flygningar använda mindre plan som **lufttankar** under vägen sparar också bränsle, till och med om man räknar in tankflygplanens bränsleåtgång. Även lufttankning sänker hastigheten och därmed kapaciteten i flygsystemet.

Att som fåglarna flyga i **formation** används inom militärt flyg. Det har föreslagits även inom reguljärt flyg eftersom det minskar bränsleåtgången, men tillämpas inte i dag.

Ett ännu mer visionärt förslag är att ha mycket stora flygplan liggande under veckor eller månader i en **omloppsban**a runt jorden. Mindre flygplan skulle docka med det större och låta passagerare kliva av och på. Svårigheten skulle förstås vara att försörja dessa stora plan med energi under så lång tid.

Inom Europa strävar man efter en mer **sammanhållen flygtrafikledning** över nationsgränserna, bland annat för att minska flygvägsförlängningarna. EU driver sedan 2004 **Single European Sky** (SES), som syftar just till att effektivisera utnyttjandet av luftrummet i Europa. Inom SES bedrivs Sesar (Single European Sky ATM Research). Ett mål inom SES är att bilda nio samarbetsregioner, så kallade **funktionella luftrumsblock** (Functional Airspace Blocks, FAB). Sverige och Danmark utgör ett FAB och har dessutom bildat ett gemensamt företag, NUAC (Nordic Unified Air Traffic Control). **Fjärropererade flygledartorn** är något som utvecklats i Sverige inom ramen

för SES och som prövas på europeisk nivå för att öka effektiviteten. SES går dock långsamt, och kritik har riktats mot flera länder för att de inte samarbetar.

Flygtrafiktjänstens viktigaste uppgift är att upprätthålla flygsäkerheten. Det är framför allt säkerhetsaspekter som sätter gränser för hur många flygplan som kan lyfta, befinna sig i luften och landa samtidigt. Teknikutveckling av transpondrar och *gps-baserade informationssystem* för att minska kraven på fysisk separation av flygplan kommer att förbättra säkerheten och kunna leda till ökad kapacitet i systemet.

## Möjligheter och hinder för ett hållbart framtida flyg

De fyra experterna är ense om att det finns tekniska och operativa lösningar för ett framtida hållbart flyg. Det är däremot inte självklart hur avvägningarna ska göras mellan effektiviseringar inom ramen för etablerad teknik och mer radikala lösningar. Det är inte heller enkelt att besvara frågan om tekniska eller flygoperativa åtgärder är mest effektiva, eller hur snabba effektiviseringarna kommer att vara inom konstruktions-, motor- och bränsleutvecklingen.

Det finns i rapporten flera exempel på teknik som troligtvis kommer att vara införd i de plan som tas i bruk 2030. Redan i dag används olika lättviktsmaterial och kompositer i såväl flygplanskonstruktioner som motorer, och den utvecklingen kommer att fortsätta. Motorer som tar till vara delar av avgasvärmen kan vara i bruk 2030, liksom okapslade turbofläktmotorer. Fortsatta effektiviseringar genom vingarnas och motorernas placering är också troliga. En renässans för propellerplanen kan vara att vänta. Med hjälp av enbart konventionell teknikutveckling av befintliga motortyper uppskattas bränsleförbrukningen kunna minska med 20 procent de kommande 35 åren. Om dessutom teknikförbättringar av flygplanen och driften tas med blir denna effektivisering avsevärt större – uppskattningsvis det dubbla. Användningen av bränsle från förnybara råvaror som inte konkurrerar ut matproduktion eller leder till koldioxidutsläpp i framställningsprocessen kan väntas öka. Om metoderna för att framställa bränsle av socker eller cellulosa förbättras kan de komma att utgöra en allt större andel av råvarorna.

Det finns också exempel på mer omvälvande tekniska förändringar som skulle kunna leda till ökad effektivitet men som inte tros vara i drift före 2050. En integrering av flygplanskropp och vinge eller flygplan med två eller tre kroppar tillhör mer radikala tekniker. Pulsdetonationsmotorer kan leda till minskad bränsleförbrukning, men tekniken är inte tillräckligt utvecklad för att tas i bruk förrän uppskattningsvis kring 2050. Bränsle skulle också kunna sparas genom att man glidflyger under stora delar av resan, men det är inte dagens flygplan utrustade för. Det är också långt kvar innan det finns flygplan som använder solceller, batterier, bränsleceller och vätgas som huvudsaklig energikälla. Försök har gjorts att flyga på bränsle gjort av vatten och luft, men

det är mycket lång tid kvar innan en sådan process kan användas inom passagerarflyget, om ens någonsin.

Implementeringen av mer innovativa och omvälvande lösningar pågår parallellt med utvecklingen av den befintliga tekniken. Införandet av ny teknik går olika fort inom olika områden – till exempel händer det för närvarande mycket inom området flygmotorer.

Hindren för införande av ny teknik är stora. Ett är att utveckling av ny flygteknik tar tid. Eftersom det finns extremt höga krav på säkerhet måste ny teknik prövas under lång tid innan den kan certifieras och släppas ut på marknaden. Ett flygplan har också en lång livstid, ofta uppemot 30 år. Det är många parter och länder som ska komma överens när ny teknik och ny flygledning ska introduceras.

Flygplan, motorer och bränsle har dessutom utvecklats tillsammans och är beroende av varandra, vilket gör att man till exempel inte kan använda en ny motor utan att anpassa flygplanskonstruktionen och bränslet. Flygmarknaden är till sin natur en global marknad, och alla flygplan ska kunna tanka och landa i princip överallt, vilket skapar långa omställningstider. Vid utveckling av biobränslen bör man inte bygga in nya problem, såsom konkurrens med matproduktion eller koldioxidutsläpp under själva tillverkningsprocessen.

Investeringskostnaderna inom flyget är mycket omfattande, och i kombination med en delvis svårförutsägbar framtid som kan påverkas av ett skiftande oljepris, politiska regleringar eller extrema händelser som vulkanutbrott eller terrorism, leder det till en försiktighet hos aktörer som investerar i ny flygteknik.

Utvecklingen av flyget domineras därför av ett fåtal stora företag som noga bevakar varandras beslut och handlingar för att minimera risktagandet. Den hårda konkurrensen gör också att flygbolagen till exempel inte är beredda att förlänga flygtiderna, något som annars skulle kunna möjliggöra användning av ny teknik eller minska bränsleåtgången inom ramen för befintlig teknik. Den nya tekniken gör inte sällan att man ställs inför avvägningar mellan till exempel miljö och kapacitet eller mellan olika miljömål.

De praktiska och ekonomiska hindren är därför omfattande och anledningen till att många tror på förbättringar inom ramen för etablerad teknik snarare än en mer språngartad utveckling.

Ulf Ringertz sammanfattar i sitt avsnitt läget i följande meningar:

Det är [...] viktigt att påpeka att det inte är flygandet i sig som är problemet utan att vi flyger på det sätt som vi gör för att det är kommersiellt gångbart och det mest ekonomiskt lönsamma sättet att med dagens förutsättningar driva flygtrafik. Tekniskt är det fullt möjligt att ta fram helt andra koncept för trafikflyg med avsevärt lägre energiförbrukning och miljöpåverkan men de här flygplanen är med dagens förutsättningar inte kommersiellt gångbara. De stora osäkerheterna som radikalt kommer att påverka utformningen av det framtida trafikflyget ligger snarare på de kommersiella villkoren än de tekniska lösningarna.

Något som skulle kunna förändra utvecklingen är priset på drivmedel – höjda drivmedelskostnader skulle kunna leda till att mer radikal teknik tas i bruk.

Bränslepriset har historiskt haft stor pådrivande effekt på flygteknikutvecklingen, eftersom det är en betydande och svårförutsägbar utgift för flyget. Att minska drivmedelskostnaderna är därför en drivkraft för flygbranschen, oavsett miljö- och klimatperspektivet. Sedan den jetdrivna kommersiella trafiken inleddes under 1950-talet har bränsleförbrukningen minskat till mindre än 50 procent.

Den slutsatsen har stöd i andra, liknande undersökningar.<sup>76</sup> Trafikverkets rapport *Vi far vidare! Utvecklingen av fordon, flygplan, fartyg och andra farkoster till år 2050* kommer också till slutsatsen att utvecklingen inom flygtekniken styrs av oljepris och en löpande kostnadsjakt. Åtgärder som exempelvis utsläppsrätter kan enligt rapporten i bästa fall skynda på utvecklingen, men rapporten citerar intresseorganisationen Svenskt Flyg som menar att utvecklingen mot en mer effektiv flygplansflotta troligtvis ändå skulle äga rum.<sup>77</sup>

I rapporten *Fossilfri flygtrafik?* menar utredaren Arne Karyd att flygplans-tillverkarna tenderar att överdriva potentialen i framtida flygteknisk utveckling. Karyd menar att det finns ett stort antal tekniska utvecklingsspår, men att de drivkrafter som skulle kunna leda utvecklingen in på dessa spår, exempelvis stigande bränslepriser eller märkbara utsläppsavgifter, till stor del saknas.<sup>78</sup>

Martin Hagström menar att det i dagsläget bedöms vara mer kostnads- och energieffektivt att använda förnybara drivmedel inom andra transportslag än luftfart, då det ställs särskilt höga krav på jetbränsle. Även om det finns godkända förnybara flygbränslen är både kostnaden och energiåtgången fortfarande högre än för andra användningsområden för samma bränsle. Experterna lyfter dock fram att en gynnsam effekt av biobränslen kan vara att de kommer att erbjuda ett mer stabilt pris på drivmedel.

Experterna menar att det finns bättre möjligheter att åstadkomma mer omfattande miljöförbättringar genom teknisk utveckling av flygplan och motorer än med hjälp av flygoperativa åtgärder. De menar däremot inte att man ska avstå från att genomföra effektiviseringar inom det flygoperativa området. Gröna inflygningar, bränsleoptimal fart och minskade flygvägsförlängningar är exempel på betydelsefulla åtgärder som om de genomförs kan ge snabba miljövinster. Dessutom kräver flygoperativa åtgärder inte att man väntar på utveckling av ny teknik på samma sätt. Flygtrafiktjänsten har dessutom stor

---

<sup>76</sup> Det franska parlamentet har låtit utföra en motsvarande undersökning om flyget de kommande 30 åren. I den pekar man framför allt på den utmaning som bränslekostnaderna utgör för flyget.

Dessutom lyfter man fram ineffektivitet i flygtrafiken, flygplatsernas otillräckliga kapacitet samt civila drönare som framtida utmaningar. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques: *L'aviation civile: Préserver l'avance de la France et de l'Europe*, 2013.

<sup>77</sup> Trafikverket: *Vi far vidare! Utvecklingen av fordon, flygplan, fartyg och andra farkoster till år 2050*, 2012, s. 75–85.

<sup>78</sup> Arne Karyd: *Fossilfri flygtrafik? Underlagsrapport till utredningen om fossiloberoende fordonsflotta*, 2013, s. 1.



betydelse för möjligheten till framtida tillväxt inom flyget, som annars kommer att möta en rad kapacitetsproblem.

Det finns även inom flygtrafiktjänsten exempel på mer radikala åtgärder, som man inte bedömer kommer att tillämpas inom överskådlig tid. Lufttankning, formationsflygning och dockning till flygplan i ständig omlopps bana tillhör de mer visionära lösningarna.

Utvecklingen av olika flygoperativa åtgärder leder ofta till olika avvägningar. Ett val är dock enkelt: säkerheten sätts alltid främst. Åtgärder som leder till minskad bränsleförbrukning är också okontroversiella, av såväl miljömässiga som ekonomiska skäl. Andra operativa beslut kräver däremot att man gör bedömningar och avvägningar mellan olika mål. Till exempel ställs ofta miljön mot kapaciteten och inte sällan prioriteras då den senare. Till exempel har man vid flygplatsen London Heathrow valt att maximera antalet landningar genom att lägga flygplan i vänteläge över flygplatsen, med stora utsläpp som följd. På samma sätt kan åtgärder för att minska buller över bebyggda områden leda till flygvägsförlängningar och ökade utsläpp. Det är inte heller ovanligt att olika miljömål ställs mot varandra. Det går till exempel att undvika kondensationsstrimmor genom att anpassa flyghöjden, men det kräver mer bränsle, vilket leder till ökade koldioxidutsläpp.

Ulf Ringertz menar att internationellt samarbete och långsiktighet är den bästa grunden för ett hållbart framtida flyg. Snabba förändringar är däremot ovälkomna i en sektor som redan karakteriseras av stor osäkerhet. Nationella regler bedöms inte ha någon mer betydande inverkan på det globala flyget.

## 5. Ulf Ringertz: Flygplanskonstruktioner

### Flygplanskonstruktion för framtidens luftfart

Ulf Ringertz

#### 1 Bakgrund och historik

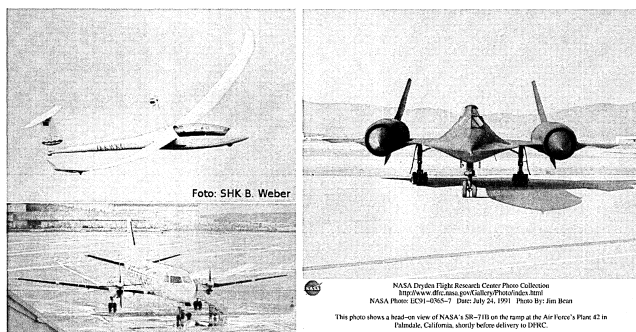
I början var flygplanens fart låg och det var fokus på att bygga lätt även om luftmotståndet blev högt bara för att komma upp i luften. Tekniska lösningar som fungerade bra var så kallade dubbeldäckare med två vingar ovanpå varandra med stöttor och stag för att ge en stark och mycket lätt konstruktion [1]. Tyvärr blir dock luftmotståndet högt på grund av alla stöttor och stag och toppfarten därför inte så hög.

Denna typ av flygplan dominerade fram till början av 1930-talet då högre fart blev möjlig tack vare starkare motorer. För att nå högre toppfart var det nödvändigt att minska luftmotståndet utan att vikten ökade för mycket. Flygplanen blev då allt mer strömlinjeformade med en huvudvinge och ett traditionellt stjärtparti med fena och stabilisator.

Andra världskriget innebar en häpnadsväckande snabb utveckling från relativt primitiva propellerflygplan med begränsade prestanda till raket- och jetmotordrivna flygplan med farter nära ljudhastigheten. Överljudsfart demonstrerades redan 1947 med det extrema raketmotordrivna flygplanet X-1 [2] och efter det fortsatte en snabb utveckling mot högre höjder och fart fram till 1960-talet. Kulmen blev kanske överljudsflygplanet Concorde [1] som trots en lyckad teknisk utformning aldrig blev ekonomiskt försvarbart att driva för flygbolagen.

Sedan 1970-talet har utvecklingen varit mer fokuserad på bättre driftsekonomi och säkerhet i små men väsentliga steg fram till dagens trafikflygplan. De idag vanligaste trafikflygplanen har i princip samma konfiguration sedan länge. Boeing 737 flög i sina första versioner redan på 1960-talet och Boeing har nyligen presenterat ännu en uppgradering med nya motorer och förbättrad aerodynamik för bättre driftsekonomi. De nya versionerna kommer att börja levereras runt 2020 och tillverkas i minst

10 år till och med en normal användningstid om 20-30 år kan det bli så att Boeing 737 som flygplanstyp används i nära 100 år. Bristen på konkurrens med bara två realistiska alternativ för större trafikflygplan gör det osannolikt att några radikala nya större flygplan presenteras i närtid. Tekniskt är redan idag, och i vissa fall sedan länge, helt andra koncept tillgängliga. Från hypersoniska övervakningsflygplan som Lockheed SR-71 i figur 1 som i nästa generation SR-72 [3] väntas kunna flyga i Mach 6, dvs



Figur 1: Elflygplan Arcus E, Saab 340 och hypersonisk SR-71.

ca 6000 km/tim, till små och effektiva regionalflygplan som Saab 340. Det finns även certifierade flygplan på marknaden med batterier och eldrift, som Schempp-Hirth Arcus i figur 1. Detta flygplan har extremt låga energibehov även för flygning på långa sträckor dock med väsentligt lägre fart, ca 150-200 km/tim, än dagens trafikflyg. Om batterierna laddas med till exempel vindkraft så finns redan idag ett effektivt flyg som är snabbare än tåg och utan utsläpp eller behov av fossila bränslen.

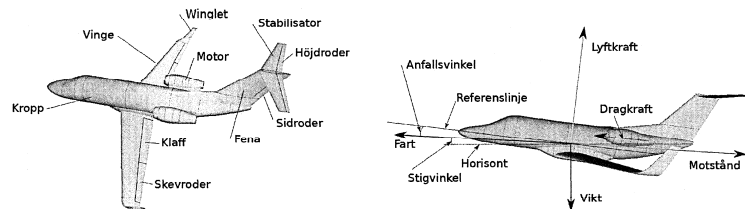
Den stora frågan är om utvecklingen kommer att fortsätta på samma sätt som tidigare med en fortsatt tro på ständigt tillväxt, ökad flygtrafik och befolkningstillväxt, trots negativ miljöpåverkan och ökade svårigheter att få energi och bränsle att räcka till. Det är dock viktigt att påpeka att det inte är flygandet i sig som är problemet utan att vi flyger på det sätt som vi gör för att det är kommersiellt gångbart och det mest ekonomiskt lönsamma sättet att med dagens förutsättningar driva flygtrafik. Tekniskt är det fullt möjligt att ta fram helt andra koncept för trafikflyg med avsevärt lägre energiförbrukning och miljöpåverkan men de här flygplanen är med dagens förutsättningar inte kommersiellt gångbara. De stora osäkerheterna som radikalt kommer att påverka utformningen av det framtida trafikfly-

get ligger snarare på de kommersiella villkoren än på de möjliga tekniska lösningarna.

Syftet med den här rapporten är att försöka ge en bild av varför flygplan ser ut som dom gör och hur möjliga framtida alternativ kan komma att se ut. Rapporten inleds med en sammanfattning av de viktigaste flygtekniska begreppen och egenskaperna hos flygplan för att senare i rapporten kunna motivera och förklara egenskaperna hos dagens flygplan i jämförelse med de förändringar som blir nödvändiga för att uppnå högre bränsleeffektivitet och reducerad miljöpåverkan.

## 2 Flygplanets delar och viktiga egenskaper

Fåglar ger på många sätt en bra bild av det effektiva flygplanet men bara vissa delar och egenskaper hos fåglar lämpar sig för större flygplan och högre hastigheter. Precis som fåglar har flygplan oftast en väldefinierad kropp och vingar, se figur 2 för namnet på de viktigaste delarna av ett flygplan. De flesta fåglar har ett stjärtparti som liknar den horisontella stabilisatorn på ett flygplan men saknar helt fena eller vertikal stabilisator. Fenan behövs normalt på ett flygplan för att säkerställa riktningstabilitet men det går, med vissa svårigheter, att konstruera flygplan som saknar fena. Fåglarna klarar sig uppenbarligen fint utan fena och kan genom att hela tiden anpassa hela sin geometri uppnå en extrem flexibilitet och manöverförmåga som är mycket svår att uppnå med konventionella flygplan.



Figur 2: Definitioner av flygplanets delar och viktiga krafter.

Fåglar kan på ett imponerande sätt ändra sin vinges form vid olika typer av flygning, tex helt utfällda vingar hos en rovfågel som spanar efter ett byte som sedan delvis faller ihop vingarna vid dykning och anfall mot ett byte. Konventionella flygplan försöker också ändra vings form för

olika typer av flygning med hjälp av roder och klaffar. Klaffar på flygplan fälls normalt ut delvis vid start och helt vid landning för att öka förmågan till bibehållen lyftkraft i låg fart. Klaffar finns på moderna trafikflygplan både längs framkanten av vingen och längs den inre delen av bakkanten på vingen.

Vingens förmåga att skapa lyftkraft beror främst på farten, vingens storlek eller yta, anfallsvinkeln och luftens densitet [4]. Anfallsvinkeln, dvs vinkeln mellan en referenslinje, till exempel i vingens tvärsnitt eller vingprofil, och flygplanets rörelseriktning kan inte vara hur stor som helst om lyftkraften skall räcka till att bära flygplanets vikt. Om farten sjunker så måste detta kompenseras av högre anfallsvinkel men till slut kan inte luften följa vingens översida utan sägs separera från vingytan vilket leder till att lyftkraften drastiskt sjunker och flygplanet sägs ställa [1], eller överstegra. Den maximala anfallsvinkeln för ett flygplan med någorlunda raka vingar ligger på ca 15 grader men kan vara högre på flygplan med annan form på vingen. Deltavingar, på till exempel ett stridsflygplan, kan skapa lyftkraft även för stora anfallsvinklar men då till priset av mycket högre luftmotstånd.

Den lägsta fart flygplanet kan flyga med utan att ställa kallas stallfarten och bestämmer vilken fart som flygplanet minst måste ha vid start och landning. Med viss säkerhetsmarginal ligger denna fart på ca 200 km/tim för ett trafikflygplan medan ett äldre stridsflygplan optimerat för hög hastighet kan ha så hög landningshastighet som 300 km/tim. Ett mindre motor- eller segelflygplan har en start och landningsfart på runt 100 km/tim.

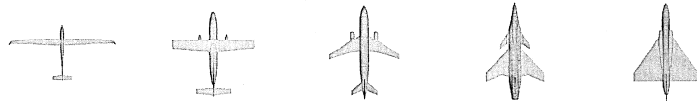
I hög fart, för ett modernt trafikflygplan ca 850 km/tim, skulle vingen kunna vara mindre men ändå skapa tillräcklig lyftkraft. Trots att luften har lägre densitet på hög höjd så skapas ändå tillräcklig lyftkraft vid måttliga anfallsvinklar på grund av den höga farten. Det är därför önskvärt att kunna variera formen och storleken på vingen i olika situationer, framför allt vid start och landning jämfört med flygning på långa sträckor på hög höjd. Flygplan optimeras oftast för effektiv flygning på hög höjd och hög fart och sedan får man modifiera och anpassa för att säkerställa säker start och landning på de landningsbanor som är aktuella. Högre fart vid start och landning skulle vara önskvärd men är oftast inte möjlig på grund av banans längd och risken för punktering i hög fart. Vingens storlek i spännvidd (avstånd mellan vingpetsar) och korda (avstånd mellan vingens framkant och bakkant) bestäms därför av flygplanets vikt och behov av lyftkraft i den lägsta farten.

### 3 Aerodynamik och prestanda

När vingens storlek har bestämts för att bära flygplanets vikt i det önskade fartområdet är nästa steg att försöka optimera flygplanets prestanda. Prestanda begränsas i huvudsak av flygplanets luftmotstånd och flygplanets vikt. Luftmotståndet kan delas upp i två väsentliga delar, så kallat nollmotstånd och inducerat motstånd. Nollmotståndet är den del av motståndet som flygplanet har när lyftkraften är noll och det inducerade motståndet är den del som förorsakas av att lyftkraft skapas.

Andra transportmedel som bilar och tåg har ett luftmotstånd som kan liknas vid nollmotståndet för ett flygplan eftersom bilar och tåg sällan önskar skapa lyftkraft. Tåg och markfordon har dock ett rullmotstånd som beror på däck, hjul och friktion mellan dessa och räls eller väg och annan friktion i kullager och liknande. Ofta är detta rullmotstånd några enstaka procent av tyngdkraften vilket motsvarar det lyftkraftsinducerade motståndet på ett aerodynamiskt effektivt flygplan i hög fart. Det finns egentligen ingen principiell effektivitetsfördel för vare sig tåg eller andra markfordon jämfört med ett flygplan. Fördelen med tåg är framförallt möjligheten att effektivt bära mycket tung last eftersom mycket tung last skulle göra flygplanets vingar opraktiskt stora för att nå likvärdig effektivitet. För lättare last, till exempel persontransport, är flygplanet det i särklass mest effektiva sättet att transportera sig.

Det inducerade motståndet, dvs den del av motståndet som uppstår när lyftkraft skapas, kan reduceras genom en bra utformning av vingens så kallade planform. Vingens planform är den geometri som vingen har vid betraktelse ovanifrån. Exempel på olika typer av planform visas i figur 3.



Figur 3: Planform för olika flygplanstyper.

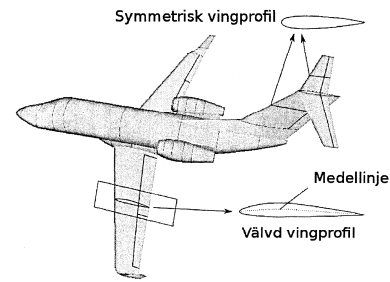
Minsta möjliga inducerade motstånd får flygplanet om spännvidden är mycket stor i förhållande till vingens korda, det så kallade sidoförhållandet. Segelflygplan, med planformen längst till vänster i figuren, optimeras för att minimera det totala motståndet vilket resulterar i långa

slanka vingar för lågt inducerat motstånd samtidigt som övriga delar utformas för minsta möjliga nollmotstånd. Mindre propellerflygplan ges ofta en enklare geometri med rektangulär planform enligt nummer två från vänster i figuren. Här tas många andra praktiska hänsyn som att vingen skall vara enklare och billigare att tillverka samt att för stor spännvidd kan vara opraktisk vid parkering på plattan och i hangaren men allt detta kostar i form av lite sämre prestanda.

Moderna trafikflygplan har oftast svept vinge enligt flygplanet i mitten vilket representerar en Airbus A300. Den svepta vingen leder till lägre luftmotstånd i hög fart nära ljudets hastighet [2]. Här har flygplanets vingplanform optimerats för att ge lågt motstånd i hög fart lite på bekostnad av motståndet i lägre fart där flygplanet oftast inte flyger någon längre tid. Moderna stridsflygplan har vingar med liten spännvidd och ofta med formen av en så kallad deltavinge. Dessa flygplan måste utformas på detta sätt för att kunna flyga fortare än ljudets hastighet, dvs Mach-tal större än ett. Flygplan med raka vingar och stor spännvidd får orimligt stort luftmotstånd vid högre så kallade transoniska farter där mycket komplicerade aerodynamiska fenomen som stötvågor, expansionsvågor och separation uppträder.

Flygplanets planform måste anpassas till det tänkta fartområdet för flygplanet men för lägsta luftmotstånd i lägre farter är segelflygplanet den bästa utformningen. Det finns ett fåtal exempel på flygplan som kan ändra planformen under flygning, till exempel genom att variera vingens svepning. Exempel på detta är det europeiska stridsflygplanet Tornado och amerikanska F-14, F-111 och bombplanet B-1. Trots att detta är tekniskt möjligt är det praktiskt komplicerat att få till en bra konstruktion med låg vikt.

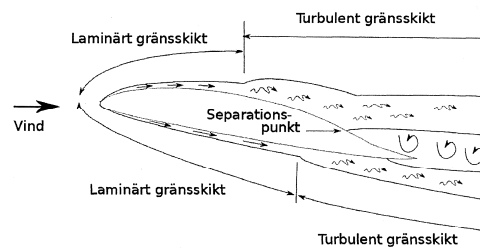
Nästa steg i den aerodynamiska utformningen av flygplanet blir ofta att välja så kallade vingprofiler på de olika aerodynamiska ytorna på flygplanet. Vingprofilen är ett tvärsnitt av vingen, fenan eller stabilisatorn enligt figur 4. Vingens profil är mycket viktig för en rad egenskaper hos flygplanet. Profilen skall vara sådan att luftmotståndet är lågt, och sådan att lyftkraften bibehålls upp till höga anfallsvinklar för att ge bra egenskaper vid start och landning. Samtidigt skall förloppet vid stall vara okomplicerat och vingprofilens egenskaper skall vara okänsliga för störningar som regndroppar, isbildning och smuts. För att uppnå dessa egenskaper väljs oftast välvda vingprofiler för vingen, som framförallt skall skapa positiv lyftkraft, medan fena och stabilisator ofta får symmetriska vingprofiler eftersom dessa ytor skall skapa både positiva och negativa lyftkrafter för



Figur 4: Vingprofiler till flygplanets olika delar.

att kunna manövrera och stabilisera flygplanet.

Utveckling av effektiva vingprofiler är en hel vetenskap i sig som bygger på en nära samverkan mellan försök i vindtunnlar [4] och numeriska simuleringar [2] av aerodynamiken. Strömningen runt en vingprofil är komplicerad även i låga farter vilket illustreras i figur 5.



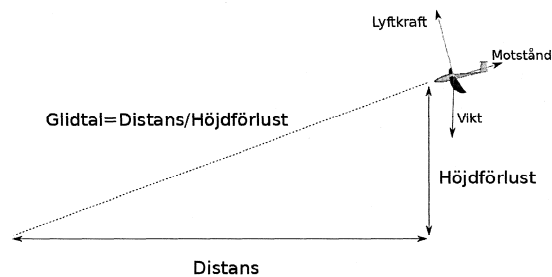
Figur 5: Strömning kring en vingprofil.

Närmast vingytan bromsas hastigheten upp av friktionskrafter och detta område kallas för gränsskikt. I början, framtill på vingen, så är strömningen laminär och välordnad. Det laminära gränsskiktet ger det lägsta luftmotståndet men är känsligt för störningar. Av olika skäl slår strömningen i gränsskiktet om till att vara turbulent, dvs kaotisk med många små virvlar av olika storlek. Den så kallade omslagspunkten från laminär till turbulent strömning är svår att förutsäga men mycket viktig för



flygplanets luftmotstånd och därmed prestanda. Både det laminära och det turbulenta gränsskiktet kan slå om till helt separerad strömning med stora virvlar och avsevärt reducerad lyftkraft. När strömningen längs vingytan har separerat sjunker lyftkraften väsentligt. Även luftmotståndet ökar dramatiskt och det är vid detta fenomen där stora delar strömningen över vingen är separerad som flygplanet stallar och i princip faller som en sten. För bästa möjliga prestanda försöker flygplanskonstruktören använda eller utveckla vingprofiler som ger så mycket laminär strömning som möjligt utan allt för stora negativa egenskaper i övrigt.

Ett mycket bra och användbart mått på flygplanets totala aerodynamiska effektivitet är det så kallade glidtalet. Glidtalet är kvoten mellan lyftkraften och motståndet, vilket man kan visa också blir den distans man kan flyga utan motor från en given höjd innan flygplanet når marken enligt figur 6. Lyftkraften ges i princip av flygplanets vikt och ju lägre luftmotståndet är desto bättre blir glidtalet och flygplanets förmåga att glidflyga en lång sträcka utan motor.



Figur 6: Glidtalet och flygplanets räckvidd utan motor för given höjd.

Ett modernt segelflygplan har ett glidtal på ca 50 vilket innebär att flygplanet kan glidflyga 50 km distans innan marken tar emot om utgångshöjden är 1 km. Detta innebär också att den nödvändiga dragkraften från en motor bara behöver vara 2% (dvs 1/50) av tyngdkraften för att flygplanet skall kunna flyga med konstant höjd i den fart som ger bästa glidtal. Med en flygplanvikt på 500 kg och en fart på 100 km/tim blir då den nödvändiga dragkraften endast 100 Newton, dvs tyngdkraften av en massa på 10 kg. Motsvarande effektbehov hos tex en elmotor blir bara

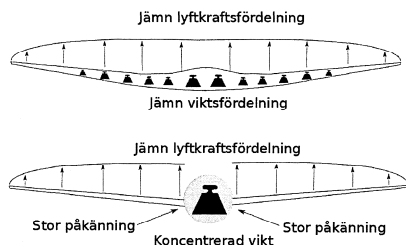
3 kilowatt ungefär som en så kallad EU-moped fast nu med farten 100 km/tim. Om en förbränningsmotor i stället används blir bränsleförbrukningen så låg som 0.03 liter per mil vid 100% motoreffektivitet.

Flygplan som optimerats för andra fartområden har sämre bästa glidtal. Vanliga trafikflygplan har glidtal på ungefär 20-25 under de mest gynnsamma omständigheterna medan ett modernt stridsflygplan med delta-vinge bara når ca 10 i glidtal. De mest extrema segelflygplanen har idag glidtal på 70 och i framtiden kanske det går att nå 100 vilket skulle ge väldigt energisnåla motorflygplan med motsvarande aerodynamiska utformning.

Även det mer blygsamma glidtalet hos moderna trafikflygplan har i ett fåtal extrema incidenter visat sig mycket användbart. Ett exempel är den Airbus 320 som år 2009 strax efter start från La Guardia flygplatsen i New York flög in i en flock stora fåglar som förstörde båda motorerna [5]. Piloten, som även var en erfaren segelflygare, konstaterade snabbt att höjden på 1000 meter skulle räcka till ca 20 km flygning. Efter en snabb bedömning beslöt piloten att höjden var otillräcklig för att nå närmaste flygplats men att han kunde flyga runt Manhattan och göra en säker utlandning på Hudson River i stället. Liknande situationer har uppstått i samband med bränsleläckage och felaktig tankning som lett till att trafikflygplan har fått slut på bränsle på hög höjd. Vid en normal flyghöjd på 10 km räcker glidtalet till en landning inom en radie på 200 till 250 km. Lågt luftmotstånd och högt glidtal är således även en mycket viktig egenskap för ökad säkerhet.

## 4 Krafter på flygplanets struktur

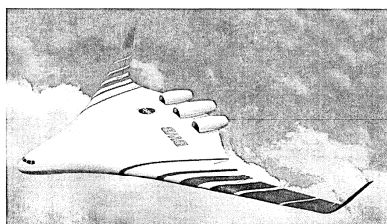
För att nå hög effektivitet skall flygplanet ha lågt luftmotstånd men även låg vikt vilket reducerar behovet av lyftkraft och därmed inducerat motstånd. För de flesta moderna trafikflygplan skapas lyftkraften av vingarna medan en stor del av vikten i form av passagerare, bagage och annan last placeras i flygplanets kropp. Denna utformning, som illustreras i figur 7 med vy framifrån flygplanet, gör att stora krafter måste omfördelas i flygplanets struktur för att lyftkraften i vingarna skall kunna bära flygplanets kropp. Detta kräver en stark konstruktion av vingen, framförallt i den del av vingen som är nära kroppen på grund av den långa hävarm som skapas av långa slanka vingar. Till viss del försöker konstruktören förbättra läget genom att placera allt bränsle i vingarna. Den bästa utformningen ur denna synvinkel får flygplanet om all vikt kunde fördelas över hela



Figur 7: Inverkan av viktfördelning på vingens belastning.

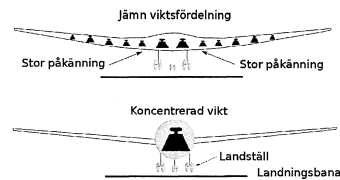
vingen vilket illustreras i den övre bilden av figur 7.

På senare tid har en del futuristiska koncept för framtida flygplan presenterats i formen av en mer integrerad konstruktion för kropp och vinge, så kallad *Blended Wing Body*. Ett sådant koncept från en studie av NASA visas i figur 8 men även det klassiska svenska stridsflygplanet J35 Draken har denna utformning. Den stora fördelen med en flygande vinge är att



Figur 8: Flygande vinge eller *Blended Wing Body (BWB)*, Foto: NASA.

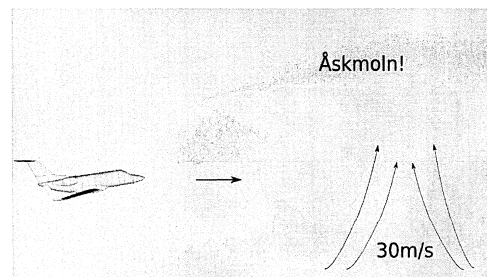
lasten kan fördelas jämnare i hela flygplanet och lyftkraften behöver då inte omfördelas från vingar till flygplanskropp. Tyvärr finns det nackdelar med den flygande vingen. Vid landning måste landstället ta hela vikten och även mer vid en hård landning och då är det istället bättre att ha all vikt i kroppen om landstället och hjulen är placerat där vilket visas i figur 9. En flygande vinge skulle helst ha många små landställ fördelade över hela vingen där lasten är placerad men det kan bli opraktiskt när landningsbanan och taxibanorna på flygplatsen är smala. Vidare så är det lite svårare att få bra aerodynamisk effektivitet när flygplanet saknar



Figur 9: Laster på flygplanet vid landning.

stabilisator och konventionellt stjärtparti eftersom vingens svepning och även förvriddning måste anpassas för stabilitet på bekostnad av luftmotståndet. Utöver detta kan det vara svårt att få till en bra utformning som tillåter tryckkabin. För att kunna flyga på hög höjd behöver passagerarkabinen trycksättas vilket ger stora krafter i flygplanets kropp. Detta är en av anledningarna till att trafikflygplan har en kropp med nära cirkulärt tvärsnitt eftersom detta är den utformning av ett tryckkärl som ger lägsta vikt.

Utöver belastningar på flygplanet vid normal flygning, manövrar, start och landning måste även flygplanet klara en del mer kritiska situationer under flygning. En mycket viktig typ av belastning som ofta bestämmer utformningen av flygplanets struktur är så kallade vindbylaster. Dessa laster uppstår när flygplanet passerar genom ett område med kraftiga vertikala luftströmmar. Dessa luftströmmar förekommer ofta i samband med termik under cumulusmoln och framförallt i samband med åskväder och stora cumulonimbusmoln som illustreras i figur 10. I ett stort åskmoln



Figur 10: Vindbylaster vid flygning genom åskmoln.

kan vertikala luftströmmar på 30 m/s förekomma och trafikflyget försöker därför om möjligt att undvika flygning nära och i åskmoln. Flygplanet måste dock konstrueras för att tåla kraftiga och plötsliga vertikala luftströmmar. När flygplanet flyger in i en sådan vertikal luftström sker en kraftig momentan ökning av lyftkraften och på grund av att flygplanets vikt ofta är koncentrerad till kroppen så blir belastningen på vingen mycket stor. Därför måste konstruktören se till att strukturen klarar sådana belastningar utan att vikten blir för hög.

#### 4.1 Struktur och material

De första flygplanen byggdes i enkla men lätta material som impregnerad textilfiberduk, trä och i vissa fall stålrör. Med dessa material går det att bygga mycket lätta flygplan men det kan vara svårt att få till tillräcklig styvhet och styrka utan stöttor och stag som ökar luftmotståndet rejält. Man kan enkelt säga att dessa tidiga flygplan har högt nollmotstånd men lägre lyftkraftsinducerat motstånd på grund av den låga vikten. Den låga vikten i förhållande till vingytan ger låg starthastighet men det höga nollmotståndet ger även låg toppfart.

Sedan slutet av andra världskriget har större flygplan till största del varit konstruerade i lättmetall, vanligtvis i olika former av aluminiumlegeringar. Stål och titan används i vissa kritiska komponenter med väldigt hög belastning som landningsställ. Flygplanets vitala delar som skrov och vingar utformas oftast som tunna skalkonstruktioner med olika former av inre förstävningar [4]. Även taket i figur 17 är ett tydligt exempel på en sådan utformning av strukturen. Den yttre skalplåten förbinds med de olika förstävningarna med nitar eller limning. Svetsning är inte så vanligt eftersom den mycket tunna plåten, ofta under 1mm tjock, är svår att svetsa utan att deformeras väsentligt på grund av den höga värmen vid svetsning.

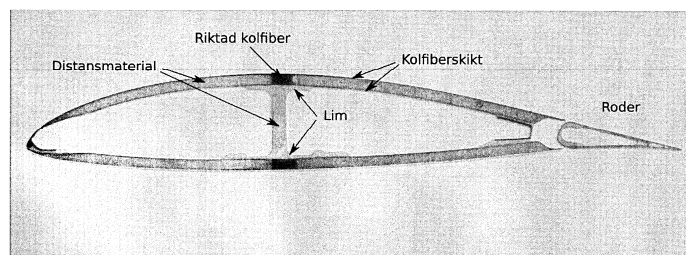
Lättmetall har dock vissa svagheter som att små sprickor lätt uppstår redan vid tillverkning och bearbetning. Dessa sprickor växer sedan under flygplanets användning på grund av att belastningen på flygplansdelarna är höga och mycket varierande. Flygplanets struktur och material måste utformas med höga belastningar för att spara vikt. Det finns idag god kunskap om hur flygplansstrukturer i metall skall utformas och metoder finns för att med rimligt hög noggrannhet bestämma hur olika sprickor och defekter kan påverka hållfasthet och säkerhet under hela flygplanets livslängd. Genom att kombinera väl utförd detaljkonstruktion med lämp-

liga underhållsinsatser och regelbundna inspektioner kan lätta flygplan byggas med mycket hög säkerhet och tillförlitlighet.

En annan nackdel med förstyvad lättmetallkonstruktion är att det kan vara svårt att få hög ytfinish och tillräckligt hög noggrannhet i form med denna konstruktionsmetod. För att minska luftmotståndet på framförallt vingarna krävs laminär strömning på stora ytor och detta kräver mycket hög finish och korrekt geometri eftersom den laminära strömningen är känslig för störningar.

Segelflygplan som kräver mycket laminär strömning för bra prestanda tillverkas sedan 1960-talet nästan helt utslutande i kompositmaterial. Med kompositmaterial menas vanligen att olika material blandas, vanligtvis epoxiplast förstärkt med glasfiber eller kolfiber, för att utnyttja goda egenskaper hos flera material samtidigt. Med kolfiberförstärkt epoxiplast går det att konstruera flygplansvingar med betydligt högre styvhet och styrka än vad som är möjligt i lättmetall med samma vikt. En annan fördel med kompositmaterial är att det går att tillverka större och mer komplicerade delar i ett stycke än vad som enkelt låter sig göras i lättmetall.

Ett tvärsnitt av en flygplansvinge visas i figur 11. I det här fallet nyttjas

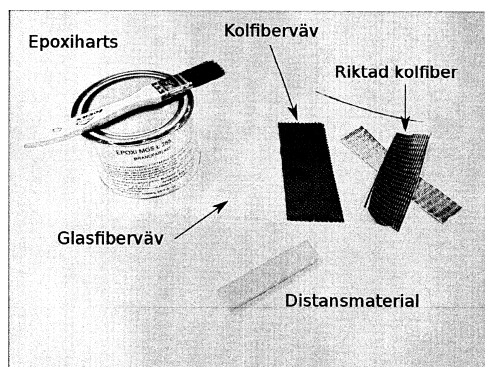


Figur 11: Tvärsnitt av vinge i kompositmaterial.

även så kallad sandwichkonstruktion där tunna kolfiberskikt limmas på var sin sida av ett lätt distansmaterial. Distansmaterialet är normalt en skumplast av låg densitet, tex 80 kg per kubikmeter. Distansmaterialet separerar de två mycket tunna skikten av kolfiber och stabiliserar dessa så att det tunna kolfiberskiktet inte bucklar eller skrynklar sig vid belastning. Kolfiberskikten i vingytan kan därmed göras mycket tunna, ner mot några få tiondels millimeter tjocka. I vissa delar används riktad kolfiber, där alla fibrer ligger i samma riktning, för att uppnå mycket hög styvhet utan att vikten blir hög. Riktade fiber används till exempel där vingpro-

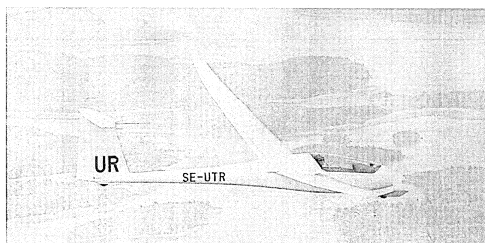
filen är som tjockast för att få hög styvhet när vingen böjer sig under de aerodynamiska krafterna.

De olika ingredienserna för ett flygplansbygge i kompositmaterial visas i



Figur 12: Ingredienser för flygplansbygge.

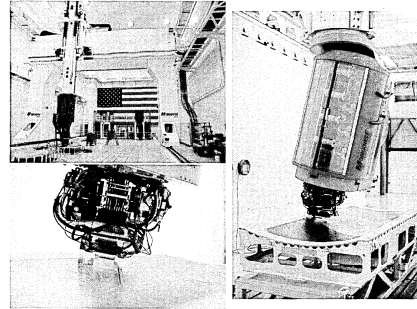
figur 12. Flygplanets delar byggs upp genom att väven impregneras med epoxiplast i ett formverktyg. Plasten härdas sedan under uppvärmning och bildar den slutgiltiga kompositdelen. Flygplanets olika delar limmas sedan samman till det kompletta flygplanet. Flygplanet i figur 13 är nästan helt byggt i kolfiberkomposit. Endast landställ, hjul, huvuglas och styrsystem innehåller andra material.



Figur 13: Segelflygplan av typen Ventus 2cx1.

Vid tillverkning av kompositmaterialdelar i större industriell skala pågår en ständig utveckling att försöka automatisera produktionen. I det här fallet används ofta förimpregnerade fiberknippen med ohärdad epoxiplast och till exempel kolfiber. Stora maskiner, se figur 14, används sedan

för att med hög precision lägga ut fiber i rätt mönster och många lager i ett formverktyg. Den automatiserade tillverkningen har många fördelar



Figur 14: Automatiserad produktion (Foto: Ingersoll Machine Tools, Inc).

som bättre precision, bättre arbetsmiljö och repeterbarhet i jämförelse med att vävarna läggs upp för hand vilket är den vanligaste metoden bland tillverkarna av mindre flygplan. Nackdelen med den automatiserade produktionen är mycket höga investeringskostnader och vissa svårigheter att klara av tillverkningen av delar med mycket komplicerad geometri.

Avancerade kompositmaterial gör det möjligt att kombinera olika materials egenskaper på sätt som optimerar egenskaper efter funktion och nytta. Tillförlitlig konstruktion och produktion till rimliga kostnader och hög precision är dock fortfarande en utmaning. Detta har även de stora tillverkarna fått erfara på senare tid [6].

Kompositer kan även tillåta större deformationer utan att permanent skadas vilket kan leda till mer flexibla flygplan än idag. Detta leder till ökat behov av kunskap kring samverkan mellan luftkrafter och deformationer, så kallad aeroelasticitet. Aeroelastiska fenomen som oönskade vibrationer (fladder) och deformationer som försämrar effektiviteten hos roder är väl kända och analyseras noga vid konstruktion och certifiering av nya flygplan. Aeroelastiska fenomen kan även i vissa fall användas för att förbättra prestanda, så kallad *aeroelastic tailoring*. Med ökad kunskap om detta kan flygplan byggas ännu lättare utan att äventyra säkerhet och prestanda.

Det finns även möjligheter att integrera sensorer i kompositmaterial för övervakning av tillstånd och upptäckt av skador vilket kan göra det möjligt att minska säkerhetsmarginaler och därmed vikten på flygplanet.

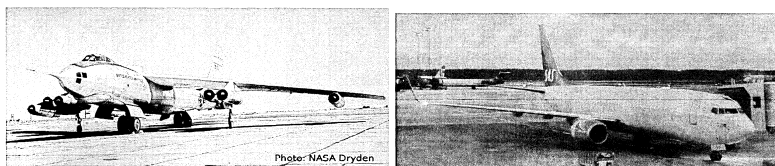


Andra aktuella forskningsområden utreder möjligheter att integrera ännu fler funktioner. Ett sådant område är strukturella batterier [7] där batteriet tillverkas i ett material som även kan användas för att bära last och ta upp krafter i strukturen. På så vis skulle batteriet inte bara lagra energi och vara en extra vikt i flygplanet utan en del med flera bra funktioner.

Ytterligare möjligheter finns att med perforerade material påverka gränsskiktet i strömningen runt vingen och andra delar av flygplanet. Genom att blåsa ut luft genom perforeringen alternativt suga in luft kan gränsskiktet påverkas och möjligheter finns att på detta sätt minska luftmotståndet men även öka effektiviteten i flygplanets roder.

## 5 Vanliga flygplanstyper

Den mycket snabba utvecklingen under andra världskriget kulminerade med de nya jetmotordrivna flygplanen med väsentligt bättre prestanda än de tidigare propellerdrivna flygplanen. Till en början fokuserades utvecklingen på mindre jaktflygplan men mot slutet av kriget började USA utvecklingen av ett större jetmotordrivet bombflygplan. Det nya bombflygplanet B-47 [1] som visas i figur 15 fick en unik utformning med



Figur 15: Det revolutionerande flygplanet B-47 och efterföljaren B-737.

svepta vingar. Kunskapen om svepta vingars inverkan på luftmotståndet var väl kända bland tyska forskare redan under kriget och USA kunde i krigsslutet samla in de tyska erfarenheterna och använda informationen vid utveckling av B-47. De mest karaktäristiska egenskaperna hos B-47 med långa slanka svepta vingar och motorerna placerade i gondoler under vingarna gjorde det möjligt att flyga nära ljudhastigheten under långa sträckor. Flygplanet B-47 kan sägas representera grunden för alla större moderna jetmotordrivna trafikflygplan som tex Boeing 737 i figur 15. Den väsentliga förbättringen på senare år har främst handlat om ökad säkerhet samt lägre ljudnivå och reducerad bränsleförbrukning genom avsevärt förbättrade jetmotorer.

## 5.1 Moderna propellerflygplan

Moderna propellerflygplan har utvecklats parallellt med de jetmotordrivna trafikflygplanen. Framförallt mindre regionalflygplan, som Saab 340 och Saab 2000, har delvis varit kommersiellt framgångsrika på mindre trafikerade rutter som en del av ett större nätverk. Tyvärr hände några spektakulära olyckor [8] under 1990-talet som fick passagerarna att tro att propellerflygplan var generellt mer osäkra trots att olycksorsakerna inte var direkt kopplade till att det just handlade om propellerflygplan. Detta i kombination med låga bränslepriser och högre ljudnivå gjorde att de mindre propellerflygplanen konkurrerades ut av mindre jetmotordrivna regionalflygplan. Passagerarna ville helt enkelt flyga fortare i något som mer liknade de större trafikflygplanen.

Det är dock troligt att med högre bränslepriser så är propellerflygplanen med effektiva turbopropmotorer, dvs en gasturbin som driver en stor propeller, mer kostnadseffektiva än de mindre jetmotordrivna regionalflygplanen. Framförallt blir skillnaden väsentlig om det blir acceptabelt att flyga med lägre fart för att spara bränsle. De långsammare propellerflygplanen har även något annorlunda konfiguration med raka vingar då detta är mer aerodynamiskt effektivt om farten är väsentligt lägre än ljudets hastighet, till exempel halva ljudhastigheten eller Mach 0.5.

De modernaste regionalflygplanen som fortfarande tillverkas är mycket lika Saab 340 i figur 1. Då de flesta tillverkare lagt ned tillverkningen av propellerdrivna regionalflygplan så har faktiskt lönsamheten och volymerna förbättrats för de tillverkare som är kvar.

## 6 Alternativa konfigurationer

Det finns många olika alternativa konfigurationer för trafikflygplan vilka kan ha potential att ge stora prestandaförbättringar eller kraftigt reducerad bränsleförbrukning och miljöpåverkan. Tyvärr så dominerar de två stora tillverkarna Airbus och Boeing marknaden för större trafikflygplan och det är lätt att få intrycket av att de mest lurpassar på varandra och inte vill ta för stora risker.

Boeing presenterade år 2001 ett ganska radikalt nytt koncept *The Sonic Cruiser* som med en ny konfiguration var tänkt att kunna flyga i farter mycket nära ljudhastigheten med Mach 0.98. Tanken var att med högre hastigheter och med mer direkta rutter (så kallad *point-to-point*) väsentligt kunna reducera flygtiderna dock till priset av avsevärt högre bräns-

leförbrukning. Presentationen av det nya flygplanet skedde strax efter att Airbus presenterat den nya super-jumbon A380 som var tänkt för att kunna flyga stora mängder passagerare i ett mer traditionellt nätverk, så kallad *hub and spoke network*. I denna typ av nätverk flygs passagerarna först i mindre flygplan som Boeing 737 från olika mindre flygplatser och orter till en större flygplats som London Heathrow, för att sedan flyga den längre sträckan fram till exempelvis Los Angeles i ett större flygplan som Airbus 380.

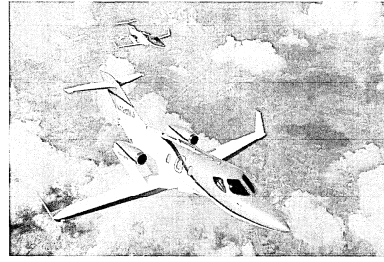
Det råder delade meningar om Boeings nya flygplan var ett seriöst försök att utveckla en ny typ av flygplan eller bara ett försök att skaka om den ende konkurrenten. Boeing valde sedan att istället satsa på den nya mer effektiva Boeing 787 som har en konventionell konfiguration men där stora resurser investerats och risker tagits för att öka effektiviteten på många sätt.

På samma sätt har det pågått många studier med syfte att hitta ett bättre framtida alternativ till de båda tillverkarnas riktiga volymprodukter, Boeing 737 och Airbus 320. Efter studier av många alternativ valde först Airbus att satsa på en mindre uppgradering med nya motorer, Airbus 320 NEO (New Engine Option) och strax därefter Boeing en uppgradering av 737 till Boeing 737 MAX (Maximum efficiency).

I vissa fall studeras även rena överljudsflygplan liknande Concorde och det ryska alternativet Tupolev TU-144. Tyvärr så blir både utvecklingskostnader och driftskostnader så höga att få anser en sådan utveckling möjlig. Kanske kan det finnas en marknad för ett mindre affärsjetflygplan med överljudsprestanda.

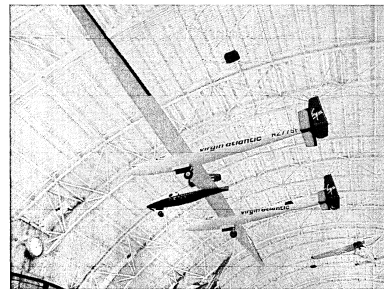
Mer radikala alternativa koncept för flygplan måste sökas utanför det traditionella trafikflyget. Bland de flera företag som utvecklar flygplan av typen affärsjet pågår en del avancerad utveckling. Bland annat har japanska Honda lagt ner enorma resurser på utvecklingen av ett nytt mindre jetflygplan, se figur 16, med mycket lovande prestanda. Flygplanet har bland annat en avancerad vinge utformad för stora andelar laminär strömning i hög fart vilket är en stor utmaning. Vidare har flygplanet en ovanlig placering av motorerna ovan vingen vilket kan ge förbättrade prestanda.

Mer futuristiska koncept utvecklas med privat finansiering för att slå olika former av rekord. Ett intressant rekord är att flyga jorden runt utan mellanlandning och påfyllning av bränsle. Amerikanska flygvapnet flög redan 1949 jorden runt men då med lufttankning under resan som varade i flera dagar. Den väsentligt svårare uppgiften att flyga jorden runt



Figur 16: Affärsflygplanet Honda Jet, foto: Honda Aircraft Company.

utan lufttankning krävde ett mer radikalt flygplan med långa slanka vingar liknande ett segelflygplan men med större kropp för att få plats med allt bränsle. Flygplanet *Voyager* lyckades 1986 genomföra flygningen på 9 dagar. Ett annat intressant flygplan utformades för att flyga jorden runt utan lufttankning på under 80 timmar. Flygplanet *GlobalFlyer* som visas



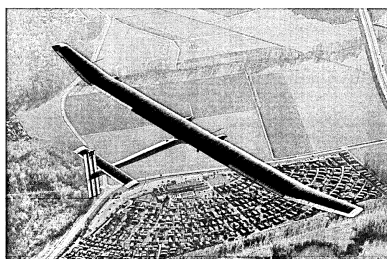
Figur 17: GlobalFlyer som flög jorden runt på 67 timmar 2005.

i figur 17 har en liknande utformning som *Voyager* men med en jetmotor för bättre prestanda. Flygplanet lyckades 2005 genomföra flygningen på 67 timmar med en snittfart på hela 670 km/tim.

Flygplanet *GlobalFlyer* har många av de viktiga egenskaper som diskuterats i tidigare avsnitt av den här rapporten. Vingarna är raka och spännvidden stor för lågt inducerat motstånd, vingprofilerna är optimerade för mycket laminär strömning trots den relativt höga farten. Farten är hög men tillräckligt låg för att inte påverkas mycket av det höga motståndet i transonisk fart. Flygplanet har tre kroppar för att bättre fördela vikten över vingen som skapar lyftkraften. Landstället är även det fördelat

med hjul under alla tre kropparna. Hela flygplanet är på samma sätt som moderna segelflygplan helt byggt i kolfiberkomposit. Av hela flygplanets maximala startvikt på 10 ton var 83% bränsle.

De få solcellsdrivna flygplan som utvecklats har även de en liknande utformning men dessa flygplan, som NASAs Helios och det schweiziska Solar Impulse som visas i figur 18, är mycket avancerade flygplan optimerade



Figur 18: *Solar Impulse* (photo: ©Solar Impulse, Jean Revillard, [www.rezo.ch](http://www.rezo.ch)).

de för flygning i låg fart men med stor uthållighet och räckvidd. Med en maximal solinstrålning i Sverige uppnås i bästa fall en effekt på ca 1000 Watt per kvadratmeter. Det innebär att ett effektbehov på 3 KW för Arcus-flygplanet i Figur 1 skulle kunna uppnås med 3 kvadratmeter solcellspaneler på vingarna om effektiviteten i solceller och motor är 100 %. För mer realistiska verkningsgrader på solceller och motor behöver dock hela vingen utformas med solceller vilket är svårt men tekniskt möjligt. Ett mål med vissa solcellsdrivna flygplan är att kunna flyga mer eller mindre för evigt med solkraft dagtid för flygning och laddning av batterier som sedan används för att hålla sig kvar i luften nattetid. Solcellsdrivna flygplan är en mycket intressant utveckling men det är mycket långt bort i framtiden innan det kan bli ett alternativ för det framtida trafikflyget.

## 7 Regler och praktiska begränsningar

Det konventionella trafikflyget omgärdas av omfattande regelverk och övervakning med syfte att öka säkerheten. Utformningen av själva flygplanet måste uppfylla konstruktionsregler och genomgå en certifieringsprocess innan det får användas i trafik. Själva tillverkaren måste även ha ett tillstånd för att få konstruera, utveckla och tillverka flygplan.

Myndigheterna som svarar för både regelverk och tillsyn är i Europa *European Aviation Safety Agency* (EASA) och i USA *Federal Aviation Administration* (FAA). Reglerna skiljer sig lite åt men det pågår samarbeten som på olika sätt skall underlätta certifiering av nya flygplan.

Reglerna är ett sätt att försöka samla all tidigare erfarenhet i rekommendationer för hur ett säkert flygplan ska utformas utan att bli alltför ineffektivt. Haveriutredningar, som i Sverige genomförs av Statens haverikommission, är en viktig del av utvecklingen. Efter haverier i flygtrafiken genomförs i de flesta fall mycket omfattande undersökningar med målet att reda ut orsaken till olyckan snarare än att finna svar på skuldfrågan. Haveriutredningar ger ofta rekommendationer till EASA och FAA på hur regelverk och rekommendationer ska ändras för att ge säkrare flygtrafik. Regelverket ger instruktioner om vilka typer av belastningar som flygplanet skall dimensioneras för. Till exempel finns beskrivning av landningsförlopp och hur kraftiga vindbyar som flygplanet ska klara av samt krav på de beräkningar och prov som måste genomföras innan flygplanet får användas i trafik. Vissa typer av incidenter måste även klaras av. Till exempel måste ett tvåmotorigt flygplan klara av att lyfta och stiga med bara en motor fungerande om farten i startförloppet blivit för hög för att stanna innan startbanan är slut. Om flygplanet har motorerna på vingarna, som tex Saab 340 och Boeing 737, så bestämmer detta flygtillstånd oftast hur stor fena och sidorodret måste vara för att bibehålla flygplanets färdriktning när bara en motor ger dragkraft.

Utöver de sedvanliga reglerna måste även ett trafikflygplan klara besvärligare väder och klimat. Speciellt i Sverige med kyla, snö och dålig sikt är detta påtagligt. Under vissa väderförhållanden kan isbildning ske på vingar, fena och stabilisator. Denna isbildning kan ändra tyngdpunkten på flygplanet och även formen på vingen så att flygplanet får drastiskt försämrade prestanda. De flesta flygplan har därför någon form av system för avisning under flygning. Flygplanet Saab 340 har till exempel svarta gummiytor, se figur 1, på vingarnas framkant som kan blåsas upp och spränga bort eventuell isbildning på vingens framkant. Tyvärr är ett sådant system svårt att konstruera så att vingen blir tillräckligt jämn för att få laminärströmning över stora delar av vingytan. Detta är ett tydligt exempel på en funktion som behövs relativt sällan men ändå får en negativ inverkan på flygplanet vid varje flygning.

Komplicerade regelverk och dyra processer för att ta fram nya flygplan gör det svårt att starta ny tillverkning av nya flygplan. Mycket tid och pengar krävs innan en färdig produkt kan börja säljas och skapa intäkter

på en ofta skakig marknad. I vissa tider har dessa svårigheter i kombination med skadeståndsanspråk efter haverier lett till att företag gått under. Speciellt tydligt är detta i USA där rättsprocesser efter haverier kan vara mycket kostsamma för tillverkaren.

Allmänflyget, det vill säga privatflyg i olika former samt taxiflyg och transporter med mindre flygplan utan reguljär trafik, har därför i många länder minskat kraftigt. Höga kostnader för drift och underhåll av även små flygplan i komplicerade regelverk och bestämmelser har lett till minskat antal piloter och generellt mindre allmänflyg. Avsaknaden av lämpliga flygplatser, vilket är mycket tydligt i Stockholmsområdet, har inte gjort saken bättre. Denna utveckling är oroande och skadlig för flyget i allmänhet eftersom mycket av de innovationer som kommer fram sker i allmänflyget som har en bättre marknad med många små tillverkare i många länder jämfört med det tunga trafikflyget som domineras av Boeing och Airbus.

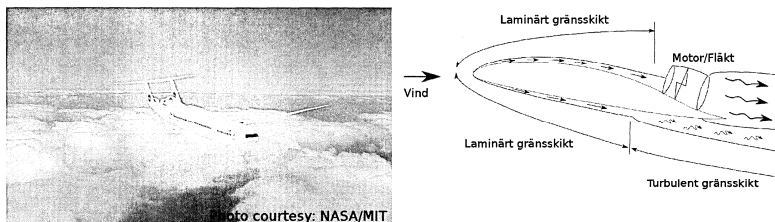
Ett lysande undantag från denna utveckling är framväxandet av organisationen *Experimental Aircraft Association* (EAA) som grundades i USA på 1950-talet. Organisationen är nu spridd över hela världen med fokus på utveckling och flygning med experimentella flygplan oftast konstruerade och byggda av privatpersoner i liten skala. Organisationen samarbetar med nationella myndigheter och har lyckats skapa ett regelverk och en organisation som gör det möjligt att utveckla och flyga nya konstruktioner med blygsamma resurser. Det är viktigt att observera att många framgångsrika koncept och flygplan har sitt ursprung i EAA-verksamhet. Till exempel är de båda rekordflygplanen *Voyager* och *GlobalFlyer* konstruerade och tillverkade i Burt Rutans regi och han började sin bana som konstruktör av små flygplan i byggsats för amatörer i samverkan med EAA.

## 8 Framtida utvecklingsmöjligheter

De flesta experter [9, 10] verkar tro att flygtrafiken kommer att ständigt öka men med allt hårdare krav på reducerad bränsleförbrukning och reducerade utsläpp. De stora tillverkarnas framtidskoncept är inte så revolutionerande utan bygger på en förfining av de koncept som redan finns. Möjligen är den flygande vingen i figur 8 ett undantag men de praktiska svårigheterna som diskuterats tidigare i rapporten gör en sådan utveckling mindre sannolik.

Med ytterligare förbättringar i motorprestanda och aerodynamisk utformning är det kanske möjligt att nå en reduktion i bränsleförbrukning om 50% på längre sikt. Men för att nå väsentligt större vinster krävs mer radikala koncept och troligen att passagerarna accepterar lägre fart och något längre restider.

Ett koncept som kanske är lagom radikalt för att vara realistiskt har tagits fram av det amerikanska universitetet MIT i samarbete med NASA och ett par företag. Flygplanet, D8 eller *the Double Bubble* [11] har en något ra-



Figur 19: *The double bubble, or D8 concept.*

kare vinge och en tänkt fart på Mach 0.74 dvs något lägre än dagens normala Mach 0.8 till 0.85 men forskarna tror att konceptet skulle kunna nå upp till 70% bränslebesparing jämfört med tex den version av Boeing 737 som finns nu. Denna radikala förbättring uppnås dels med den lägre farten, ökad andel laminärströmning och en utformning av skrovet som ger ett större bidrag till lyftkraften än den traditionella utformningen med cirkulärt tvärsnitt. Forskarna tror sig ha en lösning på problemet med att skapa en tryckkabin utan att vikten blir för hög genom att utforma den trycksatta delen av kabinen som en liggande 8.

Den kanske viktigaste men också mest kontroversiella egenskapen hos flygplanet är den starka integrationen mellan motor och flygplanskropp. Motorerna är placerade nära kroppen i stjärtpartiet och är tänkta att suga in gränsskiktet som bildats över kroppen vilket skulle kunna leda till en ökad andel laminärströmning och därmed väsentligt lägre luftmotstånd. Som vanligt är tanken inte helt ny men kanske kan det gå att lösa de väsentligaste problemen med denna utformning i en nära framtid.

Den största utmaningen med D8 konceptet är troligen att få motorerna att fungera i den störda och turbulenta strömning som råder nära kroppen och vid stjärtpartiet. Vid flygning med högre anfallsvinkel kan dessa störningar i inflödet till motorn bli avsevärda och det kommer att bli svårt



att få motorerna att fungera utan vibrationer och skador till följd av utmattning på grund av stora variationer i belastningen av motorns delar som fläktblad och liknande.

Trots detta får det nog anses som en stor möjlighet att väsentligt förbättra samverkan mellan utformning av flygplan och motor. I de flesta fall utvecklas motor och flygplan av olika tillverkare med relativt liten teknisk samverkan. Även i Sverige är detta tydligt med Saab som tillverkare av flygplanet Gripen och GKN Aerospace (tidigare Volvo Aero) som tillverkare av motorerna. Flygplanstillverkare som gett sig på egen utveckling av motorer för att uppnå ytterligare förbättringar för ett visst flygplan har oftast misslyckats med stora kostnader till följd eller rent av undergång.

## 8.1 Dyrare bränsle och höga kostnader för utsläpp

Om förutsättningarna för trafikflyget skulle ändras mer radikalt kan det nog bli realistiskt med avsevärt annorlunda typer av flygplan. Om kostnaderna ökar väsentligt kommer trafiken sannolikt att minska men flyget kommer trots detta var det mest effektiva sättet för passagerartrafik. Högre effektivitet än tex D8 konceptet är definitivt möjlig och rekordflygplanen från flygningarna jorden runt ger en god bild av vad som är möjligt. Den stora bränslemängden ersätts då med passagerare men konceptet blir troligen liknande. En ökad samverkan mellan motor och flygplan kan troligen ytterligare reducera bränsleförbrukning jämfört med vad som kunde uppnås för *GlobalFlyer*.

Ytterligare reduktion av bränsleförbrukningen kan uppnås på kortare sträckor genom att anpassa flygplanets utformning till den optimala flygbanan. På en kortare sträcka, säg under 1000 km, består den optimala flygningen ofta enbart av en stigning upp till hög höjd och sedan en lång nedstigning till landning. Genom att optimera flygplanet för stigning med motor följt av glidflygning utan motor ned till landning kan väsentliga reduktioner både av bränsleförbrukning och miljöpåverkan uppnås. Dagens trafikflygplan har inte en bra utformning för denna typ av flygning då motorerna ger ett väldigt stort luftmotstånd när de är avstängda. Vidare tar det en viss tid att starta motorn och få upp varvtalet så att dragkraften blir tillgänglig. Det kan till exempel vid landning vara mycket viktigt att ha dragkraft snabbt tillgänglig om piloten misslyckas med landningen och måste göra ett nytt försök, så kallad *go around*.

Det kan tyckas att det skulle vara impopulärt bland piloter att glidflyga långa sträckor utan motorer men det kan liknas vid den start/stop funk-

tion som många nya bilar använder sig av. Föraren behöver bara vänja sig vid funktionen och känna sig trygg med att motorn kommer att starta vid behov.

En lösning som gör det möjligt att flyga effektivt på detta sätt används av motoriserade segelflygplan som Arcusen i figur 1. Här kan hela motorpaketet och propellern fällas in i kroppen när det inte används och flygplanet får då utformning som ett rent segelflygplan. På detta sätt kan flygplanet glidflyga långa sträckor för att vid behov fälla ut motor och propeller för att stiga. Den räckviddsoptimala flygbanan för motoriserade segelflygplan får formen av en sågtand där stigning med motor används växelvis med glidflygning utan motor.

Det är troligen svårt att utveckla ett liknande koncept för ett större flygplan på grund av de stora krafter som motor och propeller skapar på den ganska bräckliga konstruktion som håller motor och propeller på plats. En kanske mer praktisk lösning är att vidareutveckla det motor-koncept som D8 flygplanet har så att motorerna enbart används för att suga in gränsskiktet över kroppen vid glidflygning. Kanske kan eldrift användas vid glidflygning med gränsskiktssugning och kombineras med någon form av förbränningsmotor vid stigning då effektbehovet är stort. På så vis skulle en hybridfunktion, som finns i en del moderna personbilar, uppnås som också utnyttjar flygplanets förmåga att lagra energi i form av den lägesenergi som höjden innebär. Att stiga till högre höjd kan ses som ett sätt att ladda de virtuella batterier flygplanet har i form av lägesenergi som sedan kan användas för glidflygning långa sträckor utan motor.

## 9 Framtiden: *Business as usual* eller?

Det finns tekniska lösningar för att möta alla former av restriktioner och krav på utsläpp och buller ned till nollutsläpp med elektrisk framdrivning i kombination med vindkraft för batteriladdning. Eldrift och god aerodynamisk utformning ger även mycket låg bullernivå. För att förändringar ska kunna ske måste dock de affärsmässiga förutsättningarna vara sådana att det går att tjäna pengar samtidigt som att det finns rimliga chanser att de investeringar i ny teknik som görs kan löna sig.

Att snabbt ändra förutsättningarna genom införandet av stora avgifter och eller höga krav på utsläpp och energiförbrukning kan snabbt skapa stor oreda. Dagens flygplansflotta om lågt räknat 10000 flygplan i världen

med ett genomsnittligt lågt uppskattat värde om 100 MSEK per styck representerar ett mycket stort investerat kapital. Skulle en stor del av den flottan bli överflödigt skulle sannolikt det finansiella systemet i världen komma i gungning. Snabba radikala beslut skulle samtidigt minska förtroendet för beslutsfattare och göra det svårt att hitta villiga investerare till nya typer av trafikflygplan.

Det är osannolikt att lokala nationella regler skulle ha någon positiv inverkan. Den svenska marknaden är för liten för att flygplanstillverkare skulle utveckla nya mer effektiva flygplanstyper för en liten marknad utan väsentligt statligt stöd. Det är viktigt att nya regler och krav på flygtrafiken genomförs i internationell samverkan och även på ett sätt som inte alltför snabbt gör nuvarande flygplansflotta obrukbar.

Det kan också medföra svårigheter att blanda traditionella trafikflygplan med nya som flyger väsentligt långsammare. Vid hårt trafikerade flygplatser är det redan idag svårt för mindre flygplan att passa in i det rådande trafikmönstret som på vissa stora flygplatser är hårt optimerat och förutsätter att alla flygplan har liknande egenskaper.

En annan möjlighet för politiska beslutsfattare är att försöka skapa positiva förutsättningar för ett alternativt framtida trafikflyg. Att till exempel i europeisk samverkan skapa ett nätverk av små men mer centralt belägna flygplatser, så kallade *City Airports* som till exempel Bromma och London City Airport, skulle kunna göra det möjligt att införa restriktioner som inte påverkar övrigt trafikflyg. Vid dessa flygplatser kunde extremt hårda krav ställas på den trafik som flyger där. Framförallt vad avser buller och utsläpp för att göra det möjligt att ha centralt belägna flygplatser nära bostäder och effektiv kollektivtrafik som tunnelbanan. Om kraven är höga men inte orimliga så kan det skapas ekonomiska förutsättningar att både utveckla nya flygplan och driva lönsam trafik som kanske på längre sikt kan konkurrera ut det nuvarande systemet för trafikflyg. Även statliga investeringar i den här typen av flygtrafik borde värderas och sättas i relation till de investeringar som diskuteras i framtida spår för snabbtåg.

I det kortare perspektivet, säg fram till år 2030, är det osannolikt att trafikflygplanens utformning ändras radikalt. Det är relativt långa tider för utveckling och produktion av nya flygplan även om ändringarna är måttliga och utformningen konventionell. De stora investeringarna som flygbolagen gör i nya flygplan kräver också en relativt lång tid för avskrivningar och användning. En kraftig störning i form av mycket högre bränslepris skulle minska trafiken och slå ut många flygbolag men det skulle troligen ta tid innan en ny typ av väsentligt mer effektiva trafik-

flygplan skulle komma i stor användning.

På längre sikt, i perspektivet 2050, verkar det dock troligt att väsentlig effektivisering är nödvändig inom trafikflyget men det gäller samtliga transportslag. Tekniska möjligheter finns definitivt för väsentliga förbättringar och flyget kommer alltid att vara ett mycket effektivt sätt att transportera passagerare och lättare dyrbart gods. Det bästa beviset för detta är trots allt alla flyttfåglar som obesvärat reser runt här på jorden oavsett vad vi människor har för oss.

## 10 Referenser och rättigheter

Figurer i rapporten är ritade i *inkscape* och de flygplansgeometrier som visas ritade i *sumo* utvecklat av David Eller vid KTH.

Bilderna som visas är antingen tagna av författaren eller införda med tillstånd från amerikanska staten (NASA/USAF), Schempp-Hirth Flugzeugbau, Honda Aircraft Company, Solar Impulse, och Ingersoll Machine Tools, Inc.

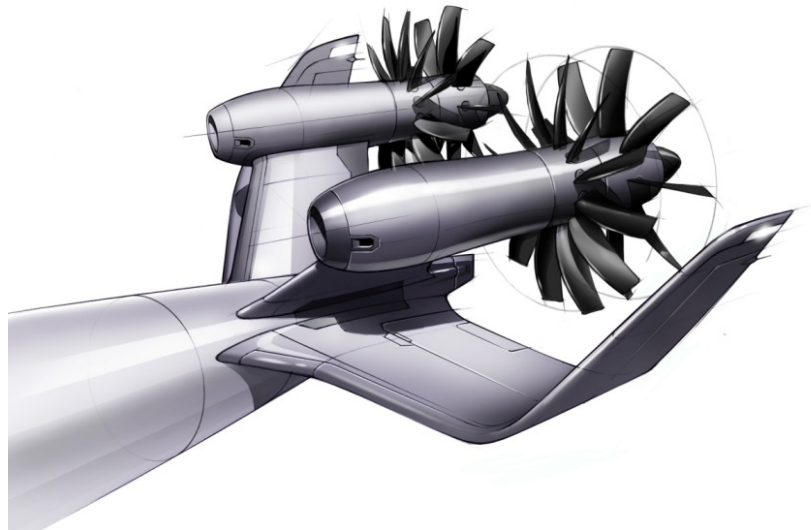
### Referenser

- [1] J. D. Anderson. *Aircraft Performance and Design*. McGraw-Hill, 1999.
- [2] J. D. Anderson. *Modern Compressible Flow*. McGraw-Hill, 2003.
- [3] G. Norris. Son of Blackbird. *Aviation Week & Space Technology*, Nov 4, 2013.
- [4] J. D. Anderson. *Introduction to Flight*. McGraw-Hill, 2000.
- [5] B. Hersman, R. Sumwalt, and C. Hart. Loss of thrust on both engines after encountering a flock of birds and subsequent ditching on the Hudson River. Technical Report NTSB/AAR-10/03, National Transportation Safety Board, 2010.
- [6] D. Talbot. Boeing's composite problem. *MIT Technology Review*, 2008.
- [7] E. Wedberg. Batteriteknik för framtiden. *Teknikens värld*, Dec 5, 2013.

- [8] J. Hall, J. Hammerschmidt, J. Goglia, and G. Black. In-flight icing encounter and loss of control, Simmons Airlines ATR 72-212. Technical Report NTSB/AAR-96/01, National Transportation Safety Board, 1996.
- [9] Strategic Research & Innovation Agenda. Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE), September 2012. [www.acare4europe.org](http://www.acare4europe.org).
- [10] High level group on Aviation Research. Flightpath 2050, Europe's vision for Aviation. European Commission, 2011. ISBN 978-92-79-19724-6.
- [11] G. Norris and G. Warwick. Pushing the boundary, new directions for eco-airliners. *Aviation Week & Space Technology*, Sep 30, 2013.

## 6. Tomas Grönstedt: Flygmotorer

# CHALMERS



### Kartläggning av kunskapsläget av teknikutvecklingen inom området flygplansmotorer

Tomas Grönstedt

Applied Mechanics

*Fluid dynamics*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sweden 2013

ISSN 1652-8549 2014:01

## Sammanfattning

En av målsättningarna med den här rapporten är att ge läsaren en inblick i hur energiomsättningen i en flygmotor går till. Genom att dela upp processen i två steg där energin i bränslet först omsätts till en hastighetsökning i jetstrålarna och denna ökning i sin tur omsätts till nyttig framdrivning av flygplanet, kan läsaren plocka ett större antal lågt hängande förståelsefrukter. Höjdpunkter att se fram emot är att förstå varför det finns olika typer av flygmotorer, hur mycket mer bränsle det är möjligt att spara genom effektivisering, samt varför flygforskningen idag koncentrerar sina ansträngningar mot vissa typer av innovationer.

Det inledande avsnittet diskuterar den grundläggande funktionsprincipen för en flygmotor samt förklarar hur energiomsättningen i motorn går till. I samband med detta beskrivs också de mest väsentliga delkomponenterna i en flygmotor och några ytterligare begrepp förs in. Avsnittet avslutar med en diskussion om de olika flygmotortyper som finns i drift idag och hur effektiviteten i motorer historiskt utvecklats.

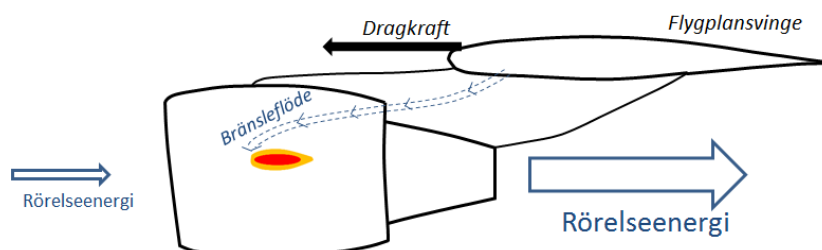
Rapportens andra del, emissionsavsnittet har tre mål: 1) förklara hur flygmotorer certifieras idag med avseende på emissioner 2) redogöra för hur den CO<sub>2</sub>-certifiering som nu växer fram är tänkt att fungera 3) ge en god och tämligen detaljerad bild av flygets miljöbelastning. Tillväxttakten i CO<sub>2</sub>-utsläpp från flyget diskuteras och rapporten visar att flygets emissioner de senaste 40 åren har växt marginellt snabbare än mänsklighetens totala CO<sub>2</sub>-utsläpp. Det senaste decenniet har tillväxttakten från flyget varit avsevärt lägre än den totala tillväxttakten. Övriga emissionstyper och deras miljöpåverkan diskuteras också och rapporten gör ett försök att sammanfatta forskningsområdet med så aktuell information som möjligt.

Det sista avsnittet i rapporten beskriver framtida möjligheter till energieffektivisering och diskuterar innovationer som kan bidra till att accelerera förbättringstakten. Diskussionen kompletteras med en värdering av teknikrisk och teknikmognadsgrad för de olika koncepten. Till sist diskuteras också kortfattat möjligheter för svensk industri att delta i utvecklingen av framtida flygmotorer.

Arbetet har utförts i enlighet med beställning DNR 97-2013/14.

## Grundläggande begrepp

Den grundläggande principen för en flygmotor, illustrerad i Figur 1, består i att omvandla energi kemiskt bunden i flygbränslet till dragkraft och nyttig framdrivningseffekt. Energin frigörs och blir tillgänglig för den inkommande luftströmmen genom att flygbränslet förbränns. Därigenom kan luftströmmens rörelseenergi ökas vilket leder till att en reaktionskraft uppkommer. Denna reaktionskraft driver i sin tur flygplanet framåt.



**Figur 1** – en flygmotors arbetsprincip

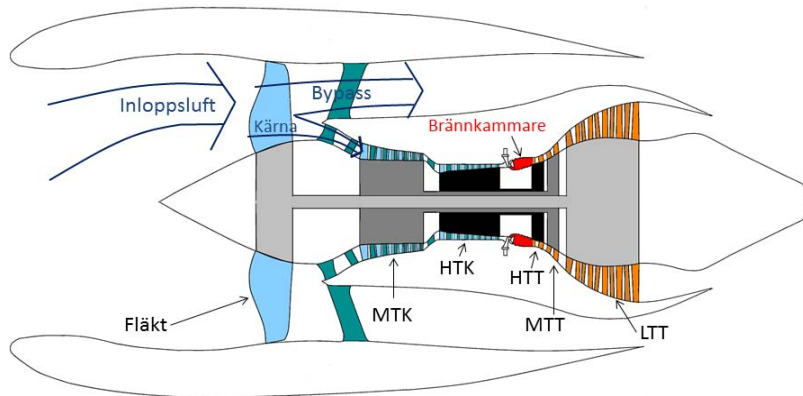
För att förstå hur omvandlingen av kemiskt bunden energi till nyttig framdrivningseffekt kan göras så effektiv som möjligt behövs ytterligare några begrepp. Det visar sig att processen kan delas upp i två steg, en första process som omvandlar kemiskt bunden energi till ökad rörelseenergi i luftflödet och en efterföljande process som relaterar hur mycket nyttig framdrivningsenergi som fås ur den tillgängliga rörelseenergin. Det första steget kan tillskrivas en termisk verkningsgrad och det efterföljande en framdrivningsverkningsgrad. Tillsammans bestämmer dessa båda verkningsgrader motorns totala verkningsgrad.

Termodynamiska studier visar att en förutsättning för att nå en hög verkningsgrad är att förbränningen i brännkammaren sker vid ett högt tryck. I en flygmotor uppnås tryckökningen genom att luften strömmar igenom ett antal kompressorer i vilka trycket stiger. Dessa benämns fläkt, mellantryckskompressor (MTK) och högtryckskompressor (HTK) och är illustrerade i Figur 2. Att trycksätta luft kräver naturligtvis att energi tillförs i form av arbete, vilket turbinerna i motorn levererar. Se komponenterna högtrycksturbin (HTT), mellantrycksturbin (MTT) och lågtrycksturbin (LTT) i Figur 2. Figuren illustrerar också schematiskt hur kompressorerna är mekaniskt sammankopplade med turbinerna. I detta speciella fall, en tre-axlig motor, drivs fläkten av lågtrycksturbinen, mellantryckskompressorn av mellantrycksturbinen och högtrycksturbinen av högtryckskompressorn.

Ju högre tryck man komprimerar till desto större blir det arbete som förloras i kompressorer och turbiner genom strömningsförluster. Samtidigt vet vi ju nu från termodynamiken att det är bra att komprimera till höga tryck så att förbränningen kan göras vid högt tryck och temperatur. Detta leder i praktiken till att det för en given motortekniknivå finns ett bästa tryckförhållande,



det vill säga förhållandet mellan luftens tryck när det strömmar in i motorn, och trycket när luften strömmar ut ur den sista kompressorkomponenten. För högre eller lägre tryckförhållanden försämras alltså den termiska verkningsgraden.



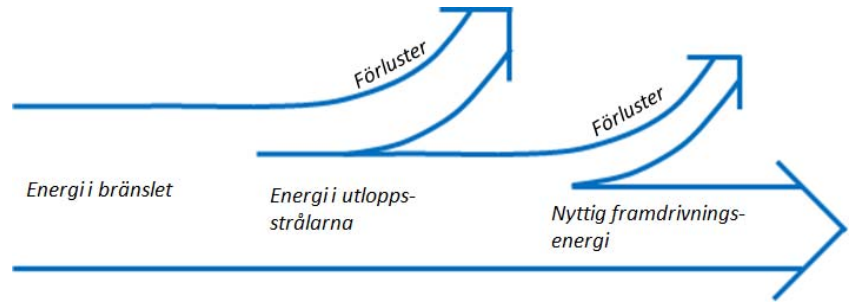
**Figur 2** – modern flygmotor (turbofläktmotor). Mellankompressor (MTK), högtryckskompressor (HTK), högtrycksturbin (HTT), mellantrycksturbin (MTT), Lågtrycksturbin (LTT)

Som framgår av Figur 2 så delas luften i en turbofläktmotor upp i två strömmar, en varm ström som går igenom hela motorns kärna och strömmar ut i kärnmunstycket och en kall ström som trycksätts i fläkten och sedan strömmar ut i bypassmunstycket. I flygmotorsammanhang kallas relationen mellan den luftmassa som strömmar ut i bypassmunstycket och den som strömmar ut i kärnmunstycket för motorns bypassförhållande.

För att uppnå nyttig dragkraft från en flygmotor måste alltså strålhastigheterna i utloppsmunstyckena vara större än inströmningshastigheten. Samtidigt går överskottsenergi i luftstrålen förlorad om luftens hastighet är större än flyghastigheten, och dessa energiförluster växer snabbare än nyttodragkraften. Det blir därför energimässigt gynnsamt att konstruera en motor som ger en liten nettoökning i hastighet, det vill säga endast något större än flyghastigheten. Detta innebär dock samtidigt att dragkraften per kilo luft blir låg och att man måste kompensera med ett större luftflöde för att uppnå tillräcklig dragkraft för flygplanets behov. När motorns luftflöde och storlek ökar, ökar självfallet även dess vikt. Därutöver tillkommer också extra strömningsförluster då motorns strömningsmotstånd ökar med dess tvärsnittsarea. Detta leder i praktiken till att det för en given motortekniknivå finns ett bästa bypassförhållande och motormassflöde för vilken man når den bästa framdrivningsverkningsgraden.

Den tänkta tvåstegsprocess som beskriver hur energin tillgänglig i flygbränslet först omvandlas till ökad rörelseenergi hos motorns utloppsstrålar och därefter hur strålenergin omvandlas till nyttig framdrivningsenergi sammanfattas i Figur 3 nedan. Ett alternativt sätt att kvantifiera en flygmotors effektivitet är att mäta hur mycket dragkraft som motorn genererar för ett givet bränsleflöde, den så kallade specifika bränsleförbrukningen. För den

fortsätta diskussionen kommer både energibetraktelser och specifik bränsleförbrukning att användas.



**Figur 3** – grafisk illustration av energiomsättningen i en flygmotor

## Övriga motortyper



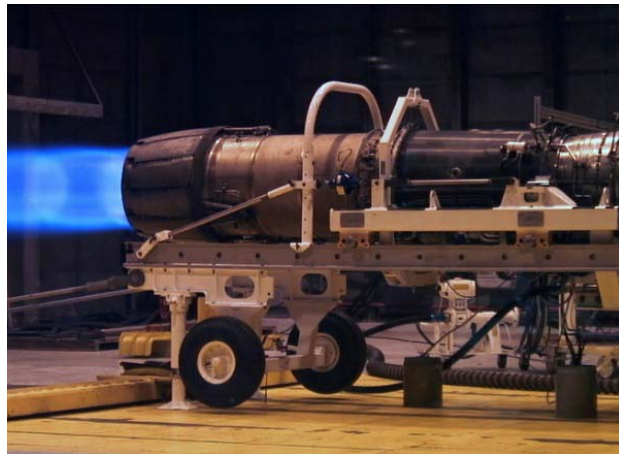
a – turboprop(1)



b – okapslad turbofläkt (2)



c – civil turbofläkt (3)



d – militär turbofläkt (4)



e – turbojet (5)

**Figur 4** – flygmotortyper ordnade i stigande energitillförsel till utloppsstrålarna.

Utöver turbofläktmotorn, som idag dominerar civilt passagerar- och transportflyg så finns ytterligare ett antal motortyper. Med bakgrunden av vad vi redan diskuterat är det lämpligt att kategorisera dessa motortyper efter hur mycket extra rörelseenergi de tillför luften. Huvudtyperna, som återfinns i Figur 4, är i stigande grad av energitillförsel: turboprop (4a), okapslad turbofläkt (open rotor, 4b), turbofläkt med måttlig energitillförsel (civil turbofläkt, 4c), turbofläkt med hög energitillförsel (militär turbofläkt, 4d) samt turbojetmotor (4e). För att kvantifiera den tillförda rörelseenergin används också ofta begreppet specifik dragkraft, det vill säga dragkraft per kg luftflöde. Figur 4 kan därför även ses som en rangordning i specifik dragkraft. Självklart kan man exempelvis konstruera en turbojet med mycket låg specifik dragkraft eller en turboprop med avsevärt högre specifik dragkraft än normalt. Figur 4 ska uppfattas som en klassificering av väl avvägda konstruktioner som närmar sig bästa prestanda för den givna motortypen.

Eftersom den specifika dragkraften relaterar till utloppsstrålens hastighet så bestämmer denna även vilken motortyp som är mest lämpad för en given flyghastighet. Därför blir turboprop-motorer mest effektiva för de lägre fartregionerna medan turbojetmotorer blir nödvändiga för att nå riktigt höga hastigheter. Flygning på marschhöjd för civila passagerar- och flygtransporter sker idag runt 80% av ljudhastigheten, beroende på att flygplanets strömningssmotstånd snabbt ökar för högre flyghastigheter. Vilken hastighet detta motsvarar beror på luftens temperatur vid den aktuella flyghöjden, men för en typisk flyghöjd motsvarar detta ungefär 850 km/h. För denna flyghastighet lämpar sig turbofläktmotorn bäst, även om den okapslade turbofläktmotorn har potential att bli avsevärt effektivare för samma flyghastighet och ytterligare mer effektiv för en marginellt lägre flyghastighet. I motsats till de övriga flygmotortyperna så har den okapslade turbofläktmotorn inte tagits i kommersiell drift för civila transport- och passagerarflygplan. Under 1980-talet utvärderades motortypen i ett flertal prov (6), (7), och demonstrerade en avsevärd potential till förbättrad energieffektivitet. Vikande bränslepriser, utmaningar med bullernivå och teknikrisk ledde dock till att motortypen inte togs i bruk.

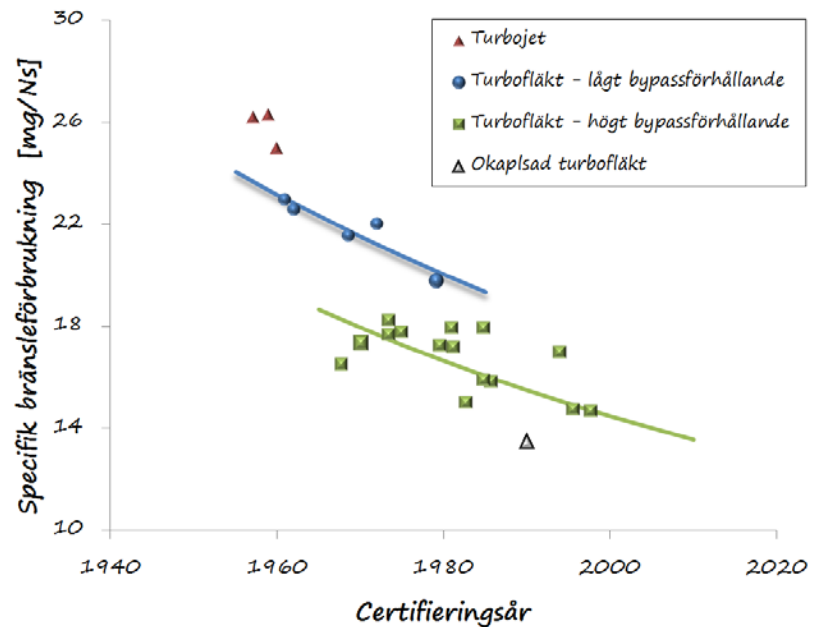
### **Batterier och bränsleceller**

Utvecklingen av batteri- och bränslecellsteknik har pågått sedan 1800-talet. När det gäller batterier drivs tekniken idag på av det stora behovet att hitta energitäta lösningar för el- och hybridbilar. Historiskt har utvecklingstakten av energitäthet varit måttlig och i ett längre perspektiv ligger förbättringstakten runt 2-3% per år. Flygbränsle är fortfarande, beroende på vad som definieras vara state-of-the-art när det gäller batterier, 50-100 gånger energitätare. Med utgångspunkten i historisk utvecklingstakt är det inte troligt att batterier som kan mäta sig med energitätheten i flygbränsle blir tillgängliga under detta sekel. Det är naturligtvis förknippat med stora osäkerheter att bedöma vilken batteri- och bränslecellsteknik som kommer att vara tillgänglig t.ex. år 2050, men branschen verkar mana till försiktighet när det gäller förväntningar(8). För att t.ex. nå de bränslebesparingar som Boeing anger för sitt "SUGAR

Volt"-koncept har det antagits att energitätheten kommer att förbättras tre till fyra gånger på ungefär 20 år (9). Då måste förbättringstakten ungefär tredubblas i jämförelse med den historiska förbättringstakten, och dessutom måste denna utvecklingstakt upprätthållas i två decenniers tid. Detta antagande kan i bästa fall ses som mycket optimistiskt. Förutom utmaningarna med energitäthet är flygtillämpningar dessutom behäftade med höga säkerhetskrav, livslängdskrav och krav på laddningsbarhet. Bränsleceller når idag en liknande nivå på energieffektivitet som batterier (9), och är därför inte heller, under överskådlig tid, sannolika kandidater som huvudenergikälla för kommersiell passagerartransport (9). Däremot kan batterier och bränsleceller successivt leta sig in i flygtillämpningar t.ex. genom att ersätta hjälpkraftaggregat (APU).

### Tekniktrender

Tidiga jetmotorer var mycket ineffektiva i jämförelse med konkurrerande kolvmotorer (10). Den avsevärt ökade tillförlitligheten i kombination med kapaciteten att radikalt öka flyghastigheterna ledde dock snabbt till att jetbaserade motorer tog över. Sedan den kommersiella jetdriva passagerartransporten lanserades, har teknik för att avsevärt förbättra den termiska verkningsgraden och framdrivningsverkningsgraden införts. Detta har lett till avsevärda förbättringar i bränsleekonomi, vilket framgår av Figur 5.



Figur 5 – historiska trender i specifik bränsleförbrukning. Modifierad från (11)

Förbättringar i termisk verkningsgrad har uppnåtts bland annat genom att tryckförhållandet i motorn ökats, från lite över 10 till närmare 50. Detta har möjliggjorts genom en mängd tekniska framsteg nödvändiga för att en sådan kraftig ökning ska kunna utnyttjas fullt ut. Exempelvis har förbättrade verk-

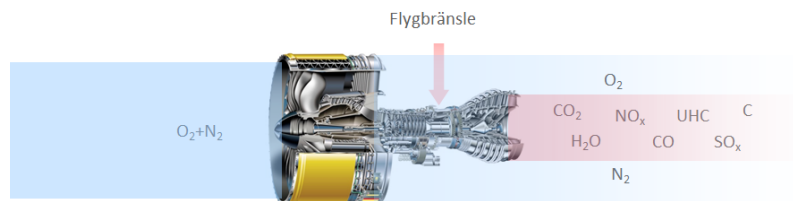
ningsgrader i turbiner och kompressorer inneburit direkta förbättringar genom minskade strömningsförluster men också indirekt genom att göra motorer med höga tryckförhållanden mer effektiva. Bladkylning i turbinerna tillåter att de varmaste komponenterna körs flera hundra grader över materialets smältpunkt. Med sådan teknik ökar det mest bränsleekonomiska tryckförhållandet kraftigt. Nya effektiva motorer kan idag nå termiska verkningsgrader på runt 50%.

Förbättringar i framdrivningsgrad har uppnåtts genom att motorer med allt högre massflöde, högre bypassförhållande och lägre fläkttryckförhållande har konstruerats. Högre temperaturer i turbinerna har drivit upp effekttätheten i kärnflödet vilket tillåter att ett större bypassförhållande kan användas. Lättviktsteknik har möjliggjort att mycket större motorer kan konstrueras utan att viktsökningar äter upp de fördelar som kan nås. Dagens flygmotorer kan nå framdrivningsverkningsgrader på drygt 80%.

Sammantaget, har de ovan beskrivna förbättringarna lett till att bränsleförbrukningen på motornivå reducerats till mindre än 50% av vad de var när jetdriven kommersiell trafik inleddes. I resterande delar av denna rapport ska vi nu först fundera på vilka emissioner en gasturbin har och hur dessa påverkar miljön. Därefter ska vi fundera på hur långt vi på lite längre sikt kan tänka oss nå när det gäller energieffektivitet.

## Emissioner

Emissionerna från en flygmotor domineras av vattenånga och koldioxid då dessa är slutprodukter vid en fullständig förbränning av flygbränsle. Dessutom genereras mindre mängder av kväveoxider, kolmonoxid och oförbrända kolväten samt beroende på bränslets renhet små mängder av svaveloxider. Moderna flygmotorer har tämligen begränsade utsläpp av sot och oförbrända kolväten och dessa emissioner berörs därför inte närmare i denna rapport. Processen återges kvalitativt i Figur 6.



Figur 6 – en flygmotors emissioner(12)

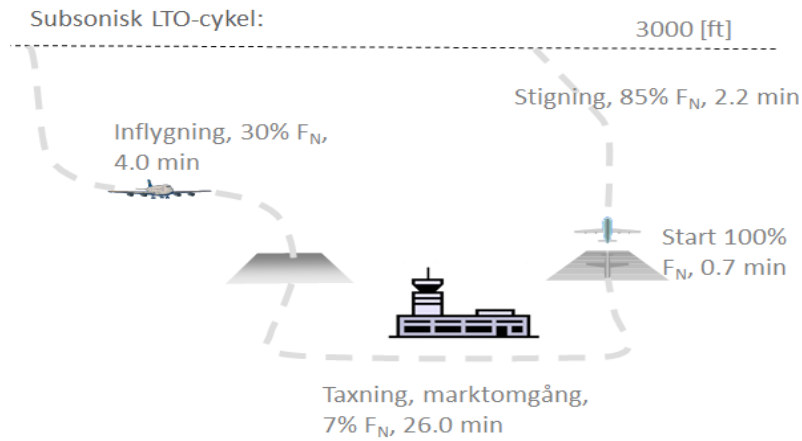
## Certifiering

För att certifiera en flygmotor krävs att motorn uppfyller ett antal miljökrav. Riktlinjer för certifiering tas fram av CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) vilken är del av ICAO (International Civil Aviation Organization). ICAO är i sin tur ett FN-organ som bildades redan 1947. De rekommendationer som fastställs av CAEP och ICAO måste därefter antas av de certifierande instanserna; i Europa EASA och i USA FAA. Sedan tidigt 80-tal finns certifieringskrav på kväveoxider men även på kolmonoxid, oförbrända kolväten och sot. När det gäller  $CO_2$  finns det idag inga certifieringskrav, men sådana är nu under utveckling vilket diskuteras nedan.

### *Certifieringskrav: kväveoxider, oförbrända kolväten och kolmonoxid*

Utvecklingen av certifieringskraven när det gäller kväveoxider har framförallt drivits på av att begränsa miljöpåverkan lokalt kring flygplatser. Allt strängare krav har införts sedan mitten på 80-talet. För att mäta en motors utsläpp av kväveoxider används den så kallade "Landing and Take-Off"-cykeln (LTO-cykeln), vilken illustreras i Figur 7. Motorcertifieringen genomförs i provbänk men provpunkterna har valts för att representera typisk flygning i en flygplats närområde.



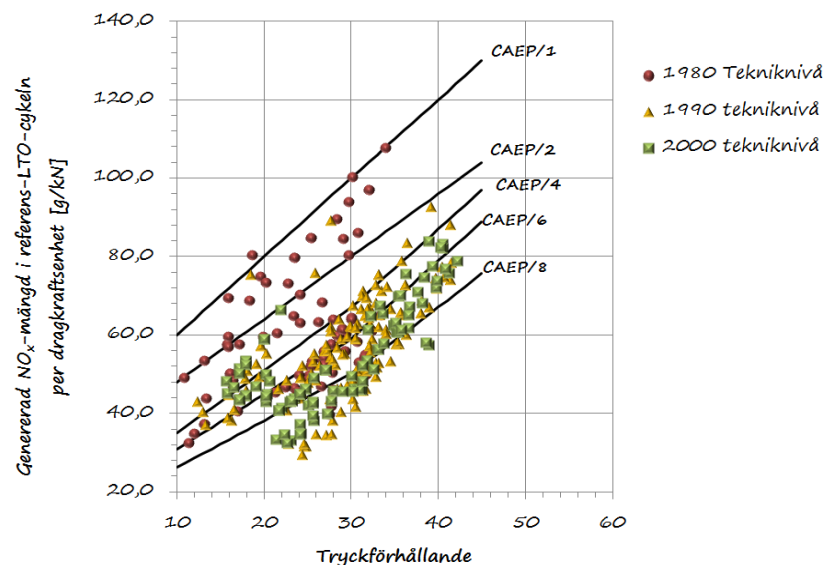


Figur 7 – LTO-cykeln (12)

Motorns uppmätta utsläpp vägs alltså samman från fyra punkter:

- ”Inflygning”: 4 minuter där motorn körs med 30% av full dragkraft
- ”Marktomgång”: 26 minuter med 7% av full dragkraft
- ”Start”: 0.7 minuter med full dragkraft
- ”Stigning”: 2.2 minuter med 85% dragkraft.

Mätningarna korrigeras till ett referenstillstånd, det vill säga en föreskriven temperatur, luftfuktighet och tryck. Mängden emissioner normeras med dragkraften för att ta hänsyn till variationer i motorstorlek och jämförs sedan mot certifieringskraven. I figur 8 nedan återges de succesivt mer strikta krav som införts när det gäller kväveoxider.



Figur 8 –  $NO_x$ -mängd genererad i referens-LTO-cykeln per dragkraftsenhet. Motorer för 80-tals, 90-tals och 00-talstekniknivå.

De svarta kurvorna i Figur 8 representerar de kväveoxidgränser som CAEP definierat vid de olika formella möten gruppen hållit. För att behålla översiktligheten har endast certifieringsgränser för motorer med dragkraft större än 89 kN återgivits i figuren. Eftersom motorers tryckförhållande i praktiken korrelerar med flamtemperaturen i brännkammaren och därigenom mängden bildade kväveoxider, tillåts högre gränser för högre tryckförhållanden. Notera också i sammanhanget att motorer med högre tryckförhållande har potential att nå högre termisk verkningsgrad och bättre effektivitet.

För oförbrända kolväten och kolmonoxid används fixa gränser i genererad mängd för referens-LTO-cykeln, 19.6 g/kN respektive 118 g/kN.

#### *Certifieringskrav: koldioxid*

Under CAEP:s senaste arbetsperiod, det vill säga de tre senaste åren har de inledande stegen till en koldioxidcertifiering tagits. I februari 2013 presenterades huvuddragen för en mätprocedur (13). Metriken baserar sig på att tre punkter från ett tungt lastat, normalt lastat och ett lätt lastat flygplan vägs samman. Vad som åsyftas med tungt, normalt och lätt lastat definieras i relation till flygplanets maximala startvikt. De tre punkterna vägs linjärt samman baserat på en normaliserad bränsle-förbrukning per kilometer. Normaliseringen tar hänsyn till flygplanets storlek genom en faktor vilken baserar sig på längden av den trycksatta kabinen och dess maximala bredd. Dessutom kommer flygplanets maximala startvikt att användas för att skala det resulterande effektivitetsmättet. Flygplanstillverkarna kommer att få välja flyghöjd och hastighet för de tre certifieringspunkterna, vilket bör leda till att punkter med minimal bränsleförbrukning per kilometer väljs.

Ansatsen att certifiera motorer i tre punkter har naturligtvis valts för att undvika att tillverkare optimerar ett flygplan endast för en driftpunkt. Att detta är nödvändigt är uppenbart redan idag då långa uppdrag regelmässigt innebär att flyghöjd anpassas till flygplanets vikt, allteftersom bränsle förbrukas och flygplanet blir lättare.

Möjligen kan man kritisera förslaget i dess nuvarande form då valet av denna metrik innebär att motorer med hög framdrivningsverkningsgrad inte fullt ut kompenseras för de förbättringar i bränsleförbrukning som de medför. Sådana motorer har extra god prestanda under start och stigning då flygfarterna är lägre än på marschhöjd och planflykt. För långa flyguppdrag är detta mindre viktigt då en dominerande del av bränsleförbrukningen sker på marschhöjd och planflykt. För kortare uppdrag kan däremot en betydande del av bränslet förbrukas vid lägre flyghastigheter. Då är motorer med hög framdrivningsverkningsgrad, som till exempel okapslade turbofläktmotorer speciellt effektiva, vilket då inte helt fångas upp av denna metrik.

Tyvärr är framtagandet av förslaget till certifiering försenat. ICAO förväntar sig nu att förslaget är fullt tillgängligt i slutet av 2015 snarare än slutet av 2013 som tidigare förväntades. Standarden kommer att appliceras för typcertifikat för nya flygplanstyper i början av 2020 eller 2023. Eftersom nya flygplan normalt inte kommer i drift förrän fyra till fem år efter att typcertifikat

ansöks riskerar detta att leda till att den nya CO<sub>2</sub>-standarden inte börjar tillämpas förrän 2024 till 2028. Eftersom ledtiderna för flygforskning och utveckling är mycket långa behöver inte denna tröga process leda till att teknikutveckling och framsteg fördröjs. Detta kräver dock att den CO<sub>2</sub>-standard som kommer fram leder till en någorlunda tuff kravbild, vilken frammanar en rimlig nivå av tekniskt risktagande för branschen.

### **Emissionernas klimatpåverkan**

I rapporten "Aviation and the Global Atmosphere" (14), presenterades för första gången en sammanhängande värdering av flygets miljöpåverkan. Det mått som användes för detta arbete och som även dominerar diskussioner kring flygets klimatpåverkan är RadiativeForcing (RF), vilket på svenska översätts med strålningsdrivning. Strålningsdrivningen mäter hur ett emissionslag vid en given tidpunkt påverkar nettobalansen instrålad/utstrålad effekt på jordytan.

De flygrelaterade utsläpp som har en mätbar påverkan på strålningsdrivningen är:

- Koldioxid (ökande effekt)
- Kväveoxider (totalt sett ökande). Kväveoxiderna påverkar strålningsdrivningen indirekt genom att påverka ozonet och metanets förekomst i atmosfären.
- Vattenånga (ökande)
- Kondensstrimmor (ökande)
- Emissionsinducerad cirrusmolnbildning (ökande)
- Sulfatpartiklar (minskande)
- Sotpartiklar (ökande)

De mest väsentliga egenskaperna hos dessa utsläpp diskuteras nedan.

#### *Koldioxidemissioner*

Koldioxidutsläppen utgör det viktigaste av samtliga utsläpp då det dels utgör en stor del av den totala strålningsdrivningen från flyg, dels för gasen är mycket långlivad i atmosfären. Koldioxidutsläppen påverkar jordens medeltemperatur under sekler, medan övriga utsläpp har en påverkan på upp till några decennier (15). Detta leder till att den relativa betydelsen av CO<sub>2</sub> successivt ökar, eftersom koldioxiden blir kvar en lång tid och lagras upp i atmosfären medan övriga emissioner klingar av mycket snabbare.

Flygandet och flygbranschen har sedan länge uppvisat en snabb tillväxttakt. Ett ofta använt mått på detta är tillväxten i flygna passagerarkilometrar. Globalt har tillväxttakten legat på knappt 4-6% per år under en längre tid. Räknat från 1970 fram till 2011 har medeltillväxttakten varit ungefär 6.2%, framförallt på grund av en extremt snabb tillväxt under 70-talet. Under 2011 uppgick det totala transportarbetet till ungefär 5150 miljarder passagerarkilometrar. Tillväxten i passagerarkilometrar fördelat decennievis samt för hela tidsperioden återfinns i Tabell 1 nedan.

**Tabell 1 – tillväxttakt i passagerarkilometrar samt koldioxidemissioner för flyget och totalt<sup>79</sup>**

Tidsperiod	Passagerarkilometrar	CO <sub>2</sub> -generering flyg	CO <sub>2</sub> -generering totalt <sup>79</sup>
1971-1979	11.0%	1.18%	3.09%
1980-1989	5.6%	3.84%	1.54%
1990-1999	4.4%	2.67%	0.85%
2000-2009	4.0%	1.12%	2.89%
1971-2011	6.2%	2.26%	2.05%

När det gäller CO<sub>2</sub>-generering utgörs den bästa källan till noggrann information av att använda den totala försäljningen av flygbränsle (16). Sådan information kan sammanställas baserat på IEA:s årliga rapporter, såsom t.ex. (17). Mängden sålt flygbränsle under 2011 var knappt 250 miljoner ton. CO<sub>2</sub>-genereringen år 2011 från flyget var ungefär 2.3% av den totala mängden CO<sub>2</sub> genererad av förbränning av fossilt bränsle och cementtillverkning. Tillväxten i CO<sub>2</sub>-utsläpp fördelat decennievís samt för hela tidsperioden återfinns i Tabell 1.

Från början av 1980 fram till början av 1999 visade oljepriset en sjunkande trend. Under denna period ser vi en relativt snabb ökning av CO<sub>2</sub>-generering från flyget. Under 70-talet och 00-talet nåddes toppnivåer i oljepriset och flygbränslekostnaderna steg snabbt. Motsvarande ökning i CO<sub>2</sub> generering är var betydligt långsammare än tillväxttakten i passagerarkilometrar under dessa perioder. Under maj/juni 2008 kunde bränslekostnadernas andel av ett flygbolags direkta driftskostnader för långdistansflygning uppgå till omkring 60%. Så höga relativa bränslekostnader är helt unika för flygbranschen. Självklart är inte situationen så enkel att bränslepriset direkt styr förbättringstakten i energieffektivitet men det råder inget tvivel om att bränslepriset har, och har haft, en stark påverkan på införseltakten av ny teknik.

Om bränslepriset stabiliseras på en hög nivå är det rimligt att anta att de flygbolag som har råd, effektiviserar sin flotta för att bibehålla lönsamhet, medan operatörer med svaga finansiella muskler slås ut. Under sådana omständigheter verkar det t.ex. inte troligt att det på den nordiska marknaden skulle gälla att 70% av dagens stolskapacitet fortfarande är i bruk år 2030, vilket hävdas i Karyds underlagsrapport till utredningen om fossiloberoende fordonsflotta (18). Snarare verkar det då troligt att dessa linjer och flygningar tas över av konkurrenter med modernare flygplansflotta. Förändringar i flygbranschen sker ofta relativt snabbt och det är svårt att göra långsiktiga prognoser särskild på relativt små marknader.

Hur CO<sub>2</sub> belastningen från flyget kommer att utveckla sig globalt under de närmaste årtiondena är naturligtvis svårbedömt. Man får anta att flygplanstillverkarnas prognoser om tillväxttakt i marknaden är något optimistiska. Boeing uppskattar en tillväxttakt i passagerarkilometrar på 5.0% under perioden 2013-2032 (19), och Airbus uppskattar motsvarande siffra till 4.9% för samma tidsintervall (20). Efter denna tidsperiod kan man förvänta sig att tillväxt-

<sup>79</sup> all förbränning av fossilt bränsle + cementtillverkning

takten mattas av, då den snabba tillväxt som nu pågår i Indien och Kina förväntas avklinga efter cirka 2030(21). Denna avklingning bygger på antagandet att det är rimligt att tro att dessa expansiva marknader förr eller senare mognar och då börjar bete sig som marknaderna i Europa och USA.

När det gäller möjliga effektivitetsökningar och energieffektivisering kommer potentialen för ett antal framtida koncept att diskuteras närmare under avsnittet framtida teknik nedan. Om inte mycket radikal teknik förs in de närmaste decennierna är det dock inte troligt att effektiviseringstakten blir större än 1.5%. Detta är en optimistisk uppskattning som bygger på att den befintliga flottan i hög takt ersätts med modern teknik, att ny teknik och innovationer införs i hög utsträckning samt att driften av flygplanen ytterligare effektiviseras(22). Därav kan man då göra uppskattningen att behovet av flygbränsle kommer att öka med 2.5-3.5% per år under de närmaste två decennierna. Som diskuterats ovan är det rimligt att denna tillväxttakt mattas av något under 2030- och 2040-talet. Ungefär en halv procent per decennium är i linje med det mest sannolika scenariot presenterad i(22).

För att under samma tid uppnå sänkningar eller åtminstone behålla en konstant utsläppstakt måste därför stora volymer biobränsle bli tillgängliga för flyget. Baserat på tillväxtintervallet ovan, kan man extrapolera behovet av flygbränsle till spannet 550-825 miljoner ton för år 2050. Denna något förenklade extrapolation stämmer tämligen väl överens med de resultat som presenterats i (16).

### *Övriga emissioner*

I detta avsnitt kommer bara miljöpåverkan av kväveoxider och vatten<sup>80</sup> att diskuteras närmare, då dessa emissionertillsammans med koldioxiden dominerar strålningsdrivningen från flyget.

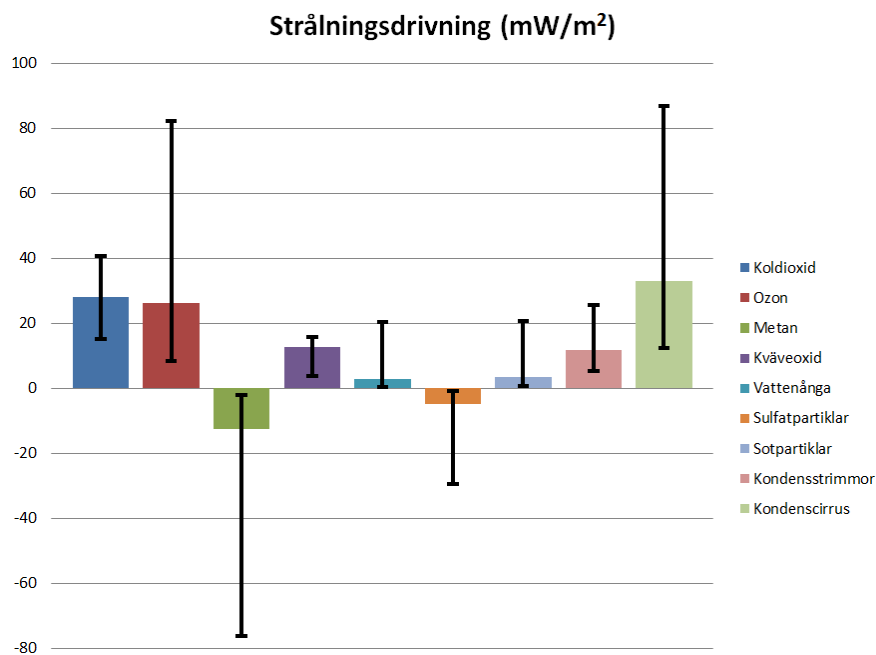
När det gäller kväveoxider (NO och NO<sub>2</sub>) så har dessa inte en direkt påverkan på strålningsdrivningen utan de inverkar indirekt genom att påverka förekomsten av metan (CH<sub>4</sub>) och O<sub>3</sub> (ozon). Ozonproduktionen ökar, framförallt runt marschhöjden, vilket ökar strålningsdrivningen (värmer). Utsläpp av kväveoxiderna leder också till att hydroxylradikaler bildas (OH) vilka minskar livslängden av metangaser i atmosfären. Detta minskar strålningsdrivningen (kyler). Denna process är långsammare än ozonproduktionen. Det är svårt att uppskatta nettopåverkan av kväveoxider eftersom effekten i huvudsak sätts samman av två relativt likstora komponenter. De uppskattningar som gjorts förutsätter att osäkerheterna i de två komponenterna är kopplade (korrelerade). Detta antagande har under lång tid saknat stöd men har nyligen stärkts (23).

Flygets nettopåverkan från strålningsdrivning skapad av kväveoxider värderades 2005 till +12.6 mW/m<sup>2</sup> med spridningsintervallet 3.8-15.7 mW/m<sup>2</sup> (90% konfidens). Det finns dock tecken på att denna uppskattning kan behöva revideras ned (24) baserat på slutsatser i (23). Dessa nya resultat värderade

<sup>80</sup> i form av kondensstrimmor, cirrus och vattenånga

kväveoxidernas nettoeffekt till  $4.5 \pm 4.5 \text{ mW/m}^2$  för år 2005. Det finns för närvarande ett stort behov av att uppdatera beräkningarna för en senare tidpunkt. Vetenskapliga arbeten på området publicerade under 2013 (24) använder fortfarande beräkningar för 2005.

Som diskuterats leder förbränning av flygbränsle till att vattenånga släpps ut i form av varm fuktig luft. Den relativa luftfuktigheten nedströms motorn är som regel låg och ofta är denna också låg i den omgivande atmosfären. Det är dock vanligt att avgasluften, då den blandas med omgivningsluften när mättnadspunkten för vatten, varvid kondensstrimmor uppstår då temperaturen är lägre än ett tröskelvärde (25). Om kondensstrimman blir varaktig beror på luftfuktigheten. Är den tillräckligt låg, lägre än mättnadspunkten för is, förångas kondensstrimmorna. Är det å andra sidan fuktigare än mättnadspunkten kommer kondensstrimman att bli varaktig. I vissa fall kan dessutom luften vara övermättad utan att ångan frysts ut. Tillgången på ispartiklar i kondensstrimmorna kan då trigga en kraftigt ökad molnbildning i form av cirrusmoln. Cirrusmoln som bildats från kondensstrimmor kallas här efter i denna text kortfattat för kondenscirrus.



**Figur 9** – strålningsdrivning av flygets emissioner, baserat på (16). Staplarna anger osäkerheter

När det gäller varaktiga kondensstrimmor råder viss samstämmighet om storleken på strålningsdrivningen. För år 2005 uppskattas denna till  $11.8 \text{ mW/m}^2$  med spridningsintervallet  $5.4\text{-}25.6 \text{ mW/m}^2$  (90% konfidens) (16). Preliminära resultat för 2011 tyder på att detta värde kommer att justeras ner något.

När det gäller strålningsdrivningen från kondenscirrus är osäkerheterna mycket stora, inte minst för att det är svårt att särskilja denna molnbildning från övrig molnbildning. För år 2005 uppskattas kondenscirrus till  $33 \text{ mW/m}^2$  med spridningsintervallet  $12.5\text{-}86.7 \text{ mW/m}^2$  (90% konfidens) (16). Nyligen har ett arbete publicerats där livscykeln från bildningen av kondensstrimmor till kondenscirrus simulerats (26). Arbetet bedöms utgöra ett betydelsefullt framsteg och simuleringarna resulterade i att en total kondensdrivning från kondensstrimmor och kondenscirrus uppskattades till  $31 \text{ mW/m}^2$ . Detta är lägre än motsvarande värde publicerat i (16), som ju blir ungefär  $45 \text{ mW/m}^2$ , men uppskattningen ligger väl inom det vida spridningsintervallet. Nyligen har en rapport publicerats som uppskattar avsevärt lägre värden på kondensstrimmor och på kondenscirrus;  $2.9 \pm 1.25 \text{ mW/m}^2$  respektive  $12 \pm 10.0 \text{ mW/m}^2$  (27), vilket lett till viss kontrovers (28). De lägre nivåerna förklarades huvudsakligen med att en hög tidsupplösning är nödvändig för att korrekt värdera påverkan av utsläppens dygns-beroende.

Preliminära resultat för 2011 verkar leda till att det kombinerade värdet av kondensstrimmor och kondenscirrus presenterade i (16) justeras upp något. Man kan konstatera att när det gäller kväveoxider, kondensstrimmor och kondenscirrus föreligger avsevärda osäkerheter både i modeller och mellan modeller. Uppskattningar för kondensdrivning tillsammans med motsvarande osäkerheter för år 2005 sammanfattas i Figur 9ovan. I denna figur har också vattenånga, sulfat- och sotpartiklar inkluderats. Notera att påverkan från ozon och metan summerar till kväveoxidens påverkan. Författarna har genom åren publicerat ett antal uppdateringar till dessa data men för närvarande saknas en komplett uppdatering för tiden efter 2005. Den totala strålningsdrivningen från flyget för år 2005 uppskattas till  $78 \text{ mW/m}^2$  med spridningsintervallet  $38\text{-}139 \text{ mW/m}^2$ . Om den mycket osäkra komponenten från kondenscirrus exkluderas representerar strålningsdrivningen från flygets emissioner 3.5% av mänskligt förorsakad strålningsdrivning (16).

#### *Andra mått på miljöbelastning*

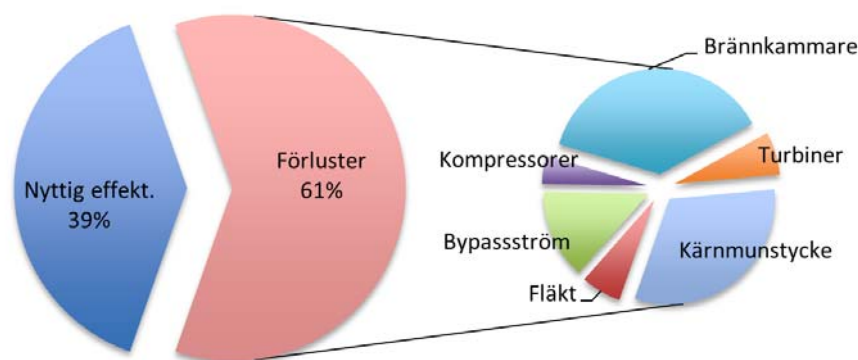
Ett annat sätt att värdera klimatpåverkan är att mäta den sammantagna strålningsdrivningen, eller mer korrekt uttryckt den integrerade, för en given tidsperiod efter att en viss mängd av en given emission släppts ut i atmosfären. Det går då att relatera emissionens sammantagna strålningsdrivning till motsvarande värde för utsläppet av ett kilo  $\text{CO}_2$ . Detta mått, kallat Global Warming Potential (GWP), visar då i någon mening hur skadligt för klimatet emissionen är. Tyvärr verkar det för närvarande vara svårt att få en samlad bild av flygets utsläpp baserat på detta mått då bland annat bedömningen av kväveoxidernas påverkan är mycket osäker (16). Generellt kan man dock konstatera att GWP-värdet för flygets emissioner avtar om en längre tidshorisont väljs, då de övriga emissionerna är mer kortlivade än  $\text{CO}_2$ . Uppskattningar för en tidsperiod på 100 år ger en uppräkningsfaktor av  $\text{CO}_2$ -emissionerna med en faktor 1.3-1.4 medan en 20-års period ger uppskattningar i intervallet 2.1-2.6 (29). Man bör dock vara försiktig med att tillämpa sådana globala

skattningar lokalt. Flygande på kortare distanser, som t.ex. inrikesflyget i Sverige, sker ofta på lägre flyghöjder där klimatpåverkan av övriga emissioner är mycket begränsad (18).

## Nulägesbeskrivning och framtida teknik

Ett flygplans energieffektivitet beror på ett antal faktorer. Flygplanet och motorns vikt, motorns effektivitet och flygplanets aerodynamik inverkar direkt på effektiviteten. Förutom dessa faktorer påverkar naturligtvis också driften av flygplanen hur effektivt bränslet omsätts i transportarbete. Effektiv drift innebär t.ex. att flyga med så få stolar tomma som möjligt, flyga utan omvägar och att utnyttja energi som lagrats upp i flyghöjd på ett så effektivt sätt som möjligt. I detta avsnitt diskuteras motorrelaterad teknik med den huvudsakliga tonvikten på energieffektivisering.

Även om dagens jetmotorer är långt mer effektiva än de tidiga konstruktionerna finns det fortfarande avsevärd potential till förbättring. I figuren nedan illustreras en grov förlustnedbrytning på en modern effektiv flygmotor.



**Figur 10** – förlustnedbrytning i modern flygmotor

Knappt 40% av det arbete som maximalt kan utvinnas ur bränslet tas tillvara i detta exempel. Förlustnivåerna är typiska för en modern motor konstruerad för längre flygsträckor. Motorer för kortare uppdrag är typiskt ytterligare några procent mindre effektiva.

I Figur 10 framgår det att stora förluster av potentiellt nyttigt arbete kan härledas till brännkammare, kärnmunstycke och förluster som uppstår i bypassströmmen. Den inledande diskussionen om termisk verkningsgrad och framdrivningsverkningsgrad blir nu användbar för att förstå hur detta hänger ihop.

Den termiska verkningsgraden, som i detta fall når upp till knappt 50%, tappar framförallt genom förluster i brännkammaren samt genom att kärnmunstycket släpper ut outnyttjad energi. Temperaturen i kärnmotorns utlopp är här mer än 400 grader högre än omgivningstemperaturen. Det finns teknik och innovationer som kan attackera båda dessa förlustkällor och några exem-



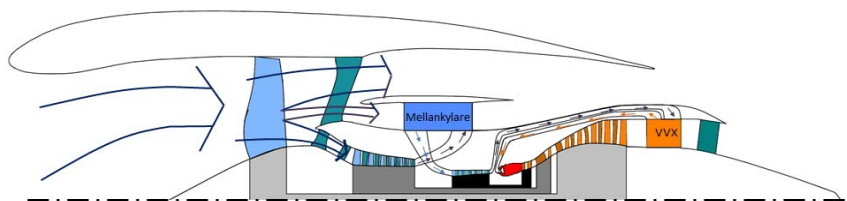
pel kommer att ges nedan. När det gäller förlusterna i bypassströmmen så bidrar de till att sänka framdrivningsverkningsgraden, som i det här fallet är runt 80%. Även denna stora förluskälla finns det teknik för att reducera avsevärt.

Även om det finns mycket kvar att hämta när det gäller konventionell teknikutveckling, en 20%-ig sänkning i bränsleförbrukning enbart genom förbättrade motorer är rimlig från idag till 2050, så kan mycket mer uppnås genom att radikal teknik som direkt attackerar de stora förluskällorna införs(30). De innovationer som återges nedan är utvalda för att de antingen representerar relativt mogen teknik eller har stor potential till energieffektivisering.

### Teknik för ökad termisk verkningsgrad

Den variant av flygmotorer som används industriellt för el-produktion, vanligen benämnd gasturbin, har höga utloppstemperaturer och därigenom stora förluster i termisk verkningsgrad. Denna termiska energi som inte gasturbinen tar till vara, nyttiggörs normalt i en nedströms placerad avgaspanna. Totalverkningsgraden för en sådan anläggning blir därför hög, idag en bit över 60%. För flygmotortillämpningar är naturligtvis vikts- och utrymmesproblematiken påtaglig, och att flyga runt med en konventionell avgaspanna blir naturligtvis totalt sett mycket ineffektivt.

En mera kompakt motortyp som utnyttjar avgasvärmen i kärnströmmen är den mellankylade avgasvärmväxlade motorn (IRA-Intercooled Recuperated Aero engine). Värme från kärnmotorströmmen återförs till brännkammarens inlopp. Detta sker genom att luften ut från högtryckskompressorn leds till en värmväxlare som är placerad i motorutloppet. Där ökas temperaturen i gasen innan den leds tillbaka till brännkammarinloppet(31).

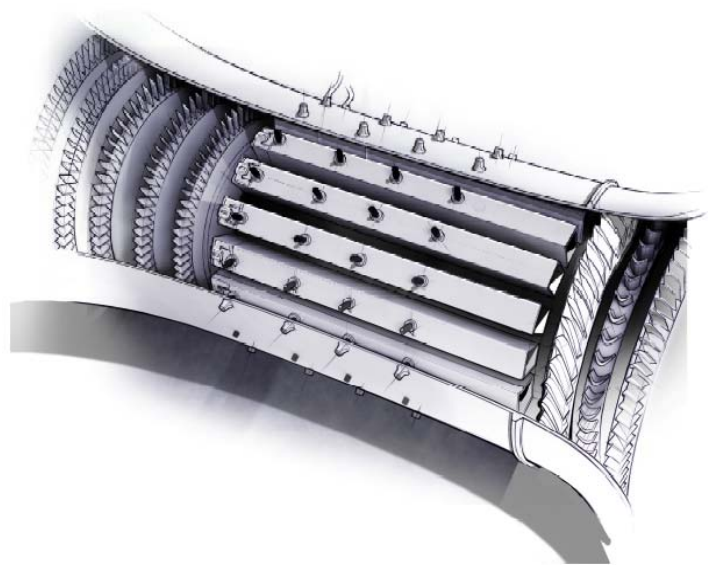


**Figur 11** – motor med avgasvärmväxling och mellankylning. Avgasvärmväxlare (VWX).

Därigenom får man lite av temperaturökningen gratis och mindre bränsle behöver förbrännas i brännkammaren. För att uppnå full effekt av avgasvärmväxlaren behövs också en mellankylare. Konceptet kan sänka bränsleförbrukningen med ytterligare 5-7% (30) utöver den 20%-iga sänkning som bedöms rimlig för en 2050-turbofläkt. Värmväxlartekniken har provats i realistiska miljöer (31)och tekniken är relativt mogen. Denna typ av motor bedöms kunna introduceras på marknaden inom 10-15 år. Till de mer väsentliga utmaningarna hör att behålla god livslängd i turbinerna då motorn kom-

mer att köras mycket varmare på marschhöjd än konventionella motorer, samt att få hög tillförlitlighet och livslängd i värmväxlarkomponenterna. Ett tekniskt mindre utmanande koncept är att ta fram en motor med bara mellankylning. Tekniken förväntas kunna ge 4-5% bränslebesparing jämfört med en konventionell motor(32).

Betydligt större utmaningar och förknippat med mer teknikrisk är införandet av innovationer som radikalt kan minska förlusterna i förbränningsprocessen. En teknologi som möjliggör detta är pulsdetonationsförbränning. Denna teknik möjliggör en tryckökning under förbränning i stället för en tryckförlust som dagens turbofläktmotorer är behäftade med. Flödet från brännkammaren blir pulserande och ett antal teknikutmaningar uppstår i samband med detta. Kylningen av turbinen blir svår att klara av då heta gaser hotar att tränga in i kylhål. Kompressorns stabilitet kan påverkas, det vill säga flödet kan börja pulsera i strömningsriktningen, så kallad pumpning, vilket inte kan tillåtas i normal drift. Att hålla nere bullernivåerna bedöms också vara en ansevärd utmaning. Idag har tekniken demonstrerats på delsystemnivå, brännkammare och i viss mån brännkammare i kombination med nedströms turbin, och avsevärda forskningsinsatser återstår innan tekniken kan tas i drift. Det bedöms rimligt att tekniken skulle kunna vara i kommersiell drift runt 2050. Konceptet har potential att minska bränsleförbrukning med 10-15%. Fördelarna kan utnyttjas tillsammans med effektiviseringar från en mellankylad eller avgasvärmväxlad och mellankylad motor. Den senare konfigurationen har bedömts ha potential att uppnå 16-20% bränslereduktion (30), utöver de 20% som anses möjliga med mer konventionell teknologi. Denna skattning är relativt osäker då tekniken fortfarande behöver demonstreras i helmotorkonfiguration.



**Figur 12** – kärnmotor med pulsdetonationskoncept (32)

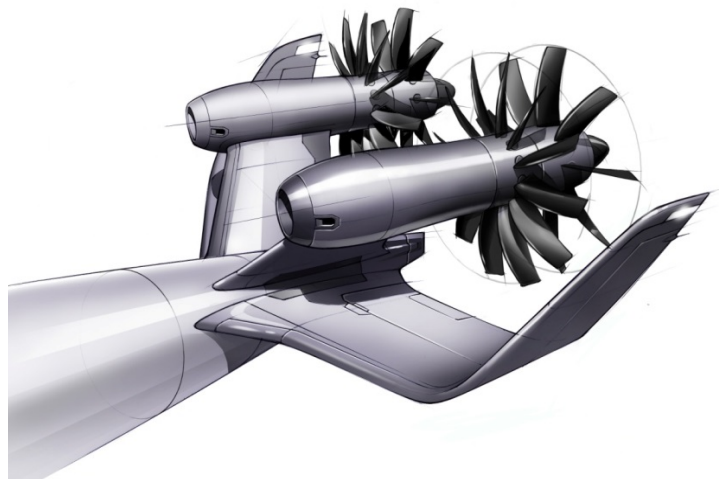
En ytterligare radikal teknik för att förbättra den termiska verkningsgraden är införandet av keramiska matriskompositersom turbinmaterial. Sådan teknik möjliggör att kylning av turbiner helt eller till stora delar kan elimineras. Detta leder direkt till en direkt minskning av förlusterna i turbinkomponenten. Avsevärde indirekta förbättringar kan också nås genom att det går att driva upp tryckförhållandet i motorn. Ett mått på hur mycket den här tekniken kan bidra till att sänka bränsleförbrukningen kan man få om man värderar effekten av att helt kunna ta bort kylningen. På 2010-teknik ger detta ungefär 10-12% sänkning i bränsleförbrukning. Denna typ av nya material införs redan i pågående motorutvecklingsprogram och bedömningen är att den kommer att spela en allt större betydelse för framtida motorer. Delar av denna förbättring är medtagen i den effektivisering som anges för 2050-tekniken. Helt införd uppskattas ytterligare 3-5% förbättring utöver den rapporterade 20%-iga förbättringen.

### **Teknik för ökad framdrivningsverkningsgrad**

Turbofläktmotorn har blivit allt mer effektiv då tryckförhållandet i motorn ökat samtidigt som motorns luftflöde och bypassförhållande har ökat. Större luftflöden och större motorer innebär att motorerna riskerar att bli så tunga att den potentiella förbättringen äts upp av viktsökningar. Därför är införandet av nya material och lättviktsteknik en av de viktigaste förutsättningarna för att fullt ut kunna tillgodogöra sig framtida konstruktions fördelar. Detta kräver även fortsatta landvinningar inom tillverkningsteknik och materialteknik.

En motortyp som har potential att drastiskt öka luftflödet och framdrivningsverkningsgraden är den okapslade turbofläktmotorn vilken illustreras i Figur 13 nedan och även tidigare i

Figur 4b. Som nämnts tidigare i rapporten flygprovades motorn redan på 80-talet. Idag har intresset för motortypen återuppväckts och omfattande utveckling av moderna varianter av denna motortyp sker i europeiska forskningsprogrammet Clean Sky (33). Den dubbla motroterande bladraden möjliggör att man kan flyga relativt snabbt och samtidigt öka framdrivningsverkningsgraden avsevärt. Framförallt nås stora förbättringar om flyghastigheten sänks något, runt 10%, från dagens nivåer. Bränsleförbrukningen förväntas kunna sänkas ytterligare med runt 10% från 2050-nivån(30) om okapslade turbofläktmotorer införs. En modern okapslad turbofläktmotor bedöms kunna vara kommersiellt tillgänglig på 8-10 års sikt utan allt för stor teknisk risk.



**Figur 13** – okapslade fläktmotorer

Ett alternativ till detta koncept är motorer med växlad fläkt. När fläkten i en traditionell turbofläkt görs allt större måste man minska varvtalet för att få rätt trycksättning av gasen. Eftersom fläkten är ihopkopplad med lågtrycksturbinen så snurrar även denna långsammare. Detta leder till att det drivarbete som turbinen uträttar per bladrad snabbt minskar och att man då måste ha allt fler steg i turbinen. Detta faktum är en allvarlig begränsning i att kunna förbättra energieffektiviteten. Idag införs därför på många nya motorer en växel mellan fläkten och lågtrycksturbinen. Då kan turbinen fortfarande snurra snabbt och man kan undvika många turbinesteg ökad vikt och minskad förbättring i bränsleeffektivitet. Tekniken har införts successivt från allt mindre motorstorlekar och är idag på väg att slå igenom i hela storleksspannet. Även om denna teknik på lång sikt kan leda till motorer med avsevärt ökade framdrivningsverkningsgrader, så är bedömningen att denna teknik inte helt kan nå de nivåer i framdrivningsverkningsgrad som är möjliga med okapslade fläktmotorer.

Sammantaget bedöms förbättringstakten i energieffektivitet uppnådd enbart genom mer effektiva motorer bli mellan 0.5-1.0% per år beroende på hur mycket radikal teknik som införs i framtida motorer. Hur snabbt denna teknik förs in i befintliga flygplansflottor beror på ett antal faktorer. Historiskt sett verkar den enskilt viktigaste faktorn vara bränslekostnad. De senaste åren tycks bränslepriserna ha stabiliserats på högre nivåer utan att tillväxttakten när det gäller passagerarkilometrar har avmattats märkbart. På grund av de höga driftskostnader som bränsleprisnivån innebär för flygbolagen bör man kunna hoppas på att ny teknik införs i relativt hög takt.

### **Svensk flygmotorindustri och flygforskning**

Oavsett vilken väg som väljs för framtida motorer, mer radikala innovationer eller konventionell utveckling, så har svensk industri en stark position. För att

förbättringar i framdrivnings-verkningsgraden ska kunna realiseras och leda till en maximal sänkning av bränsleförbrukningen, måste lättviktsteknik i form av materialteknik och tillverkningsteknik ständigt förbättras. Annars kommer delar av de potentiella förbättringarna att ätas upp av viktsökningar. Att utveckla flygmotorkomponenter baserat på lättviktsteknik är en svensk paradgren där GKN Aerospace i Trollhättan är världsledande. I en majoritet av dagens civila flygmotorer finns svensktillverkade komponenter!

När det gäller de mer radikala innovationer som beskrivits i detta avsnitt finns goda möjligheter till ökad industrialisering och arbetstillfällen i Sverige, dels när det gäller de traditionella områdena berörda ovan men även på områden som är kritiska för att kunna realisera de nya innovationerna(34). Till en okapslad turbofläktmotor behövs exempelvis avancerade roterande strukturer vilka möjliggör en effektiv installation av propellerbladen. Sådana koncept studeras av svenska forskare och ingenjörer inom forskningsprogrammet Clean Sky. Till okapslade turbofläktmotorer kan det exempelvis också bli aktuellt att utveckla kompressorer och nya propellerbladskoncept med avancerad aerodynamik. Forskning som anknyter till denna typ av innovationer bedrivs t.ex. inom nationella flygforskningsprogrammet (NFFP6). Till de ovan beskrivna motorerna med värmeväxlare, det vill säga mellankylad och mellankyld avgasvärmeväxlad motor, kan det för svensk räkning t.ex. bli aktuellt att leverera aerodynamiskt avancerade konstruktioner för installationer av värmeväxlarna. Forskning på detta område har bedrivits inom EU:s ramprogram (FP6 och FP7).

NRJA Flyg 2013 (34), beskriver den svenska innovationsprocessen på flygområdet och tar ett helhetsgrepp på de möjligheter svensk industri och forskning har inom flygområdet.

## Citerade arbeten

1. **Kuzmin, Vitaly.** Wikimedia Commons. [Online]  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ATVD-20-01.jpg>.
2. **ENGINE, NASA / GE UNDUCTED FAN.** Wikimedia Commons.  
[Online] [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nasa\\_ge\\_udf.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nasa_ge_udf.jpg).
3. **Douchet, Quentin.** Wikimedia Commons. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:EA\\_GP7200.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:EA_GP7200.jpg).
4. **Sckrabulis, David.** Wikimedia Commons. [Online]  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AF404\\_jet\\_engine\\_running\\_on\\_biofuel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AF404_jet_engine_running_on_biofuel.jpg).
5. **Nimbus227.** Wikimedia Commons. [Online]  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AOlympus593.JPG>.
6. **GE36 Design and Systems Engineering .Full scale technology demonstration of a modern counterrotating unducted fan engine concept.** s.l. : NASA, 1987. CR-180869.

7. **SEVICH, G., CHAPMAN, D. and SMITH, D.** *Preparing a propfan propulsion system for flight test*. s.l. : AIAA-87-1731, 1987.
8. **Pröckl, Eddie.** Fem sanningar om superbatterier. s.l. : Ny Teknik, 2014. 7.
9. **Scott W. Ashcraft, Andres, S. Padron, Kyle A. Pascioni, Gary W. Stout, Jr.** Review of Propulsion Technologies for N+3 Subsonic Vehicle Concepts. 2011. NASA/TM-2011-217239.
10. **Peeters, P, Middel J and Hoolhorst A.** Fuel efficiency of commercial aircraft. An overview of historical and future trends. s.l. : NLR, 2005. NLR-CR-2005-669.
11. **Avellán, Richard.** On the Design of Energy Efficient Aero Engines. s.l. : Chalmers University of Technology, 2011.
12. —. Towards Environmentally Friendly Aero Engines. s.l. : Chalmers, 2008.
13. **ICAO.** ICAO FACT SHEET - Aircraft CO2 Emissions Standard Metric System. [Online]  
[http://www.icao.int/Newsroom/Documents/CO2%20Metric%20System%20-%20Information%20Sheet\\_FINAL.PDF](http://www.icao.int/Newsroom/Documents/CO2%20Metric%20System%20-%20Information%20Sheet_FINAL.PDF).
14. **E Penner, J., Lister, D.H., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland, M. (Eds.),** Aviation and the global atmosphere. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1999.
15. *Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Aviation*. D.S. Lee, G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J.E. Penner, A. Petzold, M.J., Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Berntsen, D. Iachetti, L.L. Lim, R. Sausen. 37, December 2010, Atmospheric Environment, Vol. 44, pp. 4678–4734.
16. *Aviation and global climate change in the 21st century*. David S. Lee, David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, Robert Sausen. s.l. : Atmospheric environment, 2009, Vol. 43.22, pp. 3520-3537.
17. Agency, International Energy. *Key World Energy STATISTICS*. s.l. : IEA, 2013.
18. Karyd, Arne. *FOSSILFRI FLYGTRAFIK? Underlagsrapport till utredningen om fossiloberoende fordonsflotta*. 2013. N 2012:05.
19. Boeing. *Current Market Outlook*. 2013.
20. Airbus. *Global Market Forecast Future Journeys 2013-2032*. 2013.
21. **SECRETARIAT, ICAO.** ICAO 2013 Environmental Report - AIR TRAFFIC AND FLEET FORECASTS. 2013.
22. **Gregg G. Fleming, Urs René Ritz Ziegler.** ICAO ENVIRONMENTAL REPORT - ENVIRONMENTAL TRENDS IN AVIATION TO 2050. s.l. : ICAO, 2013.

23. Unvertainties in climate assessment for the case of aviation NO. **Holmes, C. D., Tang, Q. and Prather, M. J.** 27, s.l. : Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, Vol. 108, pp. 10997-11002.
24. **D. W. Fahey, S. L. Baughcum, M. Gupta, D. S. Lee, R. Sausen and P. F. J. van Velthoven.** AVIATION AND CLIMATE: STATE OF THE SCIENCE. s.l. : ICAO ENVIRONMENTAL REPORT, 2013.
25. **E., Schmidt.** Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung. München/Berlin : R. Oldenbourg, 1941, Vol. 44, pp. 1-15.
26. Global radiative forcing from contrail cirrus. **Burkhardt, U., and B. Kärcher.** s.l. : Nature Climate Change, 2011, Vol. 1, pp. 54-58.
27. Simulated radiative forcing from contrails. **Gottelman, C.-C. Chen and A.** 4, s.l. : Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2013, Vol. 13, pp. 10939–10959.
28. Interactive comment on “Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus” by C. C. Chen and A. Gottelman. **Schumann, U.** 2013.
29. Valuing the non-CO2 climate impacts of aviation. **Azar, C. and Johansson, D. J. A.** s.l. : Climatic Change, 2012, Vol. 111.
30. First and Second Law Analysis of Future Aircraft Engines. **T. Grönstedt, M. Irannezhad L. Xu, O. Thulin, A. Lundblad.** 3, s.l. : Journal of Engineering For Gas Turbines and Power, 2014, Vol. 136.
31. Intercooled Recuperated Gas Turbine Engine Concept. **Boggia, S. och Rud, K.** 2005. AIAA 2005-4192.
32. Assessment of the performance potential for a two-pass cross flow intercooler for aero engine applications. **X. Zhao, T. Grönstedt.** 2013. ISABE-2013-1215.
33. [Online] <http://www.cleansky.eu/>.
34. NRIA Flyg 2013 - Den svenska forsknings- och innovationsagendan för flyg. [Online] <http://www.nriaflyg.se/docs/nriaflyg2013-sv.pdf>.

## 7. Martin Hagström: Bränslen



**Handläggare**  
Martin Hagström

### Alternativa flygbränslen

#### Sammanfattning

De höga säkerhets- och tillförlitlighetskrav som råder inom luftfarten har medfört att alternativ till petroleumbaserade drivmedel blivit tillgängliga senare för flyget än för andra transportslag. Innan ett flygbränsle kan användas måste omfattande tester genomföras och driftsäkerheten fastställas för att flygbränslet skall kunna godkännas för användning. Idag finns dock flera godkända tekniska processer för tillverkning av alternativa flygbränslen och ytterligare ett antal förväntas bli certifierade inom några år. Bränsleproducenter, flygindustrier och flygbolag arbetar tillsammans och de senaste fem åren har antalet flygningar med flygbränslen av biologiskt ursprung stadigt ökat. Till skillnad från marktransporter som ofta rör sig i en begränsad region är luftfarten global och både tekniska lösningar och regelverk för förnyelsebara flygbränslen måste kunna införas internationellt för hela flygplansflottan. Det gör att även det politiska multilaterala arbetet har stor betydelse för möjligheten att införa alternativa flygbränslen. Även om det idag finns tekniskt godkända förnyelsebaserade flygbränslen är både kostnader och energiåtgång högre vid tillverkning av



flygbränsle från biobaserade utgångsmaterial än för motsvarande bränslen för andra ändamål, som marktransporter, kraft- eller värmeverk. Det är därför idag mer kostnads- och energieffektivt att använda förnyelsebara drivmedel inom andra transportslag än luftfarten.

## 1 Vad är alternativa flygbränslen?

Den helt dominerande typen av drivmedel<sup>1</sup> för flygplan är det som kallas jetbränsle. Med undantag av mycket små flygplan och helikoptrar med kolvmotorer är alla flygplan idag utrustade med turbinmotorer som drivs med jetbränsle, ofta benämnt JET A<sup>2</sup> (även kallat flygfotogen). Det är ett drivmedel som är lättare än diesel och tyngre än bensin och som består av en blandning av olika kolväten. Kolvmotorer, som finns i små flygplan<sup>3</sup> och helikoptrar, drivs till största del med flygbensin, så kallad Aviation Gasoline eller AVGAS. Det utgör dock en mycket liten del av luftfartens drivmedelsanvändning. I detta dokument används ordet flygbränsle som ett samlingsnamn för både JET A och AVGAS medan jetbränsle avser JET A.

Konventionella drivmedel tillverkas av råolja, petroleum, som utvinns ur berggrunden. Råolja innehåller hundratals olika kolväteföreningar, molekyler av kol och väte, av olika storlekar. I ett raffinaderi raffinerar oljan, orenheter som svavel och oönskade ämnen tas bort och råoljan delas upp i olika produkter som metan, bensin, brännolja (diesel) och smörjolja genom att utnyttja att lättare kolväten har en lägre kokpunkt än tyngre. I en destillationskolonn separeras på det sättet kolvätena efter vikt och varje produkt blir en smalare blandning av kolväten med likartad storlek. Bensin består till största delen av kolväten med 6–8 kolatomer, fotogen runt 11–13 och diesel 16–18. Dessa produkter innehåller fortfarande olika ämnen och en mängd kolväten, bl.a. aromater med ringformade molekyler som har stor betydelse för bränslets egenskaper och prestanda hos motorerna. Vissa egenskaper är kända och viktiga för motorerna och bränslesystemets funktion, t.ex. får aromater packningar att svälla vilket säkerställer att bränslesystemet inte läcker och svavel har betydelse för

<sup>1</sup>På svenska används ordet drivmedel för farkostbränsle. Drivmedel för flygfarkoster kallas dock oftast flygbränsle

<sup>2</sup>Jetbränsle enligt europeisk standard kallas JET A-1. Specifikationerna skiljer sig endast marginellt åt mellan standarderna, bl.a. avseende fryspunkt.

<sup>3</sup>Det finns idag för mindre flygplan kolvmotorer av dieseltyp som drivs med JET A.

smörjningen av mekaniska delar i systemet och därför får inte flygbränsle helt sakna dessa ämnen. Samtidigt har både aromater och svavel negativa egenskaper ur miljösynpunkt, svavlet bildar vid förbränning svaveldioxid vilket är hälsofarligt och försurar miljön, aromater är giftiga för människor och djur.

## 1.1 Möjligheter och begränsningar med alternativa drivmedel

Drivmedel är traditionellt tillverkade av råolja och alternativa drivmedel har ett annat ursprung. Med alternativa drivmedel avses vanligtvis sådana som är producerade av fossilfria råvaror. Strävan att minska utsläpp av fossil koldioxid är från klimatsynpunkt ett av de viktigaste skälen till att använda alternativa drivmedel. Fossilfria bränslen har använts inom olika sektorer under lång tid och nya lösningar provas framför allt inom fordonsindustrin. De biodrivmedel<sup>4</sup> som i första hand används för fordonsdrift idag skiljer sig på flera sätt från de traditionella petroleumbaserade drivmedlen. För att använda sådana drivmedel måste ibland justeringar göras i bränslesystem eller i motorn i ett fordon. Det är möjligt eftersom fordon ofta används inom ett begränsat geografiskt område och en lokal lösning för en fordonsflotta är praktiskt genomförbar. Bilar konstruerade för blanddrift med etanol är ett exempel på hur ett alternativt drivmedel som kräver särskilda distributionsnätverk och anpassade fordon kan införas utan att det kräver en förändring av alla äldre bilar.

Till skillnad från fordon trafikerar flygplan i kommersiell trafik sällan ett begränsat område utan fyller jetbränsle på olika flygplatser i olika länder. Flygplan har också, till skillnad från bilar, en mycket lång livslängd, ofta upp till 30 år eller mer. Flygplan är också dyra och ägnas mycket underhåll för att hela den tekniska livslängden skall kunna användas. På en flygplats finns alltså flygplan med motorer av olika tekniska generationer och dessa flygplan tankar idag samma jetbränsle. Av säkerhetskäl är jetbränslets egenskaper noga föreskrivna och endast bränsle som är godkänt enligt internationella överenskommelser är tillåtet att använda. Även om det skulle vara tekniskt möjligt att utveckla nya motorer som kan använda sig av ett nytt alternativt jetbränsle med andra egenskaper än det konven-

<sup>4</sup>Ibland kallas dessa 1:a generationens drivmedel men numera används termen *konventionella* biodrivmedel

tionella skulle det krävas en global distributionskedja för detta, parallellt med det idag existerande. Sådana alternativ diskuteras och det har gjorts studier, t.ex. av vätgas som drivmedel i EU-projektet Cryoplane. För att använda vätgas måste nya flygplan och motorer utvecklas, vilket är möjligt för enstaka specifika tillämpningar som Boeings Phantom Eye [1] men inte för den existerande flygplansflottan. Distributionssystem för jetbränsle på en större flygplats är en stor installation och det inte går att blanda två flygbränslen med olika egenskaper. Separata distributionssystem med olika flygbränslen för olika generationers flygplan skulle krävas vilket är komplicerat och kostsamt. Ett speciellt flygbränsle för speciella flygplan har därför en mycket liten marknad samtidigt som kostnaderna för att utveckla en sådan lösning är oerhört höga. Det medför att ett nytt flygbränsle måste fungera precis som det konventionella, kunna blandas med det konventionella jetbränslet, utan förändrade egenskaper för användas i alla gamla och nya flygplan. Alternativa flygbränslen innebär inte ett annorlunda flygbränsle utan ett jetbränsle som motsvarar de internationella kraven, som kan blandas med konventionellt jetbränsle<sup>5</sup> och användas på samma sätt som ett konventionellt jetbränsle men producerat ur alternativa råvaror som inte är petroleumbaserade.

En del av drivmedlet i ett flygplan används för att producera elektricitet som även behövs när planet står parkerat på marken. För detta ändamål används för trafikflygplan en mindre turbinmotor som drivs med jetbränsle. Om den ersätts med en vätgasdriven bränslecell minskar förbrukningen av jetbränsle. Drivkraften för en sådan utveckling är dock att minska de lokala utsläppen vid flygplatsen i syfte att förbättra den lokala luftkvaliteten och bidrar i mycket liten grad till en total minskning av jetbränsle.

## 1.2 Alternativa flygbränslen – säkerhet först

Eftersom fel och störningar på ett flygplan kan få fatala följder är säkerhetsarbetet rigoröst inom luftfarten. Civil luftfart regleras tekniskt och operativt av flygsäkerhetsmyndigheter som European Aviation Safety Agency (EASA) i Europa och Federal Aviation Administration (FAA) i USA och nationella myndigheter som Transportstyrelsen. Internationellt regleras överenskommelser om civil flygtrafik av den internationella civila luft-

<sup>5</sup>På engelska kallas det ofta för "drop-in-fuel".

fartsorganisationen, ICAO (International Civil Aviation Organisation), ett av FN:s fackorgan med säte i Montreal. Dessa myndigheter beslutar om regelverk och krav som gäller för organisation och flygplan. Alla tekniska system kontrolleras regelbundet och mycket noga, allt för att inga driftstörningar skall uppstå. Flygbränslet i sig är en lika viktig komponent som motorn och övriga delar av bränslesystemet och därför är även bränslet föremål för noggranna granskningar och hårda kvalitetskrav som kontrolleras under hela produktionskedjan fram till påfyllningen i flygplanets tankar. Flygplan i kommersiell trafik måste använda sig av bränsle som uppfyller motor- och flygplantillverkarnas krav och som är godkänt av flygsäkerhetsmyndigheterna.

Den mycket höga tillförlitlighet som flygmotorer idag uppvisar är en följd av en teknikutveckling som pågått under lång tid och där motorerna och bränslet har anpassats för att fungera tillsammans. Om alternativ till petroleumbaserat jetbränsle skall användas i flygplan måste det nya flygbränslet ha samma kemiska och fysikaliska egenskaper som konventionellt jetbränsle.

Specifikationerna för jetbränsle är mycket detaljerade och föreskriver egenskaper som kokpunkt, köldtålighet, viskositet, täthet, svavelhalt, kemisk stabilitet m.fl. Specifikationerna, utvecklade och fastställda av standardinstitutet ASTM<sup>6</sup>, förutsatte ursprungligen att bränslet producerats med råolja som utgångsmaterial. En del egenskaper är i det fallet en naturlig följd av valet av råvara och har tidigare inte varit nödvändiga att specificera. När andra råvaror (t.ex. kol, naturgas eller vegetabiliska fetter och oljor) börjat användas som bas för bränslet har specifikationerna utökats för att täcka alla de av egenskaper som är av betydelse för prestanda och driftsäkerhet i flygmotorsammanhang. Arbetet med att utöka specifikationerna för att komplettera standarden till att omfatta flera olika tillverkningsprocesser och råvaror har intensifierats och nya tillägg är

---

<sup>6</sup>ASTM (en internationell standardiseringsorganisation, se <http://www.astm.org/>), och det brittiska försvarsdepartementet har båda utvecklat standarder för flygbränsle. Idag är standarden internationell med små skillnader i detaljer (som maximalt tillåten svavelhalt) mellan världsdelenarna.

planerade under de närmaste åren.

## 2 Tekniska lösningar, processer för att tillverka bränsle

Traditionellt framställs jetbränsle genom raffinering av råolja men det kan framställas på andra sätt. En naturlig utgångspunkt är en energirik råvara som genom kemiska och fysikaliska processer förändras till att bli ett bränsle med de egenskaper som krävs. Väsentligen behövs kol, väte och energi för att sätta ihop de två grundämnena till de molekylkedjor som utgör jetbränsle. Genom komplicerade processer går det att tillverka jetbränsle från naturgas, animaliska eller vegetabiliska fetter eller kolhydrater som spannmål och rester från skogsbruk. USA:s flotta har genomfört försök med vatten och luft som råvaror och tillfört energi för att göra bränsle, ett extremt tillvägagångssätt som kräver stora energimängder men som är intressant ur ett militärtaktiskt perspektiv.

### 2.1 Bakgrund och historia

Tidiga försök att tillverka flytande bränsle av något annat än råolja genomfördes på 1920-talet av de tyska forskarna Fischer och Tropsch. De uppfann en metod att tillverka ett flytande syntetiskt drivmedel genom att förgasa fast kol och i en katalytisk process bilda vätskeformiga kolväten, den så kallade Fischer-Tropsch-processen, ofta kallad FT-processen. Den användes under andra världskriget för att tillverka syntetiska drivmedel då det rådde oljebrist i Tyskland. I Sydafrika, som har stora koltillgångar, utvecklades tekniken under apartheidtiden då landet inte fick importera råolja, till att producera flera typer av drivmedel. Fischer-Tropsch-processen producerar mycket rena drivmedel, ofta kallade FT-bränslen, fria från aromater, svavel och andra ämnen som gör att de inte är giftiga och när de förbränns skapar mycket lägre halter av skadliga restprodukter. Om de skall användas som jetbränsle krävs dock tillsatser av aromater och svavel för att uppfylla de krav som ställs på sådant drivmedel.

I Sydafrika började jetbränsle tillverkas på annat sätt än genom traditionell raffinering av råolja på 1990-talet. Koltillgångarna och den väl utvecklade FT-tekniken gjorde att man arbetade vidare med alternativa produktionsvägar och sedan 1999 har ett alternativt jetbränsle varit kom-

mersiellt tillgängligt i Sydafrika. Alternativt betyder i detta fall inte att det är fossilfritt då råvaran består av kol men FT-processen är i sig inte begränsad till att använda kol eller naturgas som råvara utan biomassa i olika former är också användbart<sup>7</sup>.

## 2.2 Teknik och certifiering

Flygplans- och motortillverkare arbetar tillsammans med drivmedelsproducenter för att utveckla specifikationer för hur flygbränslen skall produceras med olika tekniker och råvaror. Aktörerna samlas i olika organisationer för att driva utveckling av teknik och standarder framåt. I USA finns föreningen *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* (CAA-FI), en sammanslutning av flygbolag, motortillverkare, drivmedelsproducenter, forskare och amerikanska myndigheter. Inom ramen för standardiseringsorganisationen ASTM genomförs sedan de slutliga analyserna och beslut om inkludering av nya processer till standarden.

Idag finns två certifierade processer för att tillverka jetbränsle som inte är petroliumbaserade. FT-processen med vilken man kan producera bränsle av många olika råvaror och vätebehandling av estrar och fettsyror (HEFA). Inom ASTM finns åtta arbetsgrupper som genomför tester och samlar data för olika processer. Målsättningen är att kunna tillverka jetbränsle med de nödvändiga aromaterna från en stor mängd olika förnyelsebara råvaror. Socker och cellulosa utgör en stor del av tillgängliga biomassar och därför ägnas mycket arbete åt att utveckla tekniker för detta, bl.a. har svenska företaget Swedish Biofuels utvecklat en process för att konvertera alkohol till jetbränsle.

### Fischer-Tropsch, FT

Det var det brittiska försvarsdepartementet som ledde det första arbetet med att certifiera den specifika process som företaget Sasol hade utvecklat i Sydafrika. Det resulterade i ett tillägg till den brittiska standarden för jetbränsle [2] som föreskriver hur syntetiskt jetbränsle producerat med Sasols FT-process kan användas. 1999 kom den första specifikationen som tillät upp till 50 % inblandning av syntetiskt jetbränsle och 2008 tillät stan-

---

<sup>7</sup>Flytande drivmedel med kol som ursprung benämns ofta CTL (coal to liquid) och på samma sätt används GTL för drivmedel producerade av gas (gas to liquid) samt BTL (bio to liquid) för drivmedel producerat av biomassa.

darden ett helt syntetiskt jetbränsle [3]. Dessa jetbränslen är kolbaserade och producerade med Sasols FT-process.

### Vätebehandling av estrar och fettsyror, HEFA

År 2011 certifierades jetbränsle producerat av estrar och fettsyror med hjälp av vätebehandling, så kallade andra generationens bio-drivmedel. Processen benämns inom flygbränslesammanhang *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA). Genom kemiska processer (vätebehandling i olika steg) och värmebehandlingar kan ämnena renas och långa molekylkedjor brytas ner till kortare för att nå en produkt kemiskt ekvivalent med konventionellt jetbränsle. Råvaran i dessa processer är fettrika växter eller animaliska fetter som innehåller kolvätenmen med en andra egenskap än råolja. Olja från purgerbuskens frön (jathropha-olja), camelinaolja från växten oljeådra och sojaolja gjord av sojabönor är några av de vegetabiliska oljor som idag används och diskuteras som lämpliga råvaror för jetbränsletillverkning. Oljeproducerande alger har också fått stor uppmärksamhet, framför allt på grund av en snabb tillväxt och stor avkastning och möjligheten att kunna odla dem i grävatten vilket skulle kunna minska vattenåtgången och därmed miljöbelastningen vid odling.

### Alkohol till jetbränsle, ATJ och vätebehandlad cellulosa, HDCJ

Även om vegetabiliska oljor är energirika utgör kolhydratbaserade källor som socker och cellulosa den största tillgången av förnyelsebar råvara. Att göra jetbränsle av socker eller cellulosa kräver flera processsteg men det finns lovande tekniker och nya tillägg till ASTM:s standard för syntetiskt jetbränsle väntas bli godkända under det närmaste åren. De tillägg som idag är under revision handlar om tekniker som gör det möjligt att omvandla både socker (via alkohol) och lignocellulosa till jetbränsle. Swedish biofuels teknik är en av dessa som provas i en pilotanläggning med en årlig produktionskapacitet på totalt 10 t drivmedel, vara ca. 4,8 t jetbränsle. Jetbränslet har testats av amerikanska flygvapnet och uppgifter gör gällande [4, sid. 47–48] att det motsvarar uppställda krav. Resultaten från testerna av jetbränslet är nu föremål för analys inom ASTM för en möjlig certifiering.

## 2.3 Utveckling och standarder

Arbetet med att utveckla den formella standarden för bränslet producerat med Sasols FT-teknik gav kunskaper om hur nya jetbränslen producerade på alternativa sätt skall karakteriseras, beskrivas och kravställas, vilket gjorde att steget till en generell standard (som inte var byggde på Sasols egen teknik) för inblandning av syntetiskt FT-producerade kolväten i jetbränsle var mycket kortare än utvecklingen av den första standarden. Redan 2009 gav standardiseringsorganisationen ASTM gav ut en sådan standard (ASTM 7566) [5] inom vilken olika processer kan certifieras för upp till 50 % inblandning i petroleumbaserat jetbränsle. ASTM gav också ut en standard för tillvägagångssättet för värdering av nya jetbränslen<sup>8</sup>. CAAFI har gett ut en handledning i hur man använder den standarden för att underlätta för drivmedelsproducenter att utveckla nya jetbränslen [7]. CAAFI har även utvecklat en skala för att ange hur moget ett alternativt flygbränsle baserat på en viss process och råvara är kallad *Fuel Readiness Level* (FRL) [8].

Testerna som behöver genomföras för certifieringen av ett nytt jetbränsle sker i fyra steg. Först provas de de egenskaper som föreskrivs i standarderna för konventionellt jetbränsle. För detta behövs endast en mindre mängd bränsle, knappt 40 l. Sedan provas egenskaper som är viktiga för prestandan i gasturbiner, egenskaper som är väl kända för petroleumbaserade drivmedel men beroende på råvara och vilken process som använts produktionen kan skilja sig från konventionella bränslens egenskaper. Till detta behövs tio gånger så mycket av provbränslet. Därefter provas bränslet i hela komponenter och i motorprovrigger vilket kan kräva upp till 40 000 l provbränsle. Om det anses nödvändigt görs sedan fullskaleprov på motorer. Alla provresultat rapporteras och värderas av ASTM:s medlemmar. För att genomföra alla test som krävs för att certifiera ett nytt jetbränsle kan det krävas närmare 900 000 l provbränsle. För att tillverka så stora mängder krävs betydligt större anläggningar än tillverkning i laboratorieskala. Det gör att det krävs relativt stora investeringar redan innan det är klart att ett nytt jetbränsle kan bli certifierat, något som gör det nödvändigt att kapitalstarka aktörer deltar i utvecklingen. Drivmedelsproducenter som oljebolag är därför några av de mest aktiva i arbetet med att utveckla nya jetbränslen. Forskningsfinansiärer är en annan viktig grupp

---

<sup>8</sup>(ASTM D4054) [6]



för utvecklingen av nya jetbränslen. T.ex. har det amerikanska försvarets forskningsråd, DARPA<sup>9</sup>, tillsammans med Försvarets materielverk (FMV) finansierat en pilotanläggning i Sverige för tillverkning av bio-jetbränsle.<sup>10</sup> Denna pilotanläggning har varit en framgång och EU finansierar nu en större anläggning.

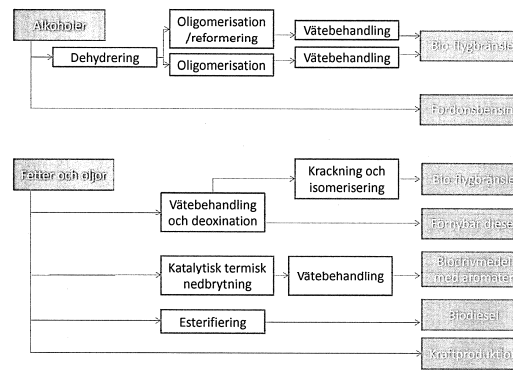
## 2.4 Framtida utmaningar

Flygmotorer är utvecklade under lång tid för att fungera under en mängd olika förutsättningar. Jetbränsle har utvecklats parallellt och tillsammans fungerar de som ett mycket tillförlitligt system. Konventionellt jetbränsle, baserat på råolja, har en bred sammansättning av många kolväten med olika karaktär. Vegetabiliska oljor har en mer begränsad uppsättning kolväten och även efter ett flertal processteg finns det skillnader på ett jetbränsle producerat med t.ex. HEFA-processen och konventionellt jetbränsle. Exakt hur detta påverkar motorer och bränslesystem är inte helt klarlagt. Till exempel har bristen på de för motorsystemen viktiga aromaterna i syntetiska jetbränslen hittills varit ett problem. Idag studeras dock flera processer för tillverkning av syntetiska aromater och ASTM har arbetsgrupper som analyserar testresultat även från de processerna.

En annan konsekvens av de högt ställda kraven på jetbränsle är att det krävs fler processteg för att tillverka jetbränsle jämfört med andra drivmedel eller bränsle för kraft- eller värmeproduktion, illustrerat i figur 1. Dessa processteg är både energi- och kostnadskrävande. Processerna är energikrävande och energi går även förlorad i värme. Ett sätt att göra drivmedelproduktion energieffektivare kan vara att kombinera en sådan med ett bio-värmeverk. År 2009 gjordes en studie [9] av möjligheterna med ett sådant kombinat i anslutning till Arlanda. I en omfattande analys [10] har det norska energiforskningsinstitutet SINTEF jämfört olika tekniker och processer för produktion av syntetiska biojetbränslen. Där beräknas energieffektiviteten av de olika processerna. För HEFA (vätebehandling av estrar och fettsyror) anges en total energieffektivitet på 38 % för hela processen (förutom jetbränsle produceras även andra drivmedel som diesel) och 6 % för jetbränslet. För FT-processen uppskattas den totala energieffektiviteten till 46 % - 79 % där det högre värdet kommer från den ovan

<sup>9</sup>Defense Advanced Research Projects Agency, [www.darpa.mil](http://www.darpa.mil)

<sup>10</sup>Swedish Biofuels laboratorier på KTH, <http://www.swedishbiofuels.se/projects>



Figur 1: Processteg för att tillverka bränsle av alkoholer eller fetter och oljor. Det krävs mer energi och fler processteg för att tillverka flygbränsle. Flyg är inte den mest effektiva användningen av alternativa bränsleråvaror, varken för ur ett kostnadsperspektiv eller för reduktion av växthusgaser.

nämnda studien av en kombinerad drivmedels- och värmeproduktion. FT-processen beräknas ge en energiomvandlingseffektivitet för jetbränsle på 25 %. För ATJ, alkohol till jetbränsle, anges den totala energieffektiviteten från 32 % - 45 % för de processer som studerats. För jetbränsle uppskattas energiomvandlingseffektiviteten till 29 %. Uppskattningarna bygger på kunskap om existerande teknik och processer men eftersom det saknas erfarenheter från verkliga storskaliga system kan dessa uppskattningar innehålla osäkerheter av olika grad.

### 3 Hållbarhet

Sökandet efter alternativa produktionssätt för jetbränsle har flera drivkrafter men gemensamt för dessa är att nå en ökad hållbarhet, både avseende tillgång till jetbränsle och minskad påverkan på klimat och miljö eller samhälle. En råvara som konkurrerar med matproduktion eller vars produktionsprocess till drivmedel orsakar stora koldioxidutsläpp, t.ex. på grund av energikrävande transporter, har svårt att kvalificeras som ett hållbart alternativ.

Det finns idag flera olika definitioner och standarder som tillämpas på biobaserade flygbränslen, både frivilliga och tvingande. Idag skiljer sig dessa åt på flera sätt och en harmonisering kommer att bli nödvändig då användarna, flygbolagen, opererar globalt där de olika aktörerna (flygbolag, bränsleleverantör, råvaruleverantör och flygplats) kan ligga i olika länder och lyda under olika regelverk. Att det kan leda till problem illustreras bl.a. av diskussionerna kring EU:s system för handel med utsläppsrätter, ETS [11], där även den europeiska luftfartens utsläpp numera ingår. Ursprungligen ingick all luftfart som landade eller startade från en flygplats inom EU i utsläppshandeln men efter protester från länder och flygindustri utanför EU, som inte accepterade att drabbas av nya kostnader som beslutats av en annan stat, ingår bara utsläpp från luftfart i EES:s lufttrum i ETS. Protesterna var många [12], USA förbjöd i en lag [13] amerikanska flygbolag att delta i den europeiska handeln med utsläppsrätter. Att den europeiska luftfarten numera ingår i ETS men inte flygbolag i andra länder kan få en negativ konkurrenseffekt för europeiska flygbolag [14].

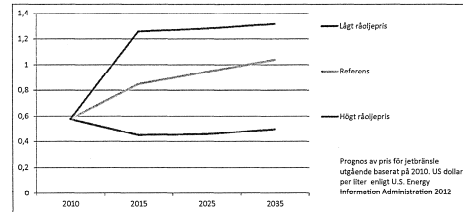
EU har i ett direktiv angett krav på förnybar energi *Renewable Energy Directive*, ofta kallat RED [15]. RED styr tillsammans med direktivet om bränslekvalitet, *Fuel Quality Directive (FQD)* lagstiftningen om hållbarhet för bränslen inom EU. I USA är *US Renewable Fuel Standard (RFS)* en motsvarighet. Det finns skillnader i flera avseenden, till exempel vad gäller metod för att beräkna emissionerna av växthusgaser. Eftersom luftfarten är global är internationella regelverk en nödvändighet för att de skall kunna ge den eftersträvarde effekten. Även om EU inte lyckades införliva all luftfart som landar eller startar inom EES finns ambitionen kvar och i FN:s organ för civil luftfart, ICAO, enades medlemsländerna på ICAO:s generalförsamlings möte i september 2013 om att arbeta fram ett globalt marknadsbaserat styrmedel för flyget vilket skall vara färdigt 2016 och träda i kraft 2020 [16, 17].

## 4 Kostnad

För luftfarten är drivmedelskostnaden en betydande del av den totala driftkostnaden och mycket större jämfört med marktransporter. Det gör att luftfarten är mycket känslig för prisökningar på jetbränsle. Drivmedel har vid flera tillfällen de senaste fem åren utgjort den enskilt största kostnaden för vissa flygbolag. Flygbolagens marginaler är små och det finns

mycket små utrymmen för att välja alternativa jetbränslen med ett högre pris även om det finns miljömässiga fördelar. Alternativa, biobaserade jetbränslen har alltså en betydande ekonomisk utmaning då tillverkningen av jetbränsle med bio-råvaror innebär en mer komplicerad och energikrävande process jämfört med tillverkning av andra drivmedel.

Även om det råder osäkerhet om priset på konventionellt jetbränsle förväntas det stiga de kommande årtiondena på grund av en ökad efterfrågan av råolja. Under 2008 varierade priset mycket, jetbränsle kostade mellan 0,25 USD och 1,13 USD per liter. Under de senaste tre åren har priset varierat mellan 0,69 USD och 0,88 USD per liter<sup>11,12</sup>. Bortsett från Sasols



Figur 2: En prognos för prisutvecklingen på konventionellt jetbränsle gjord av U.S. Energy Information Administration [18].

produktion av FT-jetbränsle finns idag ingen storskalig industriell produktion av alternativa jetbränslen. De analyser och kostnadsberäkningar som har gjorts baseras på erfarenheter från pilotanläggningar och i de fall det är möjligt på liknande processer i kemisk industri. Pearlson m.fl. har gjort en studie [19] av produktionskostnaden för HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) och deras beräkningar pekar på en produktionskostnad på mellan 1,01 USD och 1,16 USD per liter. En stor osäkerhetsfaktor i produktionskostnader är kostnaden för råvaror. En ökad efterfrågan av dessa råvaror kommer öka priset.

<sup>11</sup><http://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/price-development.aspx>

<sup>12</sup>Priset på petroleumprodukter anges i olika mått och i olika valutor. Här har omräkning skett till US Dollar per liter men i litteraturen anges mängd i olika mått bl.a. volymmått som *barrel*, som i råoljesammanhang motsvarar 42 US Gallons (ca. 159 l), energimått som *British Thermal Units* (BTU) vilket motsvarar ca. 1055 J (1 BTU ca. 40 µl jetbränsle) eller massa (kg).

USA:s försvarsmakt har under de senaste fem åren köpt närmare 7,7 miljoner liter alternativa jetbränslen. Deras inköp ger en bild av kostnaden för olika alternativ. För 2,8 miljoner liter FT-bränsle (producerat av kol och naturgas) betalade man i medeltal 0,99 USD per liter och för 4,1 miljoner liter HEFA 10,11 USD per liter [4, sid. 34].

De kostnadsdrivande faktorerna skiljer sig åt mellan de olika processerna (FT, HEFA, ATJ etc.). Medan kapitalkostnaderna utgör upp till 75 % av produktionskostnaden för FT-processen är den betydligt lägre för HEFA där råvaran står för motsvarande del och kapitalkostnaden mindre än 10 % [4, sid. 37].

Produktionskostnaden bestämmer inte entydigt priset då regleringar som kvoter för andel förnyelsebar energi i olika sektorer i kombination med marknadsbaserade styrmedel som handel med utsläppsrätter påverkar prissättningen. Idag går det att producera FT-jetbränsle baserad på naturgas och kol till en konkurrenskraftigt kostnad. Studien [9] av en kombinerad värme- och drivmedelsproduktionsanläggning med biomassa som råvara indikerade att en sådan lösning också kan vara konkurrenskraftig. Det saknas idag erfarenheter av andra lösningar i större skala.

## Litteraturförteckning

- [1] Phantom eye. [http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_Phantom\\_Eye](http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Phantom_Eye), februari 2014. Besökt 2014-02-20.
- [2] UK Ministry of Defence. Defence standard 91-91, april 2006. Turbine Fuel, Aviation Kerosine Type, Jet A-1 NATO Code: F-35 Joint Service Designation: AVTUR.
- [3] Sasol. Sasol achieves approval for 100% synthetic jet fuel. <http://www.sasol.com/media-centre/media-releases/sasol-achieves-approval-100-synthetic-jet-fuel>, april 2008. Nedladdad 2013-01-07.
- [4] IATA. IATA 2013 Report on Alternative Fuels, december 2013. <http://www.iata.org/publications/Documents/2013-report-alternative-fuels.pdf>.
- [5] ASTM International. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons, september 2009. D 7566 – 09.

- [6] ASTM International. Standard practice for qualification and approval of new aviation turbine fuels and fuel additives, 2009. D 4054 - 09.
- [7] CAAFI. ASTM D4054 Users' Guide, december 2013.
- [8] CAAFI. Fuel Readiness Level (FRL), januari 2010. Nedladdad 2013-01-07.
- [9] Tomas Ekbohm, Carl Hjerpe, Martin Hagström, och Fredrik Hermann. Pilot study of bio-jet A-1 fuel production for Stockholm-Arlanda airport. Teknisk rapport 1125, Värmeforsk, november 2009.
- [10] Berta Matas Güell, Mette Bugge, Rajesh S. Kempegowda, Anthe George, och Scott M. Paap. Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation. Teknisk rapport, SINTEF Energy Research, november 2012.
- [11] European Union. The EU Emissions Trading System (EU ETS). [http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/factsheet\\_ets\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/factsheet_ets_en.pdf), oktober 2013.
- [12] SVT Nyheter. Ilska mot eu:s utsläppskrav för flyg. <http://www.svt.se/nyheter/varlden/ilska-mot-eu-s-utslappskrav-for-flyg>, oktober 2011.
- [13] United States Congress. European Union Emissions Trading Scheme Prohibition Act of 2011. <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-112s1956enr/pdf/BILLS-112s1956enr.pdf>, november 2012.
- [14] Maria Svantemark. Införlivandet av flygtrafiken i EU:s handel med utsläppsrätter - en konsekvensanalys. Kandidatuppsats, Lunds Universitet, Nationalekonomiska institutionen, 2012.
- [15] Europaparlamentets och Europarådet. Främjande av användningen av energi från förnybara energikällor. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:SV:PDF>, april 2009.
- [16] ICAO. Resolutions adopted by the assembly assembly - 38th session. [http://www.icao.int/Meetings/a38/Documents/Resolutions/a38\\_res\\_prov\\_en.pdf](http://www.icao.int/Meetings/a38/Documents/Resolutions/a38_res_prov_en.pdf), november 2013.

- [17] Regeringskansliet. Direktiv om utsläppsrätter och flyget. [http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/EU/Fakta-PM-om-EU-forslag/Direktiv-om-utslappsratter-och\\_H106FPM36/](http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/EU/Fakta-PM-om-EU-forslag/Direktiv-om-utslappsratter-och_H106FPM36/), december 2013. Faktapromemoria 2013/14:FPM36.
- [18] Energy Information Agency. Annual energy outlook 2012- with projections to 2035, juni 2012. DOE/EIA-0383(2012).
- [19] Matthew Pearlson, Christoph Wollersheim, och James Hileman. A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 7: 89–96, 2013.

## 8. Tomas Mårtensson: Flygtrafikledning



Handläggare  
Tomas Mårtensson

### Flygtrafik och flygtrafikledning för framtidens luftfart

Sedan bröderna Wrights historiska flygning vid Kitty Hawk i North Carolina 17 december 1903 har flyget utvecklats till en helt självklar del av transportsystemet. Utvecklingen har varit betydelsefull för globaliseringen. Flyget har skapat ett förhållandevis billigt och mycket tillgängligt system som snabbt kan transportera människor och gods över världen. För en stor del av jordens befolkning är en flygresor idag ingen stor investering utan ett reellt resealternativ.

#### 1 Flygtrafikens utveckling

Redan så tidigt som 1910 diskuterades vid en konferens i Paris de grundläggande frågorna hur man skulle förhålla sig till luftrummet. Kunde man likställa utnyttjandet av luften med friheten på världshaven, eller skulle det vara reglerat på annat sätt? Efter första världskriget, då man insett att flyget tillhörde framtiden, beslutades 1919, också i Paris, att nationer har suveränitet över sitt luftrum och det ställdes också krav på införande av nationella register av flygplan och certifikat för piloter [1]. På området flygnavigering bildades 1903 ICAN (International Commission for Air Navigation) vilken redan 1912 reglerade delar av hur radiotrafiken från



flygplans skulle hanteras.

Det som ofta betraktas som den juridiska grundpelaren för att möjliggöra ett internationellt flygtransportsystem i stor skala förhandlades fram 1944 i den så kallade Chicagokonventionen [2]. Här kom man överens om fem grundläggande friheter som efter överenskommelser mellan stater ska gälla för flygtransporter:

1. rätten att flyga över ett annat land utan att landa där
2. rätten att tanka eller att utföra underhållsarbete i ett annat land utan att lasta på eller av passagerare eller gods där
3. rätten att transportera passagerare eller gods från det egna landet till ett annat land
4. rätten att transportera passagerare eller gods från ett annat land till det egna landet
5. rätten att transportera passagerare eller gods mellan två andra länder än det egna landet.

Ytterligare fyra friheter finns, med dessa har inte blivit erkända på samma bredd som de första fem. Länderna som deltog i Chicago bildade 1947 den internationella civila luftfartsorganisationen, ICAO (International Civil Aviation Organisation) som också blev ett av FN:s fackorgan. ICAO övertog också den roll som ICAN tidigare haft.

ICAO har sitt säte i Montreal och har satt normer för hur utvecklingen av flygsystemet ska gå till på de flesta områden som påverkar flygsäkerheten, exempelvis:

1. teknisk utrustning på flygplan
2. krav på besättningar
3. telekommunikation
4. luftrum
5. navigering

## 6. flygvädertjänst

Ingen signifikant utveckling av civila flygsystemet sker utan att ICAO har beslutat om detta. Med idag 191<sup>1</sup> nationer som medlemmar är det av naturliga skäl långa ledtider när nya system eller metoder ska införas.

Vid mötet i Chicago 1944 deltog även flygbolag och dessa bildade 1945 en egen samarbetsorganisation IATA, (International Air Transport Association). Även IATA har sitt huvudkontor i Montreal och de flesta större traditionella flygbolag är medlemmar. Många lågprisbolag står dock utanför IATA, Ryanair t.ex.

I praktiken reglerades luftfarten väldigt hårt fram till 1970-talet då nationer tecknade bilaterala avtal om att bedriva flygtrafik mellan varandra. De större flygbolagen var många gånger statsägda och IATA hade en roll att förhandla fram biljettpriser som skulle gälla i systemet [1].

Från 1980-talet avregleras marknaden i flera steg och av olika skäl, några bidragande orsaker var att USA markerade en tydlig politisk vilja att konkurrensutsätta systemet<sup>2</sup>. Samtidigt hade charterflyget utvecklats mycket och denna verksamhet hade IATA ingen priskontroll på. Vidare så drev EU på utvecklingen som ett led i att skapa en inre marknad och från 1993 blev det en öppen EU-marknad där eventuella nationella särintressen vad avser flygtransporter var tvungna att motiveras särskilt.

Tidiga europeiska samarbeten på flygområdet är ECAC, (European Civil Aviation Conference) som bildades 1955 och har idag 44 medlemsländer. ECAC jobbar med harmonisering av metoder och policys inom flygområdet mellan sina medlemsländer. ECAC är kopplat till ICAO. År 1960 bildades EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation) som blivit navet för flygtrafikledning i Europa. EUROCONTROL har sitt huvudkontor i Bryssel och 39 nationer är medlemmar. Island och Estland är i dag inte medlemmar i EUROCONTROL.

Europa har sedan 2003 en egen organisation för civil luftfart, European Aviation Safety Agency (EASA) med huvudsäte i Köln i Tyskland. EASA fungerar även som en paraplyorganisation för alla EU-länders luft-

<sup>1</sup>Antal medlemmar 2013-10-31, [www.icao.int/MemberStates/](http://www.icao.int/MemberStates/)

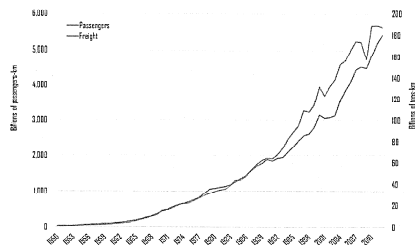
<sup>2</sup> Carteradministrationens "International air transportation competition act of 1979", se <https://www.govtrack.us/congress/bills/96/s1300>

fartsmyndigheter.

## 2 Flygtransporter idag

Mängden transporterat gods och passagerare ökar stadigt. I figur 1 visas utvecklingen sedan 1950-talet. Under kortare perioder med krig, oljekriser och finanskriser så har flygtrafiken minskat, men alltid återhämtat sig och alltid till en högre ökningstakt.

Vad består flygtransportsystemet av? Det finns idag ca 22 000 jetflygplan<sup>3</sup> som opererar från tusentals flygplatser. Bara de 10 största flygbolagen transporterade år 2010 638 miljoner passagerare<sup>4</sup>.

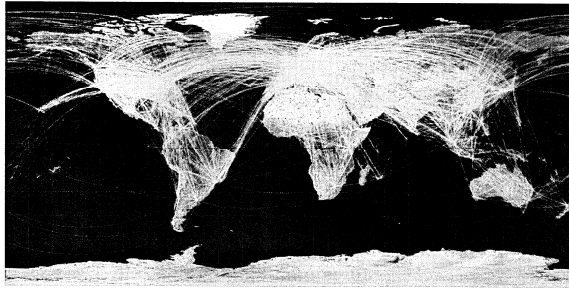


Figur 1: Utvecklingen av antal passagerarkilometer (vänstra axeln) och tonkilometer (högra axeln) från 1950. bilden är från Hofstra University, New York, USA.

I figur 2 visas det globala nätverket som det såg ut 2009. Trafiken är som tätast över USA, Europa och delar av Sydostasien. Flygresor betraktas som långa resor då man oftast jämför med bil eller järnväg. Riktigt långa flygresor har blivit allt ovanligare då konkurrens från järnväg och bättre vägar har gjort korta flygningar mindre attraktiva. Undantaget är glesbygdsområden, öar och länder där väg och järnvägsnätet inte är tillräckligt utbyggt. I denna typ av områden sker fortfarande en del mycket korta flygtransporter.

<sup>3</sup> Jet Information Services, Inc. 22085 flygplan år 2012 (Flygplan större än 27,2 ton (60 000 lb) maximal startvikt)

<sup>4</sup>IATA; <http://web.archive.org/web/20100803043513/http://www.iata.org/ps/publications/Pages/wats-passenger-carried.aspx>

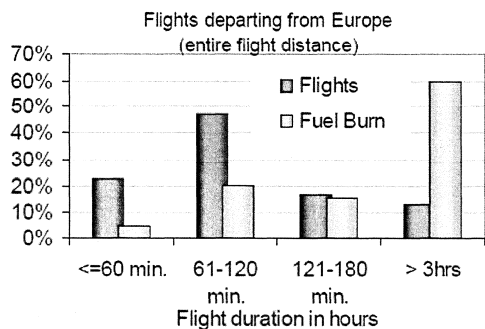


Figur 2: Bilden visar 54317 kommersiella flygrutter registrerade i juni 2009. Bilden från wikipedia.

I underlag från europeiska flygtrafikledningsorganisationen Eurocontrol [3] finns data för "medelflygningen" i det europeiska luftrummet. Medelflygplanet hade för flygningar med start och/eller landning i EU följande karakteristik:

1. 153 passagerarstolar ombord
2. vägde 94 ton vid start
3. flög 1046 km på 88 minuter
4. Förbrukade 4,5 ton bränsle vilket motsvarar 14,2 ton koldioxid (CO<sub>2</sub>)

Viktigt att notera vad gäller flygtransporter är det faktum att även om kortare flygningarna är vanligast, så är det de längsta flygningarna (interkontinentala) som står för den större delen av bränsleförbrukningen. Detta illustreras i figur 3 där det tydligt framgår att de långa flygningarna (över tre timmar) står för 60 % av bränsleförbrukningen men samtidigt bara utgör 12 % av antalet flygningar.



Figur 3: Antal flygningar och bränsleförbrukningen för flygningar med startplats i Europa fördelat över flygtid. Bilden är tagen ur Eurocontrol Performance Review Report 2009 [3].

I det europeiska luftrummet skedde år 2012 9,55 miljoner kontrollerade<sup>5</sup> flygningar enligt Eurocontrol [4].

### 3 Flygbolagen

Marknaden för flyg är uppdelad på passagerartrafik och fraktflyg. Passagerartrafiken flygs av flygbolag som driver linjetrafik (på tidtabell), charterbolag och taxifygbolag. För att kunna erbjuda resor till hela världen samarbetar de traditionella flygbolagen och det har utkristalliserats tre stora globala allianser<sup>6</sup>. Allianserna har också delvis gemensamma bonusprogram som ska fungera som incitament att hålla sig till en allians när man reser.

De traditionella flygbolagen fick under 1990-talet konkurrens av lågprisbolagen. Kombinationen med höga oljepriser och finanskrisen i västvärlden tvingade flera traditionella flygbolag i konkurs och många andra bolag kämpar fortfarande för att få lönsamhet i sin verksamhet.

Lågprisbolagen har fram till nu främst agerat på den kontinentala marknaden men några erbjuder också interkontinentala resor och lågprisbolagen har på vissa sträckor också blivit en stark konkurrent till charterflyget. Man ser tydligt skillnaderna mellan lågprisbolag och traditionella

<sup>5</sup> Flygningar efter instrumentflygregler (IFR) som kontrolleras av flygtrafiktjänst.

<sup>6</sup> One World, Sky Team och Star Alliance.

där t.ex. Ryanair finns med bland de tio största flygbolagen om man mäter i antal passagerare men inte återfinns på den listan om mäter transportarbete i personkilometer (pkm).

Konkurrensen på marknaden har pressat priset på biljetter och det har aldrig varit billigare att flyga än i dag. Skillnader finns i sättet att ta betalt där lågprisbolagen konstruerar avgifter för delmoment av resan som hos traditionella bolag vanligen ingår i biljettpriset. Enkelheten med vilken man köper biljetter på internet har också varit en bidragande orsak till att göra flyget tillgängligt för alla. En enkel internetsökning visar alla resealternativ till din destination (listat på pris eller tid). Betalning sker enkelt och fysiska biljetter är idag sällsynta och resan köps på ett par minuter.

För att hålla nere kostnaden är många av lågprisbolagen inte med i dessa större gemensamma bokningssystem utan kan bara bokas direkt i deras bokningssystem.

## 4 Flygtrafikledning - Bakgrund

Redan 1921 hade Croydon Airport i London så mycket trafik att man fann det nödvändigt att reglera starter och landningar med flygtrafikledare<sup>7</sup>. Under andra världskriget utvecklades rutiner för att koordinera mycket stora mängder trafik på och runt flygplatser.

Militärt startar och landar man ofta i förband<sup>8</sup>, det vill säga flera flygplan på en gång. Det blir enklare att hålla ihop det planerade uppdraget och det ger också en högre kapacitet på flygplatsen då man hanterar flera flygplan som en enhet och piloten tränar sin färdighet att flyga i formation. I kommersiell trafik är start och landning i förband *inte* tillåtet.

Många mindre flygfält som saknar flygtrafikledning hanterar tidvis mycket flygtrafik. Detta är möjligt genom att piloterna följer fastställda procedurer för start och landningsvarv och ansvarar för sin egen separation till andra luftfartyg. Radiokommunikation underlättar givetvis men procedurerna ska fungera även utan radio.

Innan flygradion blev det dominerande kommunikationsmedlet gavs signaler för start och landning med bland annat flaggor, lampor och lysraker. Piloter som kom till en flygplats fick i luften information om gällande

<sup>7</sup> <http://www.transportheritage.com/find-heritage-locations.html?sobi2Task=sobi2Details&sobi2Id=27>.

<sup>8</sup> Vanliga förband är två flygplan (rote), fyra flygplan (fyrrupp), tolv flygplan (division)

landningsprocedur från stora tygstycken som lades i olika mönster på marken. Även i dag är ljussignaler ett reservförfarande för kommunikation vid radiobortfall [5].

Det moderna flygsystemet utformades snabbt under 1950-talet. Flygsäkerheten ökade bland annat tack vare utvecklingen av instrumentlandningssystem (ILS) som med hög precision möjliggör inflygning i dåligt väder. Det utvecklades förbättrade radionavigeringssystem som med hög noggrannhet hjälpte piloten att flyga från punkt A till B.

Radar blev under 1960-talet använt för flygtrafikledning och man kunde följa flygplanen på radar. En mycket viktig utveckling blev det som kallas sekundärradar och transpondersystemet. Transpondern<sup>9</sup> är en apparat i flygplanet som triggas av radarsignalen och returnerar en särskild kod och höjdmätarinformation från flygplansindivid till flygledaren. Piloten kan ställa in den kod flygledaren begär. Transpondersystemet är grunden för att flygledare ska kunna övervaka och separera flygplan på ett säkert sätt.

## 5 Flygtrafiktjänst – Air Navigation Service

Flygtrafiktjänst motiveras främst av flygsäkerhetsskäl, men hur effektivt tjänsterna i systemet utformas påverkar kapacitet, ekonomi och miljö för hela flygtransportsystemet.

Flygtrafiktjänst (ANS) består av en mängd servicefunktioner (ATS – Air Traffic Services) som innefattar t.ex. flygtrafikledning<sup>10</sup> (ATC – Air Traffic Control), system för kommunikation, navigering och övervakning (CNS – Communication, Navigation and Surveillance). Vidare ingår Flyginformationsservice (FIS - Flight Information Services) som ska förmedla flygrelaterad information till piloter. Detta kan vara information om flyghinder på marken, tillfälliga avlysningar av luftrum, öppettider för flygplatser och väderinformation.

Ibland används uttrycket ”Air Traffic Management” (ATM) som omfattar även kapaciteten i luften och inte bara flygsäkerhetaspekten. Det kan handla om att effektivt och dynamiskt utnyttja luftrummet beroende på verksamhet (ASM – Air Space Management) eller hur man på ett

<sup>9</sup> Tekniken är från början militär och används för att säkerställa identiteten på ”egna” flygplan. Militär kallas systemet IFF (Identification Friend or Foe).

<sup>10</sup> ) ATC är delen av ANS som ansvarar för flygsäkerheten med huvuduppgiften att upprätthålla separationen mellan enheter i luften och på marken

säkert sätt ska maximera kapaciteten vid hög belastning (ATFM – Air Traffic Flow Management)

Luftfartslagen, luftfartsförordningen och Transportstyrelsen föreskrifter reglerar all flygtrafiktjänst för militär och civil luftfart i Sverige.

I Sverige har under 2000-talet stora organisatoriska förändringar skett inom området. För att renodla rollerna mellan tillsyn och genomförande av verksamheten så bildades Luftfartsinspektionen 2005 som en egen tillsynsmyndighet för luftfart. Det mesta av deras ansvarsområden uppgick 2009 i den då nybildade Transportstyrelsen som nu är tillsynsmyndighet för luftfart.

1 april 2010 delades Luftfartsverket upp så att flygtrafiktjänsten bedrivs i affärsverket LFV, och de statliga flygplatserna drivs av bolaget Swedavia.

Fram till 2010 hade LFV monopol på verksamheten men sedan 2010<sup>11</sup> är delar av flygtrafiktjänsten konkurrensutsatt och torntjänst utförs idag av privat aktör på flera platser i landet. Transportstyrelsen är tillsynsmyndighet och måste godkänna leverantören av torntjänst

LFV ansvarar för hantering av aeronautisk information både för civil och militär luftfart. Aeronautisk information, AI, är sådan information som brukare av luftrum och flygplatstjänster behöver för att kunna planera och genomföra sin flygning. Det innefattar bland annat regler, information och kartor på luftrum, flygvägar, radiofrekvenser, navigationshjälpmedel, flygplatskartor, flygprocedurer med mera. All denna information finns i AIP, Aeronautical Information Publication.

## 6 Flygsäkerhet

Generellt beror flygets framgångar mycket på att systemet är så säkert med mycket få allvarliga olyckor. År 2012 var det minst olycksdrabbade året för civilflyget någonsin. För flygplan byggda i västvärlden skedde enligt IATA<sup>12</sup> en olycka per 5 miljoner flygningar.

Den höga säkerhet som uppnåtts är summan av ansträngningarna på områden som utbildning, teknik och metoder i alla för flygsystemets ingående delar.

<sup>11</sup> Den 1 september 2010 trädde en ny luftfartslag (2010:500) och en ny luftfartsförordning (2010:770) i kraft.

<sup>12</sup><http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2013-02-28-01.aspx>



Flygtrafiktjänstens bidrag till flygsäkerheten sker främst genom att säkerställa separation mellan flygplan. Grundseparationen ska mellan två luftfartyg vara 3 M (ca 5 km) i sidled och 1000 ft (2300 m) i höjddled. Under in och utflygning från flygplatser kan andra separationskrav gälla.

Flygledaren har transpondersystemet som verktyg i arbetet med att upprätthålla separationen mellan enheter. Det finns också andra system ombord på flygplanen som ska verka för högre säkerhet.

I dagsläget är det primära samverkande systemet för antikollision i lufrummet TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System). TCAS sänder information till och från andra flygplan via en transponder; aktörerna kan på detta sätt kommunicera med varandra. Enkelt beskrivet så koordinerar en transponder flygtrafiken och låter aktörerna i lufrummet veta varandras ömsesidiga avsikt med uppträdandet.

En relativt ny teknik som tillåter både piloter och markbaserade stationer att detektera andra likvärdigt utrustade farkoster med hög precision är det GPS- baserade ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, eller ADSB). Farkostens position, tillsammans med annan information såsom höjd, fart, typ av farkost och om den svänger, stiger eller sjunker, konverteras till en digital kod som sedan uppdateras flera gånger per sekund och sänds till markstationer och andra farkoster. Eftersom tjänsten är satellitbaserad fungerar den bra i områden där radar saknas (över oceanerna).

Ytterligare en avgörande del av flygsäkerheten är planeringen av hur lufrummet ska användas. Design av procedurer som är säkra är mycket viktigt. Detta gäller alla flygplatser men arbetet är särskilt viktigt när man har flera banor på samma flygplats. Vindriktningen bestämmer många gånger vilka banor som kan användas för start och landning och det behövs en stor uppsättning procedurer för att hantera alla situationer som kan uppkomma.

Dessa procedurer konstrueras för att i så hög grad som möjligt undvika att startande<sup>13</sup> och landande<sup>14</sup> trafik korsar varandras banor, och om så måste ske ser man till att detta sker på olika höjder. Som exempel på komplexiteten visas i figur 4 radarspårerna för startande (grön) och landande (orange) trafik på Arlanda då trafiken landar och startar söderut. Bilden

<sup>13</sup> En startprocedur kallas SID (Standard Instrument Departure)

<sup>14</sup> En landningsprocedur kallas STAR (Standard Terminal Arrival Route)

är från LFV [6].



Figur 4: Exempel på spridning av flygningar då bankombination 19L för landning och 19R för start används. Orange spår är ankomster och gröna är starter. Arlandas tre banor syns mitt i figuren.

Vid design av procedurer sker överväganden där flygsäkerheten alltid går först. Proceduren måste också hålla sig inom det miljötillstånd som gäller för flygplatsen avseende buller och helst också medge en säker, rationell och effektiv hantering av ankommande och avgående trafik.

## 7 Flygplatsernas roll

En flygplats kapacitet räknas i rörelser per timme. En rörelse är en start eller landning. Idealt begränsas antalet rörelser endast av den separation som flygsäkerhetsmässigt krävs mellan starter och landningar<sup>15</sup>. I verkligheten begränsas kapaciteten av många andra faktorer där tillgången på taxibanor för att effektivt ställa upp och avveckla landande flygplan är mycket viktig. Vädret kan begränsa kapaciteten, vintertid då snöröjning och halkbekämpning tar sådan tid att genomföra att det inte går att starta och landa så ofta som vanligt.

Uttrycket "peaktrafik" används ofta och är perioderna under morgon och kvällsrusningen. Det är under denna tid som flygplatsen har sin högsta

<sup>15</sup>Separationen bestäms av flera faktorer där ett tillräckligt avstånd mellan startande och landande enheter är grunden. Virvelbildningen som uppstår bakom flygplan är en annan flygsäkerhetsdimensionerande faktor för separation. Flygplanens startvikt avgör vilken separationstid som krävs mellan start- och landning

belastning. Det är under dessa tider det är attraktivt för flygbolagen att förhanda till sig slottider. På Arlandas hemsida finns 2014-01-10 mellan klockan 06:30-09:30 angivet 54 avgångar och 49 ankomster. För att inte få förseningar i systemet måste man alltså kunna hantera 99 rörelser denna morgon på två timmar. Med en fastställd separation mellan startande och landande flygplan så får man en verklig begränsning på hur mycket trafik man kan ha utan att bygga in förseningar i systemet från början. På flygsidan kan också tillgången på avisningsutrustning, banröjning och bränsle vara gränssättande för kapaciteten.

En flygplats kapacitet bestäms inte bara av verksamheter på flygsidan. Det handlar också om att kunna hantera flödet av passagerare genom en bra infrastruktur för resor till och från flygplatsen, hantera incheckning, bagage, säkerhetskontroller och transport till flygplanet via en gate eller buss.

När efterfrågan på flygtrafik i en stad eller region ökar brukar man försöka höja kapaciteten på de flygplatser man har genom att om möjligt, ha längre öppettider, anlägga nya banor och genom att skapa effektivare start- och landningsflöden. Många gånger är de föreslagna åtgärderna inte möjliga att genomföra. I tätbebyggt område kan helt enkelt det fysiska utrymmet för en bana saknas, men ofta är det buller som är den juridiskt dimensionerande faktorn för mycket av en flygplats verksamhet.

Kopplat till flygtrafikledningstjänst ansvarar flygplatsägaren för driften och nivån på tekniska hjälpmedel<sup>16</sup>. Att det finns godkända in- och utflygningsskeden är också flygplatsens ansvar. Transportstyrelsen är tillsynsmyndighet och ger tillstånd för procedurer.

Driften av en flygplats påverkar många och det krävs miljötillstånd som för stora flygplatser ofta är en stor och mycket komplex fråga att hantera. Miljömässigt definieras start- och landnings cykeln, LTO (Landing and Take Off Cycle), från marken upp till 300 ft (90 m).

## 8 Luftrum

I princip finns det två olika typer av luftrum, kontrollerad luft (luftrumsklasserna A, B, C, D och E) och okontrollerad luft (luftrumsklass F och G).

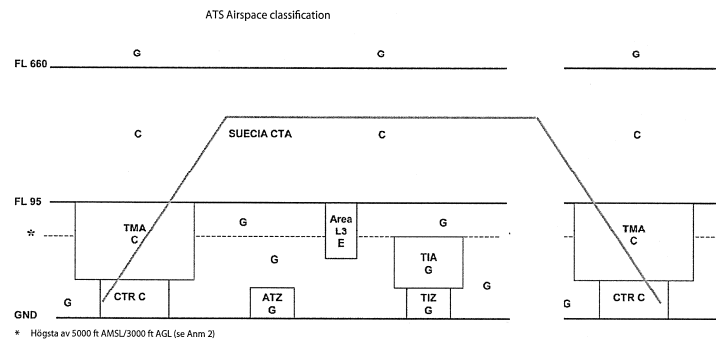
Figur 5 visar den svenska tillämpningen av luftrumsklassning som i

<sup>16</sup> landningshjälpmedel, banljus och radiosystem.

praktiken består av två klasser, luftrumsklass C för all kontrollerad luft och G för okontrollerad luft. En närmare beskrivning finns i AIP Sverige/Sweden [7].

Luftrummet är konstruerat så en reguljär flygning normalt går i kontrollerad luft under hela sträckan. Vid flygplatsen kallas området kontrollzon (CTR-Control zone) och sträcker sig från marken och upp till som mest 2000 ft (600 m). Här leds verksamheten av flygledaren i flygledartornet, se avsnittet torntjänst.

Efter start eller inför landning hanteras flödet in och ut från flygplatserna i terminalområdet (TMA- Terminal Control Area). Detta sträcker sig normalt från 1000 ft (300 m) upp till 9500 ft (2900 m). Som ett exempel så hanterar Stockholm TMA all trafik till och från Arlanda, Bromma, Uppsala och Västerås.



Figur 5: Svensk luftrumsklassning. De blå pilarna representerar en flygresa som går i kontrollerad luft från start i kontrollzon (CTR), stigning i terminalområdet(TMA) sträckflygningen i kontrollområdet (CTA), plané (plané är flygtermen för att sjunka till lägre flyghöjd)i CTA och TMA och slutligen landning i CTR för destinationsflygplatsen.

Över 2900 m så lämnar terminalområdesflygledaren över till områdeskontroll (CTA Control Area) som ansvarar för all trafiken "en-route" på alla höjder upp till 66 000 ft (ca 20 000 m), däröver är luften återigen okontrollerad men inga civila flygplan kan flyga på så hög höjd.

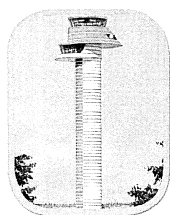
I den okontrollerade luften (luftrumsklass G) är det upp till piloten att följa luftfartslagar och själv svara för separation till annan trafik. Okon-

trollerad luft används främst av privat- och sportflygare men också av militärt flyg. Okontrollerad luft sträcker sig från marken till som högst upp till 9500 ft (ca 2900 m).

Det finns restriktionsområden som exempelvis naturskyddsområden, militära flygövningsområden och skjutfält där flygtrafik är förbjudet eller bara tillåts under särskilda omständigheter. Dessa områden kan antingen vara permanenta eller upprättas under bestämda tider, detta gäller även kontrollzoner som för vissa flygplatser bara är aktiva under flygplatsens publicerade öppettider.

## 9 Torntjänst

Före flygningen lämnas en färdplan in till flygtrafikledningen som beskriver hur piloten planerat flygningen. Flygledaren ger piloten tillstånd att förflytta sig på marken (taxning) och ansvarar för separationen på marken. Vid start får piloten ett färdtillstånd (klarering) för den vidare färden.



Figur 6: Arlandatornet

Vädret är viktigt och särskilda flygplatsprognoser<sup>17</sup> med hög detaljrikedom på viktiga väderparametrar utfärdas regelbundet. Dessa prognoser övervakas och ändras direkt om vädret passerar vissa fastställda gränser för vind, sikt och höjden till molnens undersida (molnbasen). Prognosen används av piloten i planeringsskedet och kan vara avgörande för hur mycket reservbränsle som flygplanet måste tankas med. Det ska också finnas kontinuerlig väderobservationstjänst<sup>18</sup> på flygplatsen. Flygledaren berätt-

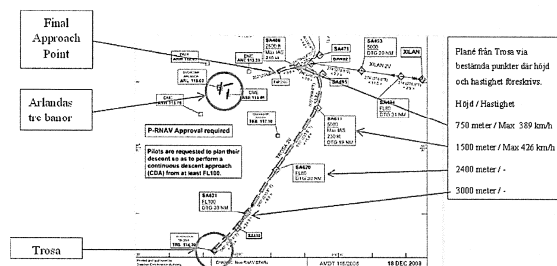
<sup>17</sup>Flygplatsprognos, TAF (Terminal Aerodrome Forecast) utfärdas var tredje timme.

<sup>18</sup>Flygplatsobservation, METAR (Meteorological Aerodrome Report) utfärdas normalt var 30:e minut eller när särskilda gränser passerar.

tar för piloterna om aktuellt väder inför start och landning. Lufttrycket är särskilt viktigt då det används som referens till höjdmätaren ombord på flygplanet. I mörker eller vid inflygning i dåligt väder kan fel inställning av lufttryck vara katastrofalt. Flera haverier har i flygets historia orsakats av felaktigt inställt lufttryck.

## 10 Terminalområden

Terminalkontrollen ska hantera flödena in och ut från flygplatserna. I områden med mycket trafik så är det här som det oftast uppstår kösituationer och flygplan kan få ligga och snurra i väntelägen på sin tur att få påbörja inflygningen. Detta är särskilt påtagligt över de stora flygplatserna i Europa där London (Heathrow) sticker ut med klart sämst siffror vad gäller väntetid i luften [3]. Här har man avsiktligt byggt ett system där man lägger flygplan i väntelägen för att säkerställa att man har högsta möjliga kapacitet på de två banor man har.



Figur 7: Exempel på en inflygningsprocedur till Arlanda bana 26.

Ett exempel på en inflygningsprocedur till Arlanda finns i figur 7. I korthet visar just denna hur piloten ska styra för att komma i position för landning på Arlanda i västlig riktning (bana 26). Det tjocka röda streck

ket exemplifierar hur man från Trosa i Södermanland styr mot bestämda brytpunkter under planén där höjd och fart är föreskrivna. Beskrivningen slutar vid punkten FAP (Final Approach Point) där piloten ansluter till landningsbanans instrumentlandningssystem (ILS) och därefter följer den glidbana (höjd och kurs) som systemet anger fram till landning. Piloten lämnas då över från terminalområdets flygledare till tornet.

## 11 Sträckflygning - Cruise

Cruisedelen av flygningen mellan in- och utpassering i terminalområde innehåller stigning och plané till/från cruise. För många inrikesflygningar är tiden på cruise mycket kort.

Det är huvudsakligen flygplanets aerodynamiska egenskaper som bestämmer hur högt och fort man flyger. Vingarna ska generera en lyftkraft som svarar mot flygplanets vikt med last. Den höga flygfarten leder till luftmotstånd. Detta ska balanseras av motorernas sammanlagda dragkraft. Eftersom motorns specifika bränsleförbrukning (SFC, bränsleflöde per dragkraftsenhet) beror relativt lite av flyghöjd, är primärintresset vid flygning att minimera det totala luftmotståndet och därmed motorernas dragkraft. För varje flyghöjd finns det en bränsleoptimal fart.

Svenska inrikesflygningar är oftast så korta att man inte hinner stiga till bränsleoptimal höjd. På långa flygningar blir flygplanet allteftersom bränslet förbränns lättare och man stiger ofta några gånger under en interkontinental resa för att vara på optimal flyghöjd.

Bränsleoptimal fart ökar med flyghöjden. När farten närmar sig ljudhastigheten så medför det ökade luftmotståndet att det inte är bränsleekonomiskt att flyga för nära "ljudvallen". I praktiken ligger bränsleoptimal fart för dagens passagerarflygplan på runt 850 km/h till 900 km/h.

## 12 Flygvägsförlängningar

Kortaste vägen mellan två punkter på jorden är den så kallade storcirkeldistansen, GCD (Great Circle Distance). I verkligheten styrs flygtrafiken av flygtrafikledningen och måste följa uppgjorda flygvägar, undvika militära övningsområden, annan flygtrafik och måste dessutom starta och landa på banor som därmed bestämmer kursen och flygbanan i ett stort område runt flygplatsen.

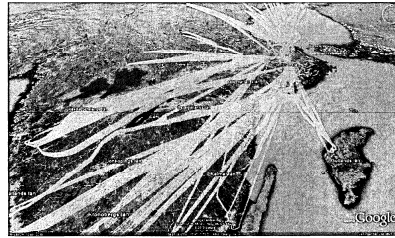
I verkligheten är den kortaste möjliga flygväg för sträckflygningsfasen

”en-route” idealt en rak linje mellan in- och utpasseringspunkten i de TMA som resan går mellan.

För europatrafiken tillhandahåller Eurocontrol [4] medelvärden på flygvägsförlängningen och för 2011 var förlängningen ca 50 km per flygning (motsvarar 5 %) en route.

För interkontinentala flygningar är variationen stor beroende på var flygningen går. För flygningar över Nordatlanten följer man i regel de flygtrafikledningsspår OTS-spår (Oceanic Track System) som ändras dagligen beroende på jetströmmens läge. Flygplanen tilldelas ett spår<sup>19</sup> de ska följa under resan. För vissa flygningar kan rutförlängningen vara avsevärd i detta system då det inte alls sammanfaller med storcirkeln. För flygningar mot Asien är det ofta rakare flygningar men beroende på restriktioner över konfliktområden så flygs det för vissa sträckor omvägar. Avgifterna för flygtrafikledning är en faktor som kan påverka valet av flygväg när flygbolagen gör sina kalkyler.

Nationellt tillåts man ofta att flyga förhållandevis rakt mellan in- och utpassering i TMA, se figur 8 från LFV.



Figur 8: Utskrift från LFVs GAIA-system som visar alla svenska inrikesflygningar in till Stockholm-Arlanda en dag i augusti 2013 (KML-fil i Google Earth). Verklig flygsträcka visas och vertikala ineffektiviteter både under stigning, cruise och plané framgår av olika färgkodning av den vertikala profilen

Flygvägsförlängningar i samband med start och landning ökar bränsleförbrukningen och miljöbelastningen i form av buller och avgaser. Under start är gaspådraget högt och en eventuell flygvägsförlängning genererar

<sup>19</sup> Detta är för att säkerställa separation mellan flygplan i områden där radarövervakningen saknas eller om befintliga system slutar att fungera.



direkt ökad bränsleförbrukning i proportion till förlängningen. Vid plané och inflygning är gaspådraget i medeltal lägre tillskottet i bränsleförbrukning av en flygvägsförlängning är inte direkt översättbart till förlängningen i distans.

I Sverige är det framför allt Arlanda som vid dåligt väder kan få avsevärda flygvägsförlängningar i TMA, men sett i det europeiska perspektivet så har det största flygplatserna i Europa betydligt större flygvägsförlängningar.

För interkontinentala flygningar är den ökade bränsleförbrukningen på grund av flygvägsförlängning i TMA en mycket liten del i proportion till resans hela bränsleförbrukning.

### 13 Affärsmodellen

Hur tjänar man pengar på flygtrafiktjänst? För flygbolagen redovisades av AEA (Association of European Airlines) att kostnaden för ANS var 6,2% av den totala operationella kostnaden för ett traditionellt flygbolag [4].

För att få en uppfattning om storleken på flygplatsavgifterna redovisas i tabellen nedan kostnaden<sup>20</sup> för några vanliga flygplan med start från Arlanda.

---

<sup>20</sup> Kostnaderna från Swedavias hemsida.

Avgifter	Boeing 737-600 90 passagerare inrikes	Boeing 737-800 125 passagerare utrikes	Airbus 340-300 220 passagerare utrikes
<b>Swedavias avgifter</b>			
Startavgift	1372	2018	5040
Terminalavgift <sup>a</sup>	1332	1629	3340
Bulleravgift	122	185	295
Passageraravgift	4770	10800	19800
Avfallshantering vid gate	45	60	110
Avgasavgift	256	426	1696
Markttjänstavgift passagerare	1893	2524	4627
Markttjänstavgift ramp	116	154	424
	<b>9906 SEK</b>	<b>17796 SEK</b>	<b>35332 SEK</b>
<b>Myndighets- avgifter</b>			
Säkerhetskontroll <sup>b</sup>	3150	4200	7700
Myndighetsavgift <sup>c</sup>	585	780	1430
	<b>3735 SEK</b>	<b>4980 SEK</b>	<b>9130 SEK</b>
<b>Totalt</b>	<b>13641 SEK</b>	<b>22776 SEK</b>	<b>44462 SEK</b>

Tabell 1. Startavgifter från Arlanda för några vanliga flygplan.

<sup>a</sup>Terminalavgift för utflygning från flygplats ut till en radie av 20 km enligt EU förordning (EU 1794/2006)

<sup>b</sup>Avgift 35,00 kr per avresande passagerare, faktureras av Transportstyrelsen

<sup>c</sup>Avgift 6,50 kr per avresande passagerare, faktureras av Transportstyrelsen

Det finns ytterligare avgifter för nattparkering av flygplan. Noteras bör att det bara är terminalavgiften som direkt kan härledas som avgift för flygtrafikledning.

Från avstånd 20 km ut från flygplatsen ersätts terminalavgiften med en undervägsavgift som baseras på flugens distans genom luftrummet och flygplanets vikt. Den flugna distansen mäts efter storcirkeldistans (GCD) i luftrummet och uttrycks i 100-tals kilometer. Vikten betalas efter maximal startvikt för typen (MTOW<sup>21</sup>) där 50 t är referensnivå (viktfaktor = 1). Det fullständiga uttrycket för avgiften är

$$\text{Undervägsavgift} = \frac{D_{GCD}}{100} * \sqrt{\frac{MTOW}{50}} * \text{Unit rate}$$

där "unit rate" bestäms av varje nation och på så sätt varierar kostnaden för att flyga över olika länder. Variationen i "unit rate" är stora och beror på trafikbelastningen och tekniknivån på tjänsten. Prissättningen är kostnadsbaserad och ska inte ge vinst. Avgiften fastställs en gång per år och justeras efter verkliga kostnader månadsvis. Undervägsavgifterna administreras helt av Eurocontrol.

I mars 2013 var LFV:s "unit rate" €78,23 och att flyga ett 100 t tungt flygplan kostade alltså €111 per 100 km i svenskt luftrum. Det finns exempel på att flygbolag tar omvägar för att inte flyga i luftrum med höga sträckavgifter.

## 14 Flygets miljö och klimatpåverkan

Flyget har direkta och indirekta effekter på miljön. Den direkta miljöpåverkan består främst av flygbuller och emissioner från flygmotorer. Flygbuller utgör ett hälsoproblem och trots att nyare generationer av jetmotorer minskat bullret med ca 20 dB sedan 1970-talet så är bullerfrågan fortsatt det viktigaste lokala miljöproblemet vid de flesta större flygplatser.

### Direkta effekter

Flyget skiljer sig från de flesta andra utsläppskällor genom att stora delar av utsläppen sker på mycket hög höjd i atmosfären. Dessutom sker utsläppen i en global skala, men koncentreras till de regioner där flygtrafiken är tät och till de flygkorridorer som flyget använder mellan kontinenterna. De ämnen och partiklar som flyget släpper ut påverkar de kemiska atmosfärsprocesserna som pågår på mellan 8 km-12 km höjd och får en inverkan

<sup>21</sup> Maximum Take Off Weight

på faktorer som styr över klimatet. Vid en fullständig förbränning består utsläppen från en jetmotor av koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), vattenånga ( $\text{H}_2\text{O}$ ), kväve ( $\text{N}_2$ ) syre ( $\text{O}_2$ ) och svaveldioxid ( $\text{SO}_2$ ). I verkligheten sker också utsläpp av nitrater ( $\text{NO}_x$ ), kolmonoxid ( $\text{CO}$ ), kolväten ( $\text{HC}$ ), sulfater  $\text{SO}_x$ ) och sotpartiklar. Flygets utsläpp av koldioxid och vattenånga är direkt kopplade till bränsleförbrukningen. För varje förbränt kilo flygfotogen får man ca 3,16 kg  $\text{CO}_2$  och 1,25 kg vattenånga. Mängden utsläpp av kväve och sulfater beror på vilken fas av flygningen flygplanet är och hur motorn opererar.

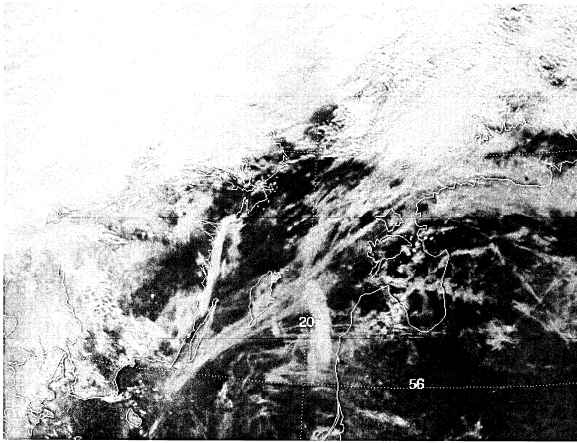
Klimatpåverkan från flyg är summan av långsiktig påverkan orsakad av utsläppen av koldioxid och de mer kortsiktiga effekterna orsakade av bl. a. vattenånga, nitrater och sotpartiklar. Sammantaget uppskattas flyget stå för 3,5 % av den mänskliga påverkan på klimatet [8]. En osäkerhet är i vilken omfattning flyget bidrar till ökad molnighet.

Under vissa atmosfärsförhållanden bildas kondensationsstrimmor i luften bakom flygplanen. Ofta försvinner dessa relativt snabbt, men om luften är isövermättad blir kondensationsstrimmorna långlivade och de påverkar då, som alla moln gör, jordens strålningsbalans. I dag är bedömningen att flygets påverkan på molnigheten är relativt liten ur globalt perspektiv men regionalt och lokalt kan den vara stor. En svensk studie har visat att det över Östersjön under perioden juli till september ungefär 10 % av tiden bildas persistenta k-strimmor i området. Östersjön överflygs av ca 500 flygplan per dygn av flygtrafik. I huvudsak är det trafik från kontinenten på väg till Asien [9].

Flygtrafikens marknära luftföroreningar är störst på flygplatser och i dess omedelbara närhet. Lokal påverkan räknas i den så kallad LTO-cykeln (Landing and Take-Off) som är definierad från marken upp till 3000 fot (900 m). Lokala utsläppen från flyg är i Sverige små i förhållande till vägtrafikens.

Flygets andel av utsläpp är potentiellt relativt större i framtiden. FN:s klimatpanel (IPCC) har uppskattat flygets bidrag till människans utsläpp i intervallet 5 % till 15 % fram till år 2050. Det relativa bidraget beror inte bara på flyget utan i vilken omfattning andra sektorer lyckas reducera sina utsläpp.

Biobränsle för flyget är ett område som flygindustrin jobbar aktivt med. Det är idag tillåtet att flyga med upp till 50 % inblandning av biobränsle med vanligt jetbränsle så länge slutprodukten håller sig in-



Figur 9: Kondensationsstrimlor över Östersjön 25 september 2010. Från södra Öland och upp mot Finska viken syns tydligt hur flygtrafiken denna dag skapat cirrusmoln, Källa NOAA, satelliten MODIS.

om specifikationen för jetbränsle. Problemet är att det inte finns några volymer av bibränsle att tillgå. Många flygbolag genomför demonstrationsflygningar med bibränsle för att visa en att man är beredd att ett ansvar för sina utsläpp men ur ett globalt perspektiv menar många att det är bäst för miljön om bibränslen i första hand ersätter fossil förbränning i mark och sjötransporter [10]. Bibränslen skulle möjligen kunna erbjuda flygbranschens ett stabilt pris på drivmedel vilket är önskvärt jämfört med de stora oförutsägbara svängningarna oljepriset som slagit hårt på branschen sista 15 åren. Alternativa bränslen tas upp särskilt i en annan del av denna rapport.

## Indirekta effekter

Indirekt miljöpåverkan från flyg är oftast kopplat till flygplatsen. Läckage av kemikalier som avisningsvätska och halkbekämpningsmedel kan påverka mark och vattenmiljön nära en flygplats. Marktransporten av passagerare, anställda och gods till och från en flygplats tillsammans med den infrastruktur som behövs för driften genererar både direkta utsläpp och

även indirekta miljöeffekter.

De flygsäkerhetsmässiga kraven som finns på hinderfrihet nära en flygplats innebär i praktiken förbud för höga byggnadskonstruktioner på de områden som ett flygplan kan behöva för att säkert manövrera vid start och landning. Detta har skapat en del intressekonflikter angående placeringen av master och på senare år också vid nyetableringen av vindkraft. För militär flygning har konflikten inte bara varit kopplad till flygplatsen utan också till militära flygövningsområden [11].

## 15 Framtida teknik, metoder och koncept för flygtrafik och flygtrafiktjänst

För flygtrafiktjänst arbetas det kontinuerligt med förbättringar inom alla ansvarsområden.

Den perfekta trajektorian för en flygresa är det som eftersträvas. Den ska vara flygsäker samtidigt som den minimerar bränsleförbrukning med så låg miljö- och bullerpåverkan som möjligt. För *en* flygresa är detta förhållandevis enkelt att räkna ut. I ett komplext system med många flygplan där hög kapacitet är viktigt är detta ett betydligt svårare optimeringsproblem.

Avancerade stödsystem finns för att schemalägga och hantera trafik. Ofta har dessa system lokalt optimeringsfokus där man ser till flödet i ett särskilt område som t.ex. taxning, start eller landningsflöden i kontrollzon, terminalområden eller större områden en-route.

I Europa görs det i dag för varje flygning en bedömning av trafiksituationen vid den planerade ankomsttiden på destinationen och via EUROCONTROL<sup>22</sup> kan trafik få besked om att vänta vid gate på ny starttid istället för att ligga i vänteläge i närheten av destinationen.

En avgörande faktor är "timing" det gäller att flygplanen dyker upp när det är tänkt. Ett flygplan som har blivit försenat eller kommer tidigare än beräknat kan ställa till oreda i trafikmönstret och även om just detta flygplan kom fram tidigare och möjligen också effektivare så kan detta flygplan ha påverkat systemets totala kapacitet eller miljöpåverkan negativt.

---

<sup>22</sup> Hanteras av Eurocontrol Central Flow Management Unit (CFMU)

## Gröna inflygningar

Sedan många år tillämpas så kallade gröna inflygningar. Det finns flera benämningar och definitioner på vad en grön inflygning är [6]. Vanliga benämningar på grön inflygning är, CDA (Contionous Descent Approach) och CDO (Contionous Descent Operations). Konceptet är enkelt och innebär att piloten planerar flygningen så att inflygningen sker som glidflygning med motorerna på mycket lågt varvtal. På detta vis sparar man bränsle och minskar bullerbelastningen jämfört med de fastställda rutternas som ofta innebär att man flyger i "trappsteg" ner mot flygplatsen. Detta trappstegsförfarande innebär att man måste ligga i planflykt under delar av inflygningen, detta är något som drar mycket bränsle samtidigt som det bullrar.

Vid en grön inflygning så lämnar man över mer ansvar till besättningen som optimerar planén beroende på vilket flygplan<sup>23</sup> man flyger. Att mer planering sker av piloten ombord gör gröna inflygningar svårare att hantera när det är mycket trafik och det finns risk för att flygplan kommer för nära varandra. Vid peaktrafik och vid dåligt väder radarleds trafiken och gröna inflygningar är svåra att genomföra.

På Arlanda ska gröna inflygningar alltid erbjudas när belastningen tillåter. Vid mindre flygplatser med lite trafik det oftast enkelt att få göra en grön inflygning och detta blir egentligen bara problematiskt vid större flygplatser.

Siffror från LFV:s hemsida<sup>24</sup> redovisar att under 2011 var 58 % av inflygningarna till Arlanda CDA från 5000 ft (ca 1500 m), och 47 % från 10 000 ft (ca 3050 m). Vid 11 andra torn som LFV bedriver verksamhet vid utfördes 66 % av inflygningarna med CDA från 5000 ft, och 54 % från 10 000 ft.

LFV räknar med en besparing på mellan 50 kg-150 kg flygbränsle per grön inflygning till Arlanda beroende på med vilken metod och från vilken höjd den genomförs ifrån<sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> Man tar hjälp av flygplanets egna system (FMS – Flight Management System) vid en CDA

<sup>24</sup> <http://www.lfv.se/sv/Internationellt/Sesar/Grona-inflygningar/>

<sup>25</sup> [http://www.satca.com/seminarie/Green\\_flights.pdf](http://www.satca.com/seminarie/Green_flights.pdf)

## Fjärropererade flygledartorn – ”Remote and virtual tower”

Fjärropererade flygledartorn är ett rationaliseringsinitiativ där man vill undvika att ha personal på flygplatser med liten trafik och istället hantera torntjänsten på avstånd. En flygledare i en central skulle på detta vis kunna hantera en eller flera flygplatser med lite trafik. Denna lösning kan också användas om man tvingas utrymma ett bemannat torn på grund av brand eller andra hot.

Inom ramen för SESAR provas olika koncept för fjärrstyrda torn. Luftfartsverket och Saab har deltagit aktivt i detta arbete och Ängelholms flygplats har varit testbänk för ett system som vidareutvecklats till en färdig produkt.

LFV har skickat in ansökan om godkännande från Transportstyrelsen om att börja med fjärrstyrda torn. Om tillstånd ges är avsikten att trafiken på Örnsköldsviks flygplats ska ledas av flygledare i Sundsvall. Detta skulle i så fall vara det första fjärrstyrda tornet i världen.

## Taxning med elmotor

Taxning med elmotor är en framtida utveckling som har demonstrerats och sannolikt kommer införas i stor omfattning. Detta gäller både eldrivna ”push-back-fordon” som backar ut flygplan från sin gate och flygplan som förses med elmotor som driver noshjul (eller huvudhjul) så att flygplanet själv kan taxa ut till start.

Flera demonstrationssystem finns redan och man riktar in sig främst på flygplan av storleksklassen upp till Boeing 737 och Airbus 320. Helt säkert kommer detta minska partikelutsläppen och förbättra luftkvaliteten på flygplatser.

Några av systemen för eltaxning som provas använder den lilla hjälpmotorn APU (Auxillary Power Unit) som finns ombord på flygplanet för att alstra elektricitet och hjälpa till med start av huvudmotorerna när markström inte är tillgänglig. Då APU är en liten jetmotor så kommer ett visst utsläpp av partiklar ske även om det jämfört med huvudmotorerna är litet. På större flygplatser där det är långa taxitider och mycket trafik kommer stora mängder bränsle sparas med denna typ av system<sup>26</sup>. Note-

---

<sup>26</sup> Två exempel på denna typ av system är Electric Green Taxiing System (EGTS)



ras bör att flygplanen kommer att förlora något i sin lastförmåga då dessa system ökar flygplanets tomvikt.

Vad gäller eldrivna fordon som bogserar flygplan så är vinsten även här främst bättre luftkvalitet. Hur mycket bränsle man sparar eller förändringen i klimatpåverkan beror på hur elkraften som fordonen använder är producerad.

## Obemannade flygsystem.

Obemannade flygfarkoster används i dag i många tillämpningar. Det är främst helikoptersystem med olika kamerasystem som används för fotografering och av fastighetsmäklare, media och inom jordbrukstillämpningar. Operatörer av denna typ av system behöver tillstånd från Transportstyrelsen för verksamheten. En viktig begränsning i dagens tillämpning av reglerna är att dessa system bara får flygas inom operatörens synhåll.

UAS (Unmanned Aerial Systems) är samlingsbegreppet för obemannade flygande system och kan vara allt från ballonger, helikoptersystem eller flygplan. UAS inrymmer även system med hög automationsgrad eller autonomi. Begreppet UAV (Unmanned Aerial Vehicle) avser endast farkosten.

En undergrupp av UAS är fjärrstyrda flygplanssystem, dessa kallas RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) vilket är den typ av system som använts flitigt i militära tillämpningar. Den svenska försvarsmaktens obemannade flygsystem flyger i Sverige endast i avlyst luftrum, d.v.s. separerat från övrig flygtrafik.

Det finns starka intressen för att möjliggöra ett bredare användande av RPAS i civila tillämpningar och att möjliggöra flygning utom synhåll från operatören. Genom att göra det möjligt skapas en efterfrågan och en marknad för industriell utveckling. Obamaadministrationen har avsatt stora summor för att den amerikanska luftfartsmyndigheten FAA skyndsamt skall utveckla ett regelverk som skall göra det möjligt att använda RPAS i det civila luftrummet. Sista december 2013 släpptes USA:s uppdaterade "roadmap" för hur integreringen ska gå till [12].

För att flygsäkerhetsmässigt kunna tillåta att obemannade och beman-

---

utvecklas av Honeywell och Safran, (se [http://www.aviationweek.com/Article.aspx?id=/article-xml/awx\\_06\\_16\\_2013\\_p0-588629.xml](http://www.aviationweek.com/Article.aspx?id=/article-xml/awx_06_16_2013_p0-588629.xml)) och företaget "Wheel tug" (se <http://www.wheeltug.gi/index.php>)

nade luftfartyg samtidigt uppträder i luftrummet krävs tydliga regelverk som beskriver ansvarsförhållanden, rutiner, metoder och teknik. I vilken omfattning detta kommer att realiseras är beroende på hur snabbt de juridiska och tekniska knäckfrågorna som ansvarsförhållanden och kraven på ombordsystemen kommer att lösas.

Kraven på fjärrstyrda system är desamma som på bemannande och de måste visa på förmågan att upprätthålla separation till annan trafik och undvika kollisioner samtidigt som man måste skapa säkra förbindelser för styrdata till dessa system.

Bedömningen från de stora betydande aktörerna är att integreringen är genomförd till år 2030<sup>27</sup>.

## Andra operativa koncept

Med de långa ledder som utvecklingen av flygplan och motorer har så kan man inte se några realistiska omvälvande tekniska koncept för flyget i perspektivet 2030. Många av de flygplan vi flyger med 2030 är under utveckling eller redan i luften.

Fyra operationella koncept med potential att spara bränsle som går att göra med befintliga system i perspektivet 2030 är att:

1. mellanlanda
2. lufttanka
3. flyga saktare
4. formationsflyga

Notera att detta är tekniska lösningar och om dessa är affärsmässigt gångbara är långt ifrån säkert, se resonemang nedan.

Att flyga en lång flygresor med ett mindre flygplan som mellanlandar förekommer redan i dag hos vissa flygbolag och charterbolag. Detta förfarande sparar bränsle jämfört med att flyga med ett större flygplan även om man måste genomföra ytterligare en bränslekrävande stigning efter en mellanlandning. Stora flygplan har nämligen oproportionerligt mer bränsle

<sup>27</sup> <http://aerosociety.com/Assets/Docs/Events/694/13.GerryCorbett.pdf>

ombord jämfört med mindre flygplan<sup>28</sup>. Medelhastigheten blir naturligtvis lägre för en resa när man måste landa för att tanka.

På samma tema kan lufttankning spara bränsle om långa interkontinentala flygningar gjordes i mindre flygplan som lufttankkads ungefär halvvägs. Besparingar på upp till 20 % i bränsle har redovisats från trafiksimuleringar [13] Notera att detta inkluderar bränsle som tankflygplanen konsumerar. Lufttankning utförs dagligen militärt och är en mycket etablerad teknik, men civil certifiering saknas helt.

Att flyga något saktare än idag är ytterligare en metod som har potential att ge några enstaka procentenheters bränslebesparing direkt med dagens flygplansflotta [14].

Att som fåglarna flyga i formation i ett plogmönster ger energibesparingar då man utnyttjar aerodynamiska virvlar från framförvarande till sin egen fördel. Att reguljära flygningar skulle genomföras på detta sätt har föreslagits av Airbus<sup>29</sup> men liksom med lufttankning saknas helt civila regler för denna typ av uppträdande. USA:s flygvapen har provat med två stora transportflygplan av typen C-17 med modifierade autopiloter som, över tid, kan hålla flygplanen med den bästa inbördes positionen för att utnyttja virveffekten maximalt. En bränslebesparing på ca 10 % redovisas<sup>30</sup>.

För att något av dessa koncept ska bli ett realistiskt alternativ måste man titta på hela transportarbetet som utförs. Stora flygbolag har sina flygplan i luften dygnet runt och deras transportkapacitet *per tidsenhet* är enkelt uttryckt antalet flygstolar man har multiplicerat med den medelhastighet man flyger. Tre av ovanstående koncept innebär en minskad total transportkapacitet (alla utom formationsflygning). En minskad transportkapacitet kan bara kompenseras med fler flygplan vilket är en stor investering och måste vägas in i den totalkalkyl man gör.

<sup>28</sup> Som exempel så utgör förhållandet mellan vikten på passagerarna ombord och den maximala startvikten 9 % för en Airbus 380 (525 passagerare) jämfört med 20 % för en Airbus 319 Neo (150 passagerare). Siffror tagna från Airbus hemsida. Antagande om passagerarvikt på 100 kg och 100 % kabinfaktor i normal konfiguration är gjort. Motsvarande siffror för förhållandet maximal bränslemängd delat med maximal startvikt är 46 % för Airbus 380 och 26 % för A319 Neo.

<sup>29</sup> <http://www.airbus.com/innovation/future-by-airbus/smarter-skies/aircraft-in-free-flight-and-formation-along-express-skyways/>

<sup>30</sup> <http://www.edwards.af.mil/news/story.asp?id=123322535>

## Bortom 2050

Det finns olika koncept som idag förefaller osannolika att få något större genomslag i perspektivet 2030 men som möjligen skulle kunna fungera längre fram i tiden.

Det finns förslag på "transfersystem" i luften. Mycket stora flygplan med kapacitet på över 1000 personer som under långa tider (veckor eller månader) ligger i "omloppsbanor" mellan kontinenter. Mindre flygplan startar från marken och dockar med det större flygplanet när det passerar och passagerare kliver av eller på. Ett sådant system skulle helt omforma flygtransportssystemet av dagens resor. De största naven (hubbar) dit vi många gånger måste åka för att påbörja en interkontinental resa skulle då helt försvinna. Svårigheten är att hitta en energikälla till dessa flygplan som skulle vara i luften i månader. Atomdrivna flygplan<sup>31</sup> började utvecklas USA under 1950-talet men blev aldrig operationella. Man flög med en fungerande reaktor ombord vid några tillfällen för att prova ut hur strålningsskyddet skulle vara utformat. Programmet i USA, liksom de som Sovjetunionen hade på gång, lades ner och det är fortfarande sannolikt en dålig idé att använda kärnenergi i flygplan. Om någon ny säker energiteknik skulle uppträda så skulle denna typ av system vara ett alternativ.

Andra koncept enligt principen "lättare än luft" med ballonger och zeppelinare har funnits länge men så länge kravet att färdas med de hastigheter vi är vana vid så kommer dessa system inte kunna konkurrera med dagens system. Eldrift i flyg har viss potential på lång sikt men idag saknas även här den effekt som krävs för att kunna erbjuda resor med höga hastigheter. Eldrift behandlas mer i detalj på annan plats i denna rapport.

## 16 Marknad i förändring – Singel European Sky

EU driver sedan 2004 "Single European Sky" (SES) som syftar till att effektivisera utnyttjandet av luftrummet i Europa. En enorm satsning på flygtrafiktjänst görs inom ramen för SES i projektet SESAR (Single European Sky Air Traffic Management) För att administrera detta projekt bildades SESAR Joint Undertaking som en legal part. Totala investeringen från alla bidragande parter fram till 2025 beräknas till 30 miljarder

---

<sup>31</sup> <http://fti.neep.wisc.edu/neep602/SPRING00/TERMPAPERS/stoffel.pdf>

euro<sup>32</sup> i SESAR

Det är särskilt är det mycket komplexa luftrummet över Centraleuropa som behöver effektiviseras. Ofta gör man jämförelser med USA som flygleder större trafikvolym till i stort sett halva kostnaden över ett motsvarande geografiskt område som Europa.

Projektet är enormt och mycket kritik har lämnats på att SESAR inte levererat någon effekt. Ansvarig kommissionär, Slim Kallas använde titeln ”10 years and still not delivering” på ett tal han höll på en Single European Sky Conference<sup>33</sup> på Cypern 2012.

Kallas riktade särskild kritik mot de stora länderna Storbritannien, Tyskland och Frankrike för att de inte samarbetar.

Kallas säger i talet att ineffektiviteten i luftrummet kostar Europa 5 miljarder euro per år och att detta inte är hållbart för framtiden. Det påverkar EU:s ekonomi och miljö negativt.

Ett tydligt mål är att skapa större regioner som går över landsgränserna med sammanhållen flygtrafikledning, (FAB – Functional Airspace Blocks). Dessa har bildats men i vissa fall bara som avtal och någon verklig effektivisering har inte skett.

Ett lyckat exempel på samarbete avseende gemensamt luftrum finns mellan Sverige och Danmark som har gått ihop och bildat ett gemensamt FAB och dessutom bildat ett svensk-danskt företag NUAC (Nordic Unified Air Traffic Control) som har det operativa ansvaret för flygtrafiktjänst för flygplan en route.

Flyget är sedan 1 januari 2012 med i EU:s handel med utsläppsätter. Från främst USA, Kina och Ryssland riktades stark kritik mot systemet redan flera år innan systemet togs i drift. Obamaadministrationen förbjöd helt enkelt flygbolag från USA att betala till ETS<sup>34</sup>. I november 2012 stoppades utsläppshandeln för trafik utanför EU-området.

Samtidigt tog ICAO ett steg framåt i utsläppsfrågan och beslutade att utveckla ett globalt åtgärdsprogram för koldioxidfrågan som kallas MBMs (global Market Based Measures) som ska vara utvecklade till 2016 och fullt implementerade 2020.

EU har nu föreslagit en ändring till flygets medverkan i ETS som i

<sup>32</sup> <http://www.sesarju.eu/tags/master-plan?page=1>

<sup>33</sup> Talet finns att läsa på [http://europa.eu/rapid/press-release\\_SPEECH-12-711\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-12-711_en.htm)

<sup>34</sup> European Union Emissions Trading Scheme Prohibition Act of 2011; <https://www.govtrack.us/congress/bills/112/s1956/text>

praktiken innebär att avgiften bara tas ut för den sträcka som flygs i europeiskt luftrum fram till 2020 då ICAO:s system träder i kraft. Denna ändring förväntas Europaparlamentet besluta om tidigt 2014<sup>35</sup>.

## 17 Slutsats

De framtidsscenarioer som finns för flygets tillväxt kombinerat med svårigheten att (än så länge) ställa om flyget på något radikalt sätt gör att flyget internationellt står inför stora utmaningar både kapacitetsmässigt och miljömässigt.

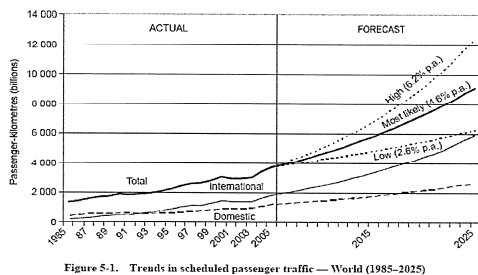
För svenska förhållanden kan man konstatera att inrikesflyget de senaste 20 åren stagnerat och egentligen inte visar några tecken på tillväxt. Den svenska utrikestrafiken har ökat kraftigt sista 20 åren liksom trafiken som flyger över Sverige utan att landa [15]. Hur trafikutvecklingen för lågprisbolagen nationellt ser ut är svårbedömd. Antalet resenärer har stagnerat eller till och med minskat från t.ex. Skavsta, Västerås och Sæve de senaste åren [10].

Prognoser på den globala tillväxten av flygtrafik görs av alla stora aktörer som ICAO och IATA. Boeing och Airbus gör också prognoser som är intressanta att studera då dessa flygplanstillverkare i stort sett har monopol på större flygplan (fler än 100 stolar) och således representerar "tillgången" på flygplan på marknaden.

En global årlig tillväxt på 4,6 % för flygtrafiken 2007-2025 är en siffra som ICAO angav som mest sannolik år 2007 [16], se figur 10. Runt detta medelvärde finns det höga och låga scenarier inom vilka de flesta stora aktörers prognoser också hamnar.

Från figur 10 ser man att trafiken sannolikt kommer att fördubblas i perspektivet 2030 och teoretiskt sett finns det gott om plats för mer flygtrafik i lufthavet. Mycket av tillväxten kommer att ske i utvecklingsländer från, en i dag, låg nivå medan det i de redan trånga luftrummet över Europa, Asien och USA i praktiken finns liten utvecklingspotential. Särkilt svårt är situationen på, och anslutning till, de största flygplatserna på de populäraste resmålen där trafiken redan i idag många gånger ligger på gränsen för sin kapacitet. Teknik som på ett säkert sätt medger minskade krav på separation kommer att öka kapaciteten i systemet, men sannolikt inte i den omfattning som den ökade efterfrågan kräver.

<sup>35</sup> [http://ec.europa.eu/clima/news/articles/news\\_2013101601\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/news/articles/news_2013101601_en.htm)



Figur 10: Från 1985 – 2007 observerad trafik och mellan 2007-2025 prognostiserad passagerstrafik för världen, ICAO

För flygtrafikledningen kan man konstatera att nya tekniker och metoder som förbättrar effektiviteten eller miljön har en positiv effekt på alla flygplan, gamla som nya.

Viktigt att notera är att Flygtrafiktjänstens påverkansmöjligheter i absoluta termer vad gäller flygtes utsläpp av koldioxid är liten. I EU utgör flygtrafiktjänstens bidrag 6 % av flygets totala utsläpp [4].

Några principiella förändringar för hur flygplan, motorer och luftfartssystemet ser ut 2030 jämfört med i dag är svåra att identifiera. Ur ett ingenjörsperspektiv finns tekniska lösningar som har möjligheten att åstadkomma ett betydligt effektivare system men i vilken omfattning dessa kan införas beror på de ekonomiska och politiska faktorerna. Införandet av fjärrstyrda flygsystem för civilt bruk bör ha genomförts, men principerna som de flyger efter kommer att vara samma, eller mycket lika de som bemannade flygsystem följer.

Om ett verkligt "Single European Sky" kommer materialiseras i Europa är svårbedömt. Detta är i huvudsak en politisk fråga där olika nationella intressen måste sammanföras.

Ett kraftigt stigande oljepris är ett verkligt hot mot flyget. Då bränslet är en mycket stor del av kostnaderna idag för flygbolagen skulle ett sådant scenario resultera i nya konkurser i redan ansträngda bolag på marknaden. Ökade bränslekostnader i framtiden, eller en verklig brist på bränsle, skulle förändra marknaden så att flygtransporter skulle återgå till att bli en mycket exklusiv och dyr transportform.

Andra spektakulära slag mot flyget som terroristattacker eller andra former av haverier kommer sannolikt att förekomma då och då men flyget har hittills alltid återhämtat sig från denna typ av händelser.

Flyget har skapat ett förhållandevis billigt och mycket tillgängligt system som snabbt kan transportera människor och gods över världen. För en stor del av jordens befolkning är en flygresa idag ingen stor investering utan ett reellt resealternativ.

För att kunna erbjuda alla ett hållbart flygtransportsystem i framtiden behövs effektivare flygplan, motorer och flygtrafiktjänst. Dessa åtgärder måste kombineras med politiska åtgärder som säkerställer ett brett och rättvist utbud av flygtransporter för jordens befolkning. Samtidigt bör man försöka att, där det är möjligt, flytta över flygtransporter till andra transportsektorer. Ett internationellt accepterat system som låter flyget kompensera för sin miljö och klimatpåverkan kommer också vara nödvändigt. Om ICAO MBM-initiativ är tillräckligt återstår att se.

## 18 Bildförteckning

1. Bild 2 på sid 4 från Wikimedia <http://en.wikipedia.org/wiki/File:World-airline-routemap-2009.png>
2. Bild 9 på sid 15 från <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

## Litteraturförteckning

- [1] D.L. Rhoades. *Evolution of International Aviation: Phoenix Rising*. Ashgate, 2008. ISBN 9780754673897.
- [2] ICAO. Convention of International Civil Aviation done at Chicago on the 7<sup>th</sup> day of December 1944. [http://www.icao.int/publications/Documents/7300\\_orig.pdf](http://www.icao.int/publications/Documents/7300_orig.pdf).
- [3] Eurocontrol. PRR 2009 Performance Review Report An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2009, maj 2010. <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/prr-2009.pdf>.
- [4] Eurocontrol. PRR 2012 Performance Review Report An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2012,



- maj 2013. <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/prr-2012.pdf>.
- [5] Transportstyrelsen. Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om trafikregler för luftfart. TFTS 2010:145 2 kap. §11–§21, 2010.
- [6] Håkan Svensson. NulÄgesbeskrivning flygVÄgssystem stockholm arlanda airport 2010-01-25, januari 2010. D-LFV 2009-025079.
- [7] LFV. AIP Sverige/Sweden. ENR 1.4-1, november 2013. [http://www.lfv.se/AIP/ENR/ENR%201/ES\\_ENR\\_1\\_4\\_en.pdf](http://www.lfv.se/AIP/ENR/ENR%201/ES_ENR_1_4_en.pdf).
- [8] David S. Lee, David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, och Robert Sausen. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22–23):3520 – 3537, 2009. ISSN 1352-2310. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003574>.
- [9] Elin Björklund. Observed ice supersaturated layers over sweden and implications for aviation induced contrails over the baltic sea. Magisteravhandling, Uppsala Universitet, Institutionen för geovetenskaper, 2011. ISSN 1650-6553.
- [10] Arne Karyd. Fossilfri flygtrafik? Underlagsrapport till utredningen om fossiloberoende fordonsflotta, N 2012:05, maj 2013.
- [11] Fredrik Lindgren, Bengt Johansson, Tomas MalmLöf, och Fredrik Lindvall. Siting conflicts between wind power and military aviation—problems and potential solutions. *Land Use Policy*, 34(0): 104 – 111, 2013. ISSN 0264-8377. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.02.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837713000355>.
- [12] U.S. Department of Defence. Unmanned systems integrated roadmap fy2013-2038. 14-S-0553, 12 2013. <http://www.defense.gov/pubs/DOD-USRM-2013.pdf>.
- [13] Richard McRoberts, Juliana M Early, Fabian Morscheck, Mark A Price, och Bernd Korn. Implication of tanker mission concept on the benefits evaluation of a civil air-to-air refuelling transport system.

I *2013 Aviation technology, integration, and operations conference*. AIAA Aviation, American Institute of Aeronautics and Astronautics, augusti 2013. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-4285>.

- [14] A. Koch. Climate impact mitigation potential given by flight profile and aircraft optimization. ECATS Conference, november 2013.
- [15] Transportstyrelsen. Prognos 2013–2018-Trafikprognos luftfart. Dnr TSL 2013-4869, september 2013. [http://www.transportstyrelsen.se/Global/Luftfart/Statistik\\_och\\_analys/Prognos-2013-2018-host.pdf](http://www.transportstyrelsen.se/Global/Luftfart/Statistik_och_analys/Prognos-2013-2018-host.pdf).
- [16] ICAO. Outlook for Air Transport to the Year 2025, september 2007. [http://www.icao.int/sustainability/Documents/C313\\_Outlook\\_En.pdf](http://www.icao.int/sustainability/Documents/C313_Outlook_En.pdf).

## 9. Jonas Åkerman: Kommentar

### PM: Kommentarer till rapporter om flyget beställda av Trafikutskottet

Uppdraget går ut på att kommentera fyra underlagsrapporter ur ett vidare systemperspektiv. Jag har således fokuserat på de övergripande slutsatsernas giltighet och vilka implikationer dessa ger i förhållande till klimatmålen. De underlagsrapporter som granskats är:

- Mårtensson, Tomas, 2014. Flygtrafik och flygtrafikledning för framtidens luftfart.
- Grönstedt, Tomas, 2014. Kartläggning av kunskapsläget av teknikutvecklingen inom området flygplansmotorer.
- Ringertz, Ulf, 2014. Flygplanskonstruktion för framtidens luftfart.
- Hagström, Martin, 2014. Alternativa flygbränslen.

Grönstedt (2014) gör uppskattningen att effektiviseringen av flygplansflottans bränsleförbrukning sannolikt inte kommer överstiga 1,5% per år de närmaste decennierna. Detta överensstämmer med den vetenskapliga litteraturen på området. Macintosh och Wallace (2009) räknar med 1,0-1,9% effektivisering per år fram till 2020 och 0,5-1,0% effektivisering därefter. Owen et al. (2010) anger 1% effektivisering per år mellan 2000 och 2050 som "a generally optimistic outcome". I samma artikel anges ett scenario med 2,1% effektivisering per år mellan 2000 och 2050 som "virtually impossible". I Owens uppskattning är även förändringar vad gäller flygvägar, beläggning etc, inräknade. Vad gäller Grönstedts uppskattning förefaller de också inräknade, men det sägs inte explicit. Gröna inflygningar (Continuous Descent Approach), som nämns av Mårtensson (2014), är bra både ekonomiskt och för miljön, och tillämpas delvis idag. Utslaget på det längre perspektivet till 2050 ger de dock inte en större effektivitetsförbättring än i storleksordningen 0,1% per år. Mårtensson konstaterar också att möjligheterna till genare flygvägar rör sig om en engångsförbättring på några procent (teoretiskt max på ca 6%). Beläggningen i passagerarflyget låg mellan 2007 och 2012 mellan 76 och 79% (IATA, 2013). En påtaglig ökning från denna historiskt höga nivå bedöms som osannolik (Lee, et al., 2009).

Grönstedt kommer till slutsatsen att den globala efterfrågan på flygbränsle under de närmaste två decennierna kommer att öka med 2,5-3,5% per år, vilket bygger på att flygresandet beräknas öka med 4-5% under de närmaste två decennierna. Även denna slutsats är i stort sett rimlig. En sådan utveckling skulle innebära att flygets bränsleförbrukning förväntas öka med mellan 64 och 99% under de närmaste två decennierna.

Ringertz (2014) pekar ut flera intressanta framtida koncept för innovativa flygplanskonstruktioner. Han konstaterar samtidigt att de stora flygplanstillverkarnas (Boeing och Airbus) framtidskoncept inte är så revolutionerande utan mer innebär en förfining av befintliga koncept. Detta beror till stor del på

att det innebär stora ekonomiska risker att satsa på radikalt annorlunda teknik. Att flygbranschen traditionellt har, och bör ha, ett mycket stort fokus på att hög säkerhet bidrar också till försiktighet vad gäller nya lösningar. Ringertz avslutar också med att konstatera att det är osannolikt att trafikflygplanens utformning ändras radikalt i perioden fram till 2030. Till detta kan tilläggas att även när en flygplanstillverkare i framtiden väljer att kommersialisera en radikalt annorlunda flygplandesign, så tar det lång tid från idé till dess att den ger en påtaglig effekt på flygplansflottans totala utsläpp. Enligt IPCC (1999, s 224) så tar det mellan 45 och 65 år från att en flygplansmodell börjar utvecklas på ritbordet till dess det sista flygplanet av denna typ pensioneras. Flygplans långa livslängd, ofta 25-30 år, är en viktig faktor i detta sammanhang. Detta innebär att när man talar om att en ny flygplansmodell är 20-25% bränsleeffektivare än sin föregångare så handlar det om ca 1% effektivisering per år.

Det gäller generellt att vara uppmärksam på vad som avses när uppgifter om ny tekniks bränsleeffektiviseringspotential anges. Effektiviseringspotentialen kan exempelvis anges för ny flygplansteknik under utveckling, för bästa flygplanstyp som kan köpas eller för genomsnittet av sålda flygplan under ett år. I alla dessa fall kommer det att dröja ett (olika) antal år innan den nya tekniken är spridd till hela flygplansflottan.

I Hagström (2014) diskuteras möjligheterna att införa alternativa flygbränslen. Han konstaterar att det idag finns certifierade processer för att producera flygbränsle från andra råvaror än olja. Jämfört med att producera förnybara drivmedel till andra transportslag krävs det dock fler processteg för att producera flygbränsle. Detta innebär både högre kostnader och sämre energieffektivitet i omvandlingen. Hagström sammanfattar: "Det är därför idag mer kostnads- och energieffektivt att använda förnyelsebara drivmedel inom andra transportslag än luftfarten." Detta konstaterande är helt riktigt. Dessutom finns det en annan omständighet som ytterligare minskar sannolikheten att det skulle komma att användas mer än symboliska mängder förnyelsebart flygbränsle de närmaste decennierna. Priset på flygbränsle har enligt Hagström de tre senaste åren varierat mellan 0,69 USD och 0,88 USD per liter, dvs det har legat kring 5 kronor per liter. I dagsläget får man betala knappt 20 öre (inom EU ETS) för de koldioxidutsläpp som sker när en liter flygbränsle används. För en liter diesel får man i dagsläget betala ca 14 kronor, och av detta utgör koldioxidskatt 3,09 kronor, eller 3,86 kronor inklusive moms. Detta innebär att om man väljer att producera en liter förnybart flygbränsle så kan man få en intäkt på ca 5,20 kronor medan man får en intäkt på ca 8,86 kronor om man istället väljer att producera en liter förnybar diesel. Dessutom är det som Hagström konstaterar förenat med något högre kostnader om man väljer att producera flygbränsle. Så länge som detta stora gap i beskattning består är det således mycket osannolikt att några större mängder flygbränsle kommer att produceras från förnyelsebara råvaror. Här skulle man kunna invända att man i exempelvis USA har mycket lägre bränsleskat-

ter än i Europa. Den stora skillnaden i intäkter skulle dock göra det lönsamt att transportera förnybar diesel exempelvis från USA till Europa.

En slutsats som kan dras när man lägger ihop underlagsrapporterna, och som också i stort stämmer med den vetenskapliga litteraturen (Macintosh och Wallace, 2009; Lee et al., 2009), är att utsläppen av växthusgaser från det globala flyget kommer att öka med i storleksordningen 40-100% de närmaste 20 åren, om inte flygresandets årliga tillväxttakt blir lägre än de 4-5% som de flesta prognoserna pekar på. Det är tveksamt om en sådan utsläppsökning är möjlig att förena med uppnåendet av EUs och Sveriges långsiktiga utsläppsmål för att nå 2-gradersmålet.

## Referenser

IATA, 2013. Annual Review 2013.

IPCC, 1999. Aviation and the global atmosphere. A Special Report of IPCC Working groups I and III.

Lee et al., 2009. Aviation and global climate change in the 21<sup>st</sup> century. Atmospheric Environment 43 (2009) 3520-3537.

Owen et al., 2010. Flying into the future: Aviation Emission Scenarios to 2050. Environmental Science and Technology 2010, 44, 2255-2260

Macintosh, A. and Wallace, L. 2008. International aviation emission-sto2025: Can emissions be stabilized without restricting demand? Energy Policy 37(2009)264–273.

BILAGA

## Några aktörer inom flyget

## Internationella organisationer

International Civil Aviation Organization, **ICAO**, är ett FN-organ med uppgift att bidra till ökad flygsäkerhet genom gemensamma regler inom bland annat flygtrafiktjänst, men även när det gäller flygplatser utformning, certifiering av piloter och flygtekniker och regler för hur man skall planera samt genomföra flygningar. De flesta av världens nationer är medlemmar i ICAO.

**IATA** är den internationella organisationen för flygbolag. IATA har ca 240 medlemmar i ungefär 120 länder. IATA hanterar regler och liknande inom kommersiellt passagerarflyg. Bland annat har man standardiserat biljettsystem, skapat flygplatskoder och flygbolagskoder.

**Eurocontrol** är en multinationell organisation för flygsäkerhet i luftrummet där närmare 40 europeiska stater är medlemmar. Namnet till trots är Eurocontrol inte en del av EU utan en helt egen internationell organisation som arbetar med att på olika sätt harmonisera och utveckla flygtrafiktjänsterna i medlemsländerna. En viktig uppgift för Eurocontrol är dock att bistå EU-kommissionen i deras lagstiftningsarbete.

**Easa** (Europeiska byrån för luftfartssäkerhet) är en EU-myndighet och den gemensamma europeiska flygsäkerhetsmyndigheten. Easa tar fortlopande över allt fler av de tillstånds- och tillsynsuppgifter som gäller för flygbolag och liknande aktörer och som tidigare utfördes av de europeiska ländernas egna flygsäkerhetsmyndigheter.

## Nationella aktörer

**Trafikverket** ansvarar för långsiktig planering av transportsystemet inklusive luftfarten. Trafikverket tar bl.a. fram underlag och sköter vissa upphandlingar inom flygområdet.

**Transportstyrelsen** arbetar för att uppnå god tillgänglighet, hög kvalitet, säkra och miljöanpassade transporter för transportområdet, inklusive luftfarten. Transportstyrelsen tar fram regler, ger tillstånd och följer upp hur de efterlevs.

**Trafikanalys** granskar beslutsunderlag, utvärderar åtgärder och ansvarar för statistik.

**Luftfartsverket**, LfV, bedriver flygledning för civilt och militärt flyg i Sverige samt ansvarar för säkerheten i och utvecklingen av svenskt luftrum.

**VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut**, är ett oberoende forskningsinstitut inom transportsektorn. VTI utför tillämpad forsknings- och utvecklingsverksamhet som rör samtliga trafikslag.

**Swedavia** är en statlig koncern som äger, driver och utvecklar tio svenska flygplatser.

Föreningen *Svenskt Flyg* är en intresseorganisation vars syfte är att med vissa utvalda målgrupper kommunicera idéer, åsikter och kunskap om det kommersiella flyget och flygindustrin i Sverige. Avsikten är att hos de utvalda målgrupperna stärka förtroendet för det kommersiella flyget och flygindustrin, så att dessa ges möjligheter att verka och utvecklas i Sverige.

2011/12:RFR1	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET Biologisk mångfald i rinnande vatten och vattenkraft – En uppföljning
2011/12:RFR2	UTBILDNINGSPOLITIKUTSKOTTET Utbildningsutskottets offentliga utfrågning om forsknings- och innovationsfrågor
2011/12:RFR3	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET Offentlig utfrågning om biologisk mångfald i rinnande vatten och vattenkraft
2011/12:RFR4	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Konstitutionsutskottets seminarium om en nordisk samekonvention
2011/12:RFR5	NÄRINGSUTSKOTTET eHälsa – nytta och näring
2011/12:RFR6	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Frågeinstituten som kontrollinstrument Volym 1 och 2
2011/12:RFR7	SOCIALUTSKOTTET Socialutskottets öppna utfrågning på temat Missbruks- och beroendevård – vem ska ansvara för vad? torsdagen den 24 november 2011
2011/12:RFR8	TRAFIKUTSKOTTET Tillsynen av yrkesmässiga godstransporter på väg – En uppföljning
2011/12:RFR9	TRAFIKUTSKOTTET Trafikutskottets offentliga utfrågning den 8 december 2011 om järnvägens vinterberedskap
2011/12:RFR10	KULTURUTSKOTTET Verksamheten vid scenkonstallianserna – En utvärdering
2011/12:RFR11	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Kunskapsöversikt om nationella minoriteter
2011/12:RFR12	UTBILDNINGSPOLITIKUTSKOTTET Rapporter från utbildningsutskottet Förstudie – utbildningsvetenskaplig forskning Breddad rekrytering till högskolan
2011/12:RFR13	SKATTEUTSKOTTET Uppföljning av undantag från normalskattesatsen för mervärdesskatt
2011/12:RFR14	TRAFIKUTSKOTTET Trafikutskottets offentliga utfrågning den 29 mars 2012 om framtida godstransporter
2011/12:RFR15	ARBETSMARKNADSUTSKOTTET Arbetsmarknadspolitik i kommunerna Del 1 Offentligt seminarium Del 2 Kunskapsöversikt
2011/12:RFR16	NÄRINGSUTSKOTTET Offentlig utfrågning om life science-industrins framtid i Sverige



2012/13:RFR1	FINANSUTSKOTTET Statlig styrning och ansvarsutkrävande
2012/13:RFR2	FINANSUTSKOTTET Utfrågningsprotokoll EU, euron och krisen
2012/13:RFR3	TRAFIKUTSKOTTET Trafikutskottets offentliga utfrågning den 29 mars 2012 om framtida godstransporter
2012/13:RFR4	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET OCH NÄRINGSUTSKOTTET Uppföljning av vissa frågor inom landsbygdsprogrammet
2012/13:RFR5	FÖRSVARSUTSKOTTET FöU Forskning och utveckling inom försvarsutskottets ansvarsområde
2012/13:RFR6	CIVILUTSKOTTET Kontraheringsplikt vid tecknandet av barnförsäkringar
2012/13:RFR7	KU, FiU, KrU, UbU, MJU och NU Öppet seminarium om riksdagens mål- och resultatstyrning: vilka mål, vilka resultat?
2012/13:RFR8	UTBILDNINGSUTSKOTTET Utbildningsutskottets offentliga utfrågning om gymnasiereformen
2012/13:RFR9	UTBILDNINGSUTSKOTTET Förstudier om – Förskolan – Utbildning för hållbar utveckling inklusive entreprenöriellt lärande
2012/13:RFR10	UTBILDNINGSUTSKOTTET Hur kan ny kunskap komma till bättre användning i skolan
2012/13:RFR11	SOCIALUTSKOTTET Socialutskottets öppna seminarium om folkhälsofrågor onsdagen den 27 mars 2013
2012/13:RFR12	ARBETSMARKNADSUTSKOTTET Mogen eller övermogen? – arbetsmarknadsutskottets offentliga seminarium om erfaren arbetskraft
2012/13:RFR13	TRAFIKUTSKOTTET Offentlig utfrågning om sjöfartens kapacitetsmöjligheter
2012/13:RFR14	TRAFIKUTSKOTTET Offentlig utfrågning om flygtrafikledningstjänsten – har vi landat i den bästa lösningen?
2012/13:RFR15	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET Offentlig utfrågning om oredlighet i livsmedelskedjan
2012/13:RFR16	UTBILDNINGSUTSKOTTET Utbildningsutskottets offentliga utfrågning om hur ny kunskap bättre ska kunna komma till användning i skolan
2012/13:RFR17	NÄRINGSUTSKOTTET Näringsutskottets offentliga utfrågning om en fossiloberoende fordonsflotta

2013/14:RFR1	SOCIALUTSKOTTET Etisk bedömning av nya metoder i vården – en uppföljning av landstingens och statens insatser
2013/14:RFR2	KULTURUTSKOTTET Uppföljning av regeringens resultatredovisning för utgiftsområde 17 Kultur, medier, trossamfund och fritid
2013/14:RFR3	KULTURUTSKOTTET En bok är en bok är en bok? – en fördjupningsstudie av e-böckerna i dag
2013/14:RFR4	KULTURUTSKOTTET Offentlig utfrågning om funktionshindersperspektiv i kulturarvet
2013/14:RFR5	TRAFIKUTSKOTTET Hela resan hela året! – En uppföljning av transportsystemets tillgänglighet för personer med funktionsnedsättning
2013/14:RFR6	FINANSUTSKOTTET Finansutskottets offentliga utfrågning om ändring av riksdagens beslut om höjd nedre skiktgräns för statlig inkomstskatt
2013/14:RFR7	SKATTEUTSKOTTET Inventering av skatteforskare 2013
2013/14:RFR8	ARBETSMARKNADSUTSKOTTET Ett förlängt arbetsliv – forskning om arbetstagarnas och arbetsmark- nadens förutsättningar
2013/14:RFR9	SOCIALFÖRSÄKRINGSUTSKOTTET Offentlig utfrågning om vårdnadsbidrag och jämställdhetsbonus
2013/14:RFR10	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Subsidiaritet i EU efter Lissabon
2013/14:RFR11	SKATTEUTSKOTTET Utvärdering av skattelättnader för experter, specialister, forskare och andra nyckelpersoner
2013/14:RFR12	UTBILDNINGSUTSKOTTET Utbildningsutskottets offentliga utfrågning om PISA-undersökningen
2013/14:RFR13	SOCIALUTSKOTTET Socialutskottets öppna kunskapsseminarium om icke smittsamma sjukdomar – ett ökande hot globalt och i Sverige (onsdagen den 4 december 2013)
2013/14:RFR14	KULTURUTSKOTTET För, med och av – en uppföljning av tillgängligheten inom kulturen
2013/14:RFR15	SKATTEUTSKOTTET Skatteutskottets seminarium om OECD:S handlingsplan mot skatte- baserodering och vinstförflyttning