



Parlement en Wetenschap

TOEKOMST VERDUURZAMING LUCHTVAART: EEN ACTUALISATIE

Deze factsheet is tot stand gekomen in het kader van de samenwerking tussen de Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.

Auteurs: dr. Ing. Paul Peeters (lector Academie voor Toerisme, Breda university of applied sciences),
ir. Joris Melkert BBA (docent luchtvaarttechniek, Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft)

7 juni 2021

Inleidend

In het kader van haar kennisagenda 2021 heeft de vaste commissie voor Infrastructuur en Waterstaat van de Tweede Kamer verzocht om een actualisering van de wetenschappelijke factsheet uit 2018 (Peeters & Melkert, 2018) over de actuele ontwikkelingen en prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart.

Centrale vraagstelling

Het oorspronkelijke factsheet beoogde een actueel inzicht in de stand van zaken en de prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart (klimaat, luchtkwaliteit en geluid) te bieden. Daarbij wilde de Kamer zowel inzicht hebben in (de verwachte) technische mogelijkheden voor duurzame vliegtuigen (bijvoorbeeld op gebied van motoren, brandstoffen en aerodynamica) en de bijbehorende milieu-impact, als in bedrijfseconomische aspecten en de verwachte tijdsduur waarin deze technische mogelijkheden breed kunnen zijn ingevoerd. Vanwege de veelal nog onvolledige definitie van de te verwachten toekomstige technologische ontwikkelingen en de grote spreiding in de vakliteratuur als het over kosten en baten gaat, geven we voornamelijk enkele (veelal kwalitatieve) indicaties voor mogelijke kosten en nemen liever geen verantwoordelijkheid voor bedrijfseconomische uitspraken. Deze laatste hangen ook in sterke mate af van flankerend beleid. In de voorliggende actualisatie hebben we de snelle ontwikkelingen op het gebied van inzichten in mogelijke oplossingen verwerkt. Daardoor is wat duidelijker geworden waar de prioriteiten gelegd zouden moeten worden.

Hoofdboodschappen

1. Bij een ongewijzigd trendscenario zal de luchtvaart ergens tussen 2070 en 2100 alle emissies die volgens de doelstelling van het Parijse klimaatakkoord nog mogelijk zijn opsouperen. Daarna zijn dan negatieve emissies nodig.
2. Internationale maatregelen zijn vooralsnog onvoldoende ambitieus en effectief om luchtvaart-emissies wereldwijd binnen de Parijse doelstelling te kunnen houden.
3. Wat betreft geluid blijkt dat technologie de ontwikkeling van het aantal vliegbewegingen op Schiphol weet te compenseren, maar dat de ervaren hinder de afgelopen paar jaar toegenomen lijkt te zijn en dat bijvoorbeeld stiltegebieden onder mogelijk zwaar druk staan door vliegtuigeluid. Wat betreft luchtkwaliteit blijkt uit zowel Nederlands als internationaal onderzoek vooral ultrafijnstof een potentieel groot probleem voor de volksgezondheid op te leveren.
4. Alhoewel vliegtuigen continu beter worden, worden er geen technische verbeteringen voorzien die het klimaatprobleem tijds op kunnen lossen.
5. Luchtvaart kan mogelijk wel wereldwijd binnen de Parijse doelemissiepaden blijven op basis van een zwaar pakket aan maatregelen bestaande uit verminderde groei, alle beschikbare technologie, de planmatige invoering van synthetische e-fuels en integratie van luchtvaart in alle lange-afstandsmobiliteit.
6. Afgezet tegen de wereldbevolking vliegt de Nederlander significant meer dan de gemiddelde wereldburger.

7. Er is geen eenvoudige manier om de luchtvaart duurzaam te maken; één ‘silver bullet’ ontbreekt. Dat neemt niet weg dat een consistente aanpak nodig is, waarbij voor het klimaatprobleem zowel de ontwikkeling van e-fuels als die van nul-emissies vliegtuigen nu voortvarend ter hand genomen moeten worden en waarbij tot 2050 het grootste effect met de e-fuels wordt bereikt, maar daarna in toenemende mate van die nieuwe vliegtuigen. Maatregelen kunnen zijn:
- Significant meer onderzoek en ontwikkeling
 - Het sneller vervangen van oude vliegtuigen door schonere en stillere vliegtuigen is vooral effectief voor geluid en luchtkwaliteit.
 - Betere operationele procedures (inclusief herindeling luchtruim en invoering Single European Sky)
 - Significante ontwikkeling van en investeringen in alternatieve “drop in” brandstoffen, met name e-fuels.
 - Voor de korte tot middellange termijn is verdere toetreding – naast ETS voor EU luchtvaart - van luchtvaart tot gesloten emissiehandelssystemen effectief.
 - Sterkere stimulansen om duurzamer te worden, zowel in de vorm van nieuwe wetgeving als belastingen en maatschappelijke druk
 - Afhankelijk van het gehele maatregelenpakket, de groei van de wereldwijde luchtvaart sterk afremmen of tot stilstand brengen.

1. Inleiding

In 2018 openden we het factsheet (Peeters & Melkert, 2018) met de woorden “Wereldwijd is sprake van aanhoudende groei van de luchtvaart”. Vanaf begin 2020 lijkt dat perspectief sterk gekanteld te zijn. Voor de luchtvaart zijn de jaren 2020 en 2021 zeer moeilijk vanwege de vele reisbeperkingen als gevolg van de Corona-pandemie. Toch verwacht McKinsey dat herstel van de luchtvaart wereldwijd naar het niveau van 2019 ergens rond 2024 zal gebeuren (Bouwer, Saxon, & Wittkamp, 2021). Daarna is voortgaande groei waarschijnlijk. Redenen hiervoor zijn de grote inzet van overheden om de sector door de crisis te leiden, het gegeven dat de wereldluchtvloot een enorm kapitaal vertegenwoordigt wat een grote druk op gebruik ervan zet en het gegeven dat de reislust van mensen niet verminderd lijkt te zijn. Bouwer et al. (2021) verwachten dat dit herstel het snelst in de vakantiesector op zal treden en het laatst in de zakelijke markt.

De Luchtvaartnota gaat uit van gematigde groei van het aantal vluchten van en naar Nederlandse luchthavens, dat de jaren vóór 2020 een groei liet zien die vergelijkbaar was met de rest van de wereld. Groei veroorzaakt een steeds groter spanningsveld met duurzaamheid. Bij Schiphol bereikte de groei in 2019 de grens van de afgesproken capaciteit van 500.000 vliegbewegingen (starts + landingen) per jaar. Op middellange termijn vergt voortgaande groei van Schiphol grote infrastructurele investeringen en een forse aanpassing van de indeling van het Nederlandse luchtruim. Al was het alleen maar voor de handhaving van het huidige veiligheidsniveau. De groei van de luchtvaart staat tegelijkertijd op gespannen voet met de opgave voor het tegengaan van klimaatverandering die in het klimaatakkoord van Parijs is afgesproken.

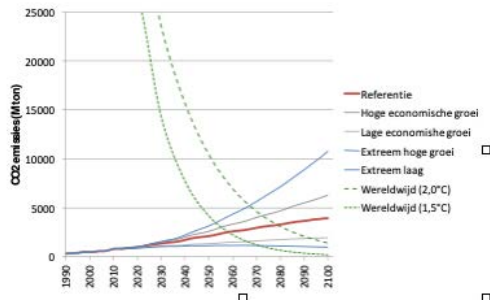
Wereldwijd waren er in 2019 in totaal 81 miljoen vliegtuigbewegingen in de commerciële luchtvaart en werden ongeveer 4,5 miljard passagiers vervoerd (IATA, 2020). In Nederland waren dat volgens het CBS 552 duizend vliegtuigbewegingen voor handelsverkeer en 81,1 miljoen passagiers. Dat is 0,68% van het wereldtotaal in vliegtuigbewegingen en 1,80% van het aantal passagiers wereldwijd. Afgezet tegen de wereldbevolking trekken de Nederlandse luchthavens daarmee significant meer passagiers dan in de gemiddelde wereld.

Duurzaamheidsproblemen van de luchtvaart

Klimaatverandering

Wereldwijd draagt luchtvaart 2,5% bij aan CO₂ emissies en gemiddeld 3,5% aan klimaatverandering (Lee et al., 2020). Meer dan in het heden, ligt de klimaatproblematiek van de luchtvaart in de toekomst zoals Figuur 1 duidelijk laat zien. Zowel in hoge als lage groeiscenario's voor wereldeconomie en – bevolking overschrijdt de luchtvaart de doelemissies uit het Parijse klimaatakkoord ergens tussen het

jaar 2070 en 2090, wat betekent dat daardoor de doelen van het Parijse akkoord onhaalbaar worden (Peeters, 2017). Een probleem bij klimaatverandering is dat de veroorzaker (emissies van broeikasgassen) geen directe relatie heeft met de klimaatverandering zelf (toename van de temperatuur). Die laatste is alleen direct gerelateerd aan de totale hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer. Wanneer dus de emissies met 10% omlaag gaan, dan vertraagt dat het tempo van klimaatverandering met ongeveer 10%, maar het klimaat blijft veranderen. De Parijse doelstellingen vergen dat uiteindelijk de broeikasgasemissies netto nul worden ergens rond het jaar 2050.



Figuur 1: Ontwikkeling van de lange-termijn wereldwijde CO₂ emissies van luchtvaart en de in de twee Parijse doelscenario's afgesproken emissies voor alle sectoren samen. Bron: (Peeters, 2017).

Geluidhinder

In 2015 ondervonden 4,1 miljoen inwoners van de EU een geluidsbelasting van meer dan 55 dB L_{den} (dag, avond en nacht gewogen) als gevolg van de luchtvaart (EEA, 2018). In Nederland werden in 2016 zo'n 48.500 mensen door meer dan 55 dB L_{den} belast als gevolg van de luchthaven Schiphol (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Voor inwoners rondom de 45 grootste luchthavens in de EU schommelt dit aantal tussen de 2,5 en 2,6 miljoen tussen 2005 en 2015. Bij een geringe technologische ontwikkeling en hoge groei loopt dat in 2035 op tot 3,4 miljoen, maar bij sterke technologische ontwikkeling en hoge groei neemt het af naar 2,3 miljoen en bij lage groei en sterke technologische ontwikkeling naar 1,6 miljoen (EEA, 2018). Op basis van nog lopend onderzoek bij de TU Delft lijkt het erop dat in Nederland de geluidsemissie rond Schiphol het afgelopen decennium inderdaad zijn gedaald, terwijl het aantal vliegbewegingen tot twee jaar geleden gelijk is gebleven en alleen de afgelopen jaren is toegenomen. Dat is in lijn met de Europese bevindingen. Het is de verwachting dat na de zomer de eerste resultaten van het onderzoek van TU Delft beschikbaar zullen komen.

Een meestal weinig belicht aspect van vliegtuiggeluid vormt de invloed op de geluidsbeleving van gebieden zoals stiltegebieden. Uit een recente studie in opdracht van de provincie Noord-Holland (Natuur en Milieufederatie Noord-Holland, 2017), blijkt dat van de 41 stiltegebieden die de provincie rijk is, er 26 niet langer aan de voorwaarden voor het predicaat stiltegebied voldoen als gevolg van vliegverkeer. Daarvan zijn er zeven die ook door industrielawaai en/of wegverkeerslawaai die status zouden kunnen verliezen, maar dus 19 exclusief door vliegtuiggeluid. Ook is er weinig aandacht voor de gemeten relatie tussen de kwaliteit van recreatiegebieden en luchtvaartgeluid zoals bijvoorbeeld beschreven in (Rapoza, Sudderth, & Lewis, 2015). Uit een recente studie naar de geluidsgevolgen van Maastricht-Aachen Airport op recreatie- en toerisme in het Heuvelland (Peeters, Eijgelaar, Neelis, & Adrichem, 2020) bleek dat het uitbreiden van het aantal vluchten van de huidige circa 6.000 naar de vergunde 19.000 kan leiden tot jaarlijks tussen €23 en €70 miljoen directe schade aan de toerisme economie van het Heuvelland. Ook zullen de grote natuur- en stiltegebieden niet langer binnen de voor dergelijke gebieden geldende geluidsnormen blijven en de facto verloren gaan.

Tenslotte is het goed om te bedenken dat de geluidsdruk gemeten in dB niet zo'n eenduidig verband heeft met de ervaren hinder. Zo vinden Breugelmans, Houthuijs, and van Poll (2016) dat het percentage van de bevolking dat ernstige hinder ervaart bij 55 dB L_{den} voor de diverse luchthavens in Nederland varieert van 25% (Schiphol ondergrens) tot 75% (Eindhoven in 2014). Ook blijkt daaruit dat ver onder de wettelijke limieten ook ernstige hinder wordt gerapporteerd: 2-10% bij 40 dB L_{den}, de limiet voor stiltegebieden. Voor bezoekers van gebieden blijkt de gevoeligheid bij lage geluidsdruk veel hoger dan voor bewoners, maar bij hoge geluidsdruk juist lager. Dat laatste is hoogst waarschijnlijk het gevolg van het feit dat bezoekers die geluid als hinderlijk ervaren (Peeters et al., 2020), lawaaiige gebieden

mijden, terwijl voor bewoners die mogelijkheid niet zo makkelijk is. Een van de mogelijke verklaringen hiervoor is dat de ervaren hinder onder andere gekoppeld is aan het piekniveau van het geluid. Door het toepassen van normen uitgedrukt in L_{den} wordt over een langere tijd het geluidsniveau gemiddeld en lijkt daarom lager te zijn.

Luchtkwaliteit

Emissies van vliegtuigen naar de lucht, met name die van stikstofdioxide en deeltjes, hebben een significante invloed op de gezondheid van de Europese bevolking: ongeveer 3700 mensen overleden hierdoor gemiddeld 11 jaar eerder; de externe kosten daarvan beliepen ongeveer 8 miljard Euro (EEA, 2018). Dit is berekend zonder naar de onverwacht hoge emissies van ultrafijnstof door vliegtuigmotoren te kijken (Alonso et al., 2018). Alonso et al. (2018) merken tegelijk op dat de maatregelen om NOx emissies tegen te gaan ook deze ultrafijnstof emissies lijken te reduceren. Dat Schiphol een invloed heeft op de fijnstofconcentraties in de wijde omgeving bleek uit een studie van Keuken et al. (2014), die aantoonde dat deze concentratie – gemeten in het Amsterdamse bos - ongeveer drie keer zo hoog waren op dagen met wind vanuit Schiphol vergeleken met andere dagen. Het is nog niet bekend in welke mate vliegtuigen aan deze verhoogde concentratie bijdragen. Nader onderzoek naar deze kwestie loopt nog enkele jaren (RIVM, 2017). In de loop van 2021 worden de resultaten verwacht. Uit internationaal onderzoek blijkt echter al duidelijk dat de concentraties van ultrafijnstof met een factor 3-5 hoger kunnen liggen onder de aanvliegroutes van vliegtuigen vergeleken met gebieden die niet onder zo'n aanvliegroute liggen maar een vergelijkbare verkeerssituatie op de grond kennen (Riley et al., 2016). Onze conclusie uit een en ander is dat vliegtuigen potentieel een forse invloed op de emissies van fijnstof en de luchtkwaliteit en gezondheid van mensen kunnen hebben.

Luchtvaart en COVID-19

De COVID-19 crisis heeft grote gevolgen gehad voor de omvang van de luchtvaartsector en daardoor in 2020 forse vermindering van CO₂-emissies en geluidhinder veroorzaakt. Voor de vijf Nederlandse luchthavens van nationaal belang (Schiphol, Eindhoven, Rotterdam-The Hague, Maastricht-Aachen en Groningen) samen was er over 2020 een verlies van 55% van het aantal vluchten, 71% van het aantal passagiers en 6% van de hoeveelheid vracht. Alleen Maastricht-Aachen Airport noteerde een groei van 22% voor het vrachtvervoer, maar tegelijk een min van 81% voor passagiers en 19% voor alle vluchten.

Behalve het grote effect op de economie van de sector, met in 2020 wereldwijd \$419 miljard verlies aan omzet waarvan \$159 miljard (38%) door overheden gedekt (Abate, Christidis, & Purwanto, 2020), nam ook wereldwijd in de eerste zeven maanden van 2020 de CO₂-emissie met 36% binnenlands en 52% internationaal af, een besparing van in totaal 200 Mton CO₂ (Syed & Ullah, 2021). Het ondersteunen van de luchtvaart heeft als geïsoleerde maatregel het laagste effect op de economie en het grootste negatieve effect op het klimaat (Hepburn, O'Callaghan, Stern, Stiglitz, & Zenghelis, 2020) van de 25 sectoren die de studie beschrijft. Voor Nederland geldt dat er in totaal €1,2 miljard directe lening van de staat is verstrekt, en 2,4 miljard door banken onder 90% garantie van de staat. Milieuvorwaarden zijn onder andere een vermindering van het aantal nachtvluchten van 32.000 naar 25.000, vermindering van de CO₂-uitstoot met 50% per passagierskilometer in 2030 en vanaf 2030 14 % bijmengen van duurzame brandstof, zaken die overigens allemaal al vastgelegd waren in de Luchtvaartnota.

Dit heeft een aantal consequenties. Ten eerste zullen ontwikkelingen richting meer duurzame luchtvaart nu trager gaan omdat er minder geld beschikbaar is in de sector. Ten tweede zullen we ons beter moeten voorbereiden op een mogelijke nieuwe pandemie. De luchtvaart is ook een vector van het virus. Door haar hoge snelheid en grote vliegbereik, speelt luchtvaart een rol bij het verspreiden van nieuwe ziekteverwekkers en kansen op nieuwe epidemieën en potentiële pandemieën (IPBES, 2020; y Piontti, Perra, Rossi, Samay, & Vespignani, 2019). Daarbij gaat het niet alleen om de besmettingskans aan boord, die zonder maatregelen zoals het dragen van mondkapjes, fors kan zijn (Wang, Galea, Grandison, Ewer, & Jia, 2021), maar ook om het verspreiden van het virus via dragers van het virus aan boord.

Daar waar een dergelijke verspreiding in het pre-luchtvaarttijdperk er maanden of zelfs jaren over deed is er nu sprake van weken of zelfs dagen voordat de andere kant van de wereld is bereikt. Het stil leggen van luchtverbindingen is te traag op gang gekomen. Dat moet in de toekomst anders. Het verdient daarom aanbeveling te pleiten voor een internationaal reservefonds dat meteen luchthavens en

luchtvaartmaatschappijen ondersteunt op het moment dat er ergens een virus opduikt en het luchtverkeer stil gelegd wordt. Dit fonds zou een wereldwijd fonds moeten zijn dat gevoed kan worden uit een kleine opslag in de ticketprijzen. Hiermee wordt het argument van een mogelijke economische schade bij het stil leggen van een luchtverbinding meteen ondervangen.

2 Inleiding technologische ontwikkelingen

Historisch perspectief

Als je de ontwikkelingen in de luchtvaart bekijkt sinds de invoering van de straalmotor medio jaren 50 dan zijn die ronduit spectaculair. Zowel het brandstofverbruik als de geluidsproductie per passagiers-kilometer zijn substantieel gedaald. Figuur 2 in paragraaf 4.1 geeft de ontwikkeling van de benodigde energie (=brandstofverbruik) voor het vervoeren van één stoel over een afstand van één kilometer. Het brandstofverbruik is één op één gekoppeld aan de uitstoot van CO₂. Als men rekent aan de uitstoot van CO₂ van het vervoer van passagiers per vliegtuig en het vervoer per auto en daarbij de gemiddelde bezettingsgraad voor lange afstanden in ogenschouw neemt dan zijn vliegtuigen per afgelegde kilometer inmiddels niet veel minder zuinig als de gemiddelde auto. Het grote verschil tussen auto's en vliegtuigen is echter dat mensen met vliegtuigen, door de hoge snelheid, veel grotere afstanden afleggen, waardoor de emissies per reis voor de gemiddelde autovakantie 56 kg CO₂ veroorzaakt en de gemiddelde vliegvakantie 820 kg (Eijgelaar, Peeters, de Bruijn, & Dirven, 2016).

Wat betreft geluid zijn de vliegtuigen in de loop van de tijd ook significant stiller geworden. Sinds de introductie van de straalmotor zijn vliegtuigen ongeveer 25 dB stiller geworden. De gebruikte decibelschaal is een logaritmische schaal. Dat betekent dat elke vermindering van 3 dB een steeds weer een halvering van het geluid betekent.

Ook nu nog is elke nieuwe generatie vliegtuigen weer in de orde van 3 dB stiller dan de vorige generatie. Bijvoorbeeld zien we dat de nieuwe A320NEO-vliegtuigen ongeveer 4 dB stiller zijn dan oudere generaties A320 vliegtuigen. Dat zien we in de praktijk ook terug op Schiphol. Door voortdurende vlootvernieuwing neemt de netto geluidsproductie nog steeds af.

Fabrikanten

Het aantal vliegtuigfabrikanten is de afgelopen decennia drastisch gereduceerd. Voor grote passagiersvliegtuigen (>100 passagiers) zijn alleen Boeing en Airbus overgebleven. De orderportefeuilles van beiden zijn voor ongeveer de komende zeven jaar gevuld. Het portfolio van vliegtuigen dat wordt aangeboden is voor beiden ruwweg vergelijkbaar.

De ontwikkeling van een nieuw verkeersvliegtuig vergt grote investeringen (>10 miljard euro) en een doorlooptijd van ongeveer 10 jaar vanaf het moment dat de beslissing tot ontwikkeling genomen wordt tot het moment dat de eerste vliegtuigen uitgeleverd worden. De doorlooptijd en kosten zijn hoog vanwege de complexe technologie en de vereiste veiligheidsniveau's. Immers alleen als volledig is aangetoond dat een nieuw type vliegtuig voldoende veilig is wordt door de luchtwaardigheidsautoriteiten een bewijs van luchtwaardigheid verstrekt.

Beide fabrikanten hebben de afgelopen jaren een aantal nieuwe modellen op de markt gebracht (Boeing 737MAX en 787 en Airbus A320NEO en A350) of zijn in de afrondende fase van een nieuwe ontwikkeling (Boeing 777X). Op dit moment zijn er geen plannen voor grote nieuwe ontwikkelingen, behalve mogelijk een middellange afstandsvliegtuig van Boeing (MoM, Middle-of-Market). De problemen die in 2018 en 2019 opdoken bij de Boeing 737MAX zullen ook nog jaren effecten hebben op de beschikbare investeringsbudgetten bij Boeing. Omdat dergelijke problemen bij Airbus niet spelen, zien we dit bedrijf wel stappen maken in nul-CO₂-emissie vliegtuigontwikkeling bijvoorbeeld hun ZEROe-programma (Airbus, 2021).

Voor de wat kleinere vliegtuigen (orde van grootte 100 passagiers) zijn er ook maar twee grote fabrikanten over gebleven, Embraer en Bombardier. Inmiddels is de productie van de vliegtuigen in van Bombardier in dit segment overgenomen door Airbus (Airbus A220). Ook zij hebben een goed gevulde orderportefeuille en zijn er geen grote ontwikkelingen gaande. In China wordt gewerkt aan

een tegenhanger van de Airbus A320 en de Boeing 737. Deze COMAC C919 heeft in 2017 zijn eerste vlucht uitgevoerd maar is voorlopig nog niet commercieel leverbaar omdat het certificatieproces nog niet is afgerond. Ook dit type vliegtuig is bij lange na geen nul-CO₂-emissie vliegtuig.

Luchtvaartmaatschappijen

De catalogusprijs van de meest populaire vliegtuigen, Boeing 737 en Airbus A320, ligt in de orde van 100 miljoen euro per stuk. Daarbij gaan vliegtuigen ook geruime tijd mee. De technische levensduur ligt in de orde van 25 tot soms wel 45 jaar. De economische levensduur is gemiddeld genomen wat minder. De beslissing tot aankoop van nieuwe vliegtuigen is daarom een beslissing die zeer zorgvuldig wordt genomen. Het is daarom ook niet eenvoudig en relatief duur elk jaar de nieuwste vliegtuigen te kunnen kopen.

In de afgelopen decennia hebben we de opkomst van de low-cost carriers gezien. Dat heeft tot gevolg gehad dat de ticketprijzen sterk zijn gedaald, zeker in de perceptie van het publiek. Als gevolg daarvan is de financiële marge op de verkoop van een ticket erg klein geworden. Wereldwijd was de gemiddelde winst in 2019 op de verkoop van een ticket minder dan 10 dollar. Het gevolg hiervan is dat regelmatig luchtvaartmaatschappijen failliet gaan en de druk op de kosten erg hoog is. Dat uit zich onder andere door langdurige onderhandelingen over de CAO's.

De consequentie van dit alles is dat de marge om snel in te spelen op technologische ontwikkelingen erg klein is. Zo zijn bijvoorbeeld alternatieve brandstoffen vaak veel duurder dan de standaard gebruikte kerosine. Het is voor één enkele luchtvaartmaatschappij daarom ook niet betaalbaar om een overstap te maken. Pas wanneer geleidelijk collectief wordt overgegaan op een dergelijke dure brandstof dan kunnen luchtvaartmaatschappijen zich goed aanpassen zoals de meeste dat ook doen na grote olieprijschokken. Collectief hoeft er dus geen economische belemmering te zijn maar lokale aanpassingen zijn economisch gezien problematisch voor luchtvaartmaatschappijen omdat zij met de rest van de wereld moeten concurreren.

3. Bestaand beleid (juridische aspecten)

De ICAO ontwikkelt internationaal regelgeving voor de veiligheid en de milieuprestaties van vliegtuigen. Deze zijn in normen vastgesteld en elk vliegtuig en/of motor-type dient te worden gecertificeerd en daarbij aan te tonen binnen deze normen te blijven. Deze gegevens zijn openbaar beschikbaar voor alle gecertificeerde vliegtuigen. Aan de certificatieprocedure voor milieunormen worden dezelfde hoge eisen gesteld als voor vliegveiligheid. De werkwijze van ICAO is dat via CAEP (Civil Aviation Environmental Project) drie werkgroepen normen op stellen voor geluid (WG-1), motoremissies (WG-2) en CO₂ uitstoot (WG-3). Dit gebeurt in samenwerking tussen industrie, overheden, luchtvaartbelangenorganisaties en maatschappelijke organisaties (met name ICSA, International Coalition for Sustainable Aviation). Het niveau van de norm wordt steeds zodanig gekozen dat deze het meest kosteneffectief is: de grootste vermindering van milieubelasting per vliegtuig of motor per € kosten voor de industrie. Een andere ICAO-voorwaarde is dat de norm niet *'technology forcing'* is, oftewel niet een bepaalde nieuwe technologie voor alle fabrikanten afdwingt.

Deze normen worden elke 5 tot 10 jaar aangescherpt, afhankelijk, van de technologische vooruitgang. Individuele landen, voor Nederland via de Europese luchtwaardigheidsautoriteit EASA, nemen deze regels over en kunnen ze tot op zekere hoogte aanscherpen. De nieuwste ronde aanscherpingen van geluid en motoremissies en de introductie van een PM norm (Particulate Matter = deeltjes) en een CO₂ norm voor de EU worden beschreven door EASA (2017).

Een additionele regelgeving is opgesteld in het kader van Climate Neutral Growth (CNG). CNG wil zeggen dat de internationale luchtvaart haar CO₂-emissies na 2020 niet meer laat groeien, ondanks een voortgaande groei van het volume van luchtvaart. Dat is geen ambitieuze doelstelling vergeleken met de reductiedoelstellingen afgesproken in Parijs. De ICAO-maatregelen bestaat eruit dat luchtvaartmaatschappijen vanaf ongeveer 2023 vrijwillig en vanaf 2028 verplicht de totale emissies niet meer zullen laten groeien. Dit kan o.a. door de inzet van schonere vliegtuigen. Als dit niet lukt door de inzet van betere vliegtuigen dan zullen de extra CO₂-emissies boven het gemiddelde niveau van 2019

en 2020 moeten worden gecompenseerd via de vrije markt van *Certified Emission Reductions (CERs)*. Door de snelle groei van de luchtvaart is de vloot gemiddeld relatief nieuw (wereldwijd circa 10 jaar oud) en is het aandeel zeer oude vliegtuigen gering en zal het weghalen daarvan meer symbolische dan werkelijke effecten op de CO₂-emissies hebben, maar mogelijk wel significant zijn voor geluid en luchtkwaliteit. De COVID-19 crisis zou betekenen dat de referentie gebaseerd op 2019-2020 de hoeveelheid te compenseren CO₂ sterk zou vergroten totdat de sector weer op het niveau van 2019 is aangeland. Daarom heeft ICAO besloten om de referentie te beperken tot het jaar 2019 (ICAO, 2021). Het gevolg daarvan is dat CORSIA geen enkel effect meer heeft totdat in circa 2025 de emissies het niveau van 2019 gaan overschrijden. Daar komt nog bij dat het middel van CORSIA, compensatie op de vrije markt, in 85% van de certificaten aantoonbaar slecht functioneert (Cames et al., 2016) en vergeleken met een emissiehandel systeem als het Europese ETS een gering effect zal hebben (Maertens, Grimme, Scheelhaase, & Jung, 2019).

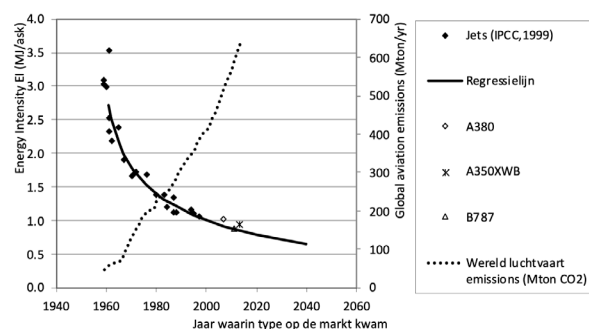
Om een bewijs van luchtwaardigheid te krijgen moeten vliegtuigen niet alleen voldoen aan technische eisen maar moet ook het geproduceerde geluid beneden een bepaald vastgelegd niveau blijven. Hiervoor is internationale regelgeving vastgelegd door de ICAO. Afhankelijk van het jaar van certificatie moet een vliegtuig aan steeds strengere eisen voldoen. Deze worden weergegeven door zogenaamde "chapters" of "stages". Oudere vliegtuigen, zoals chapter 2 vliegtuigen, worden sinds 2002 al niet meer toegelaten. Voor nieuwe vliegtuigen die sinds 2006 gecertificeerd worden is de minimumeis nu chapter 4. In 2014 is in ICAO verband ook al een nieuwe norm afgesproken, Chapter 14. Die norm zal leidend worden voor de komende jaren. Het toegestane geluidsniveau is een functie van de massa van het vliegtuig. Een zwaarder vliegtuig mag meer geluid produceren dan een lichter vliegtuig.

Naast het gebruiken van modernere en dus stillere vliegtuigen is er ook winst te behalen met het uitvoeren van geluidsarme procedures. Voor de nadering en landing zijn zogenaamde *Continuous Descent Approaches (CDA)* de aangewezen weg om geluid te reduceren. Dat betekent dat vanaf het moment dat de kruishoogte wordt verlaten het vliegtuig een continue daalvlucht uitvoert. Het voordeel is dat de motoren op een laag vermogen draaien en daardoor zeer weinig geluid produceren. Er hoeft dan geen gas bijgegeven te worden om een stukje horizontaal te vliegen. Het uitvoeren van dergelijke naderingen vergt voldoende ruimte in het luchtruim. Tijdens piekuren is die ruimte vaak niet aanwezig en is de verkeersleiding gedwongen vliegtuigen toch stukken horizontaal te laten vliegen.

Tijdens de start zijn er ook verschillende mogelijkheden. Men kan een vliegtuig na de start gelijk door laten klimmen naar kruishoogte. Een andere optie is een vliegtuig na de initiële klim een stuk horizontaal te laten vliegen waarbij de snelheid toeneemt. In het eerste geval is men sneller op hoogte maar is de voorwaartse snelheid wat beperkter. Dat betekent dat de geluidsbelasting langer op een kleiner oppervlak wordt geconcentreerd. Bij de tweede optie is de hoeveelheid geluid wat hoger maar is de tijdsduur wat korter. Over het algemeen wordt de tweede methode als wat minder hinderlijk ervaren door de omwonenden. Het uitvoeren van deze procedures is ook weer afhankelijk van de beschikbare ruimte in de lucht.

4. Verduurzaming luchtvaart

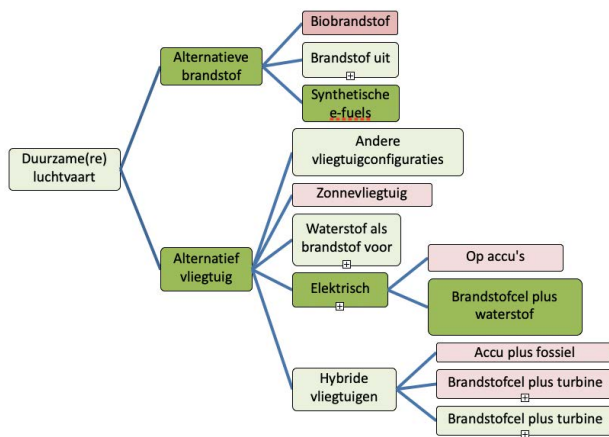
Evolutionaire Techniek



Figuur 2: Ontwikkeling van de brandstofefficiëntie van vliegtuigtypen in het verleden en met een projectie voor de toekomst (Peeters & Middel, 2007). De totale emissies zijn gebaseerd op Peeters (2017)

Elke generatie vliegtuigen is gemiddeld genomen 15-20% beter dan de voorgaande generatie. Ook nu nog worden vliegtuigen op het niveau van de wereldwijde vloot gemiddeld 1-1,5% per jaar beter in de zin van brandstofverbruik en dus emissies per afgelegde stoel-km. Het grote probleem is dat dit echter niet genoeg is, zoals Figuur 2 duidelijk illustreert. Dat komt door snelle groei van de luchtvaart met 4-5% per jaar. Een groei van 5% per jaar betekent een verdubbeling elke 15 jaar. Lange-termijn scenario's laten zien dat deze groei zou kunnen afnemen, maar halverwege deze eeuw is sprake van bijna een verdrievoudiging ten opzichte van 2015 en aan het eind een vertienvoudiging (Bows-Larkin, Mander, Traut, Anderson, & Wood, 2016; Peeters, 2017). De huidige crisis remt dit nu maar de verwachting is dat de wereldwijde luchtvaart binnen een termijn van enkele jaren het groeipad weer zal oppakken. Begripsontwarring

In de publieke discussie over verduurzaming van de luchtvaart constateren we dat er een grote begripsverwarring is ontstaan. Men heeft het met name over 'elektrisch vliegen' en 'alternatieve brandstoffen', maar beide begrippen zijn betekenisloos zonder naar de details te kijken van hoe men de elektriciteit aan boord wil krijgen of welke alternatieve brandstof men het over heeft. Daardoor kunnen de uitspraken 'we gaan in de toekomst elektrisch vliegen' en 'duurzame brandstoffen lossen het klimaatprobleem op' beiden zowel waar als onwaar zijn. Om de begrippen zinvol te maken moeten we meer details toevoegen. Het schema in Figuur 3 geeft dit aan.



Figuur 3 Mogelijke ontwikkelingen richting een duurzame luchtvaart

Duidelijk mag zijn dat met de term 'alternatieve brandstoffen' zeer verschillende technologieën bedoeld worden, die bovendien, zoals we hieronder zullen laten zien, zeer verschillende mogelijkheden en uitdagingen hebben. Hetzelfde geldt voor 'elektrisch vliegen'. Het is daarom van belang om steeds onderscheid te maken in wat precies bedoeld wordt.

In de bovenstaande opties speelt groene waterstof in vrijwel alle gevallen een sleutelrol. Bij de meeste productieprocessen van biobrandstoffen en brandstoffen op basis van afval is groene waterstof een onmisbare grondstof. Ook bij de productie van de synthetische e-fuels is veel waterstof nodig. Uiteraard moet groene waterstof beschikbaar komen op luchthavens wanneer we met brandstofcelvliegtuigen of waterstofvliegtuigen gaan vliegen. Om tot volledige zero-emissies te komen donkergroen gekleurde vakjes essentieel. De lichtrood gekleurde vakjes zullen een zeer kleine bijdrage kunnen leveren, terwijl de lichtgroene een vooral tijdelijke bijdrage zouden kunnen leveren. In de volgende paragrafen laten we dit in meer detail zien.

Revolutionaire techniek

Andere configuratie van vliegtuigen

Sinds de introductie van het verkeersvliegtuig wordt er gevlogen met een configuratie die nagenoeg ongewijzigd is. Deze configuratie bestaat uit een cilindervormige romp waar in de passagiers en de bemanning plaats nemen. Aan deze romp worden twee vleugels bevestigd die de benodigde draagkracht leveren en ook dienen als opslagplaats voor de brandstof. Aan de romp of aan de vleugels worden twee of meer motoren geplaatst. Tenslotte zorgt de combinatie van het horizontaal en verticaal staartvlak voor de benodigde stabiliteit en besturing van het vliegtuig.

Deze zogenaamde “*tube and wings*” configuratie is in de loop der jaren heel erg ver geoptimaliseerd en voldoet zeer goed. Er wordt echter ook al heel veel jaren nagedacht over andere configuraties. Een veel bestudeerd alternatief is de zogenaamde “*blended wing body*” configuratie. Daarbij vloeien de romp en de vleugels in elkaar over. Deze configuratie lijkt sterk op een vliegende vleugel. Er zijn voordelen aan te wijzen voor een dergelijke configuratie. Er zijn echter ook nog heel veel technische uitdagingen die moeten worden overwonnen die ervoor zorgen dat deze configuratie geen oplossing biedt voor de korte termijn.

Zonnevliegtuigen

Het idee dat de grote luchtvaart ooit op zonne-energie zal vliegen die via zonnecellen op de vleugels wordt opgewekt kan naar het rijk der fabelen worden verwezen op grond van het feit dat de energie die een verkeersvliegtuig nodig heeft om te vliegen, uitgedrukt in een energiedichtheid van een vliegtuig per m² vleugel circa 1000 keer zo hoog is als de zon maximaal kan leveren. Daarnaast is er nog een reeks van andere praktische en economische bezwaren die dit technisch en economisch onhaalbaar maken. Het gebrek aan energiedichtheid van de zon kan niet met techniek worden opgelost, omdat zonnecellen al 30% of meer van de zonne-energie omzetten in elektriciteit en er bij een praktisch nooit haalbare 100% nog altijd een factor 300 te weinig energie beschikbaar komt voor het vliegtuig. Zie verder ook Peeters, Higham, Kutzner, Cohen, and Gössling (2016) over dergelijke ‘technologische mythes’.

Elektrisch vliegen op accu's

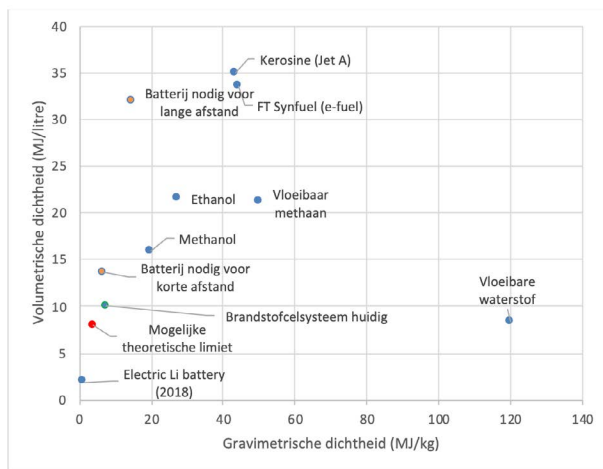
Elektrisch vliegen is een van de mogelijke alternatieven die wordt onderzocht en ook al op beperkte schaal wordt uitgevoerd. Het kritieke punt hierbij is de accu. Voor de luchtvaart spelen niet alleen de veiligheid en de kosten een rol maar zeer zeker ook de zogenaamde energiedichtheid. De energiedichtheid zegt hoeveel energie er kan worden opgeslagen in een kilo accu. Op dit moment kan er ongeveer 50 keer minder energie in een kilo accu worden opgeslagen dan in een kilo kerosine (zie Figuur 4). De verwachting is dat batterijen nog geruime tijd zullen verbeteren maar dat daar mogelijk een limiet op zit na een factor drie¹. Deze ontwikkelingen gaan langzaam, denk in termijn van enkele decennia. Wel is het zo dat de elektrische motor twee tot drie keer zo efficiënt is vergeleken met een turbinemotor en daardoor is ongeveer een derde van de energie in de batterij nodig vergeleken met de hoeveelheid die je in kerosine nodig hebt. Daar komt helaas weer bij dat het gewichtsvoordeel (en dus ook een voordeel in benodigde energie) dat een vliegtuig ervaart gedurende de vlucht door de verbranding van kerosine, niet geldt voor vliegtuigen met accu's. De accu's moeten de hele vlucht meegetorst worden. Het kost een significante hoeveelheid energie om deze massa accu's te vervoeren.

Om een korte-afstandsvliegtuig te maken, uitgaande van een halvering van de normale maximale range van zo'n 2000 km, is derhalve een accu nodig is die 7 keer meer energie per kg bevat dan de huidige generatie accu's; voor lange afstanden is dat zo'n 15 keer. Deze benodigde verbeteringen maken elektrisch vliegen voor de grote luchtvaart technisch gezien voorlopig onmogelijk. Figuur 5 laat zien dat een volledige vervanging van de vloot voor korte afstanden niet eerder dan 2080 is te voorzien en voor lange afstanden pas rond 2100.

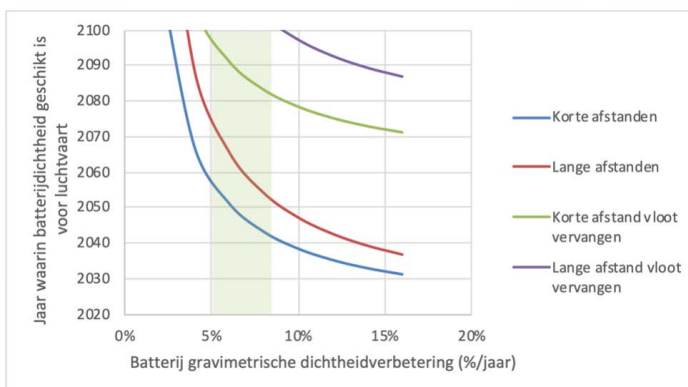
¹ Zie <https://www.quora.com/Is-it-true-that-battery-energy-density-improves-5-8-per-year-Does-this-represent-an-average-or-is-it-a-consistent-trend-each-year-Do-these-improvements-increase-the-cost-What-has-been-the-trend-if-any-regarding-energy-to-weight-ratio>.

Voor de kleine luchtvaart is elektrisch vliegen met accu's mogelijk wel een oplossing voor een emissie-vrije toekomst. Maar ook daarvoor is het belangrijk om aan te geven dat de ontwikkelingen van luchtvaart-gekwalificeerde accu's langzaam gaan. State of the art is op dit moment een tweepersoons elektrisch vliegtuig van de firma Pipistrel, de Velis Electro. Dit accu-elektrische vliegtuig heeft een effectief vliegbereik van slechts 68 km (Pipistrel, 2020) bij de meest zuinige manier van vliegen. Het is de verwachting dat dit bereik in de toekomst zal toenemen en dat ook het aantal zitplaatsen zal toenemen. Het is echter niet realistisch aan te nemen dat dit op korte termijn zal leiden tot vliegtuigen die op een acculading 500-1.000 km kunnen vliegen met 20 passagiers.

Elektrisch vliegen zal overigens niet stil zijn omdat de propeller van het vliegtuig een aanzienlijke hoeveelheid geluid zal blijven produceren.



Figuur 4: Overzicht van de energiedichtheid met betrekking tot gewicht en volume voor kerosine, alternatieve brandstoffen en batterijen, brandstofcelsysteem huidige technologie op diverse studies.



Figuur 5: implementatie van elektrisch vliegen als functie van het tempo waarin de dichtheid van batterijen groter wordt. Historische tempo varieerde tussen 5% en 8% per jaar (de groene band).

Elektrisch vliegen met waterstof en brandstofcel

Om in de grote luchtvaart elektrisch vliegen mogelijk te maken is een alternatief voor de accu nodig. Dat alternatief bestaat gelukkig: de brandstofcel. Dergelijke brandstofcellen maken van een brandstof rechtstreeks elektriciteit zonder verbranding. De meest voor de hand liggende optie is de brandstofcel op waterstof. Het idee kreeg al aandacht eind jaren negentig (Peeters, 2000; Snyder, 1998), maar is recent opnieuw sterk in de aandacht gekomen bij NASA (Snyder et al., 2009) en met een mooi voorbeeld van Nederlandse bodem (Delgado Gosálvez et al., 2018).

Hoewel in beide gevallen waterstof de energiebron is, zijn de verschillen tussen deze twee aanpakken zeer groot. Onderstaande tabel geeft de belangrijkste aan:

Kenmerk van het systeem	Waterstof verbranden in turbinemotoren	Waterstof met brandstofcellen en elektrische motoren
Energie-efficiëntie	0	+
Hoeveelheid waterstof benodigd	-	0
Ruimte energiesysteem	-	0
Gewicht energiesysteem	0	-
Niet-CO ₂ emissies	-	+
Operaties als huidige vliegtuig	+	-
Kruissnelheid	0	-
Maximale range	> 6000 km	>2000 km
Payload	> 200 passagiers	>100 passagiers

Het belangrijkste punt is dat de luchtvaart weliswaar nul-CO₂-emissies kan bereiken met e-fuels, maar alleen met een brandstofcellen systeem in staat zal zijn zero-emissies te halen (daar komt alleen vloeibaar water uit). Bovendien zal de energiebehoefte van het hele systeem (well-to-wing) voor e-fuels zeer aanzienlijk hoger zijn dan voor zo'n brandstofcel vliegtuig. Dus ons advies is om deze optie heel serieus te bestuderen en te ontwikkelen, ook al zijn er nog heel wat technische dingen om op te lossen. Eén daarvan is de relatieve traagheid van brandstofcellen om snel op vol vermogen te komen, waardoor bij de landing een doorstart niet mogelijk is. Het lijkt erop dat Airbus dit oplost met een additionele hybride oplossing (extra turbine motor die de waterstof kan verbranden voor noodgevallen). ZeroAvia met een batterij die genoeg elektriciteit bevat heeft (en door de brandstofcellen wordt bijgeladen) om een doorstart te kunnen maken op de elektrische motoren.

Huidige veelbelovende initiatieven zijn:

- Airbus ZEROe programma (Airbus, 2021): dit programma van Airbus is snel groeiend. In alle opties die Airbus bekijkt spelen brandstofcellen en waterstof een rol. Ook bestudeert het concern de mogelijkheid om elektromotoren sterk te koelen en superconductie te bereiken waarmee het hele voortstuwingssysteem 50% lichter kan worden gemaakt².
- ZeroAvia: 6-zitter die al een reeks vluchten heeft uitgevoerd. In dit vliegtuig zit weliswaar ook een batterij vanwege het snel kunnen opstarten van de energielevering in geval van een doorstart. Het plan is om in 2024 een eerste commercieel vliegtuig met 10-20 zitplaatsen aan te bieden. ZeroAvia ziet kansen om al in 2040 met 200 passagiers 8000 km te kunnen vliegen. Wij hebben de nodige bedenkingen bij deze voorspelling.

² <https://www.compositesworld.com/news/airbus-ascend-program-to-explore-liquid-hydrogen-and-superconductivity-for-zero-emission-aircraft>

- De Apus 2i³, een vliegtuigontwerp met vier zitplaatsen met een bereik van 800 km en een startgewicht van 1800 kg. Het vliegtuig is in de ontwerpfase. De ontwerpers claimen dat de gravimetrische dichtheid van het hele waterstof-brandstofcel systeem op 7,2 MJ/kg uitkomt en dat zit goed in de buurt van wat nodig is om in de grote luchtvaart vluchten binnen Europa mogelijk te maken.
- NLR experimenteert met een drone op waterstof plus brandstofcel: de HYDRA-1 en inmiddels ook de veel grotere HYDRA-2. De eerste drone heeft al gevlogen en weegt 8 kg. De grotere drone moet eind 2021 gaan vliegen.
- GKN Aerospaces bestaat in Nederland uit vier vestigingen van Fokker-onderdelen. GKN werkt zeer actief mee aan de ontwikkeling van grote vliegtuigen op brandstofcellen.
- TU Delft: een zeer gedetailleerde studie van een groep studenten (Delgado Gosálvez et al., 2018) heeft laten zien dat een 19-zitter die 1000 km kan vliegen technisch haalbaar is.

Het bovenstaande biedt grote kansen voor de Nederlandse industrie, zoals verder uitgewerkt in paragraaf 6. Overigens moet men bedenken dat de brandstofcel op dit moment de enige optie is die serieuze kansen biedt voor een efficiënte nul-emissies luchtvaart op de lange termijn. Daarom zullen de technische en economische uitdagingen aangegaan moeten worden om situaties met uit de hand gelopen klimaatverandering of een zeer sterk gekrompen luchtvaartsector te vermijden.

Waterstofvliegtuigen

Daarnaast is er ook toenemende belangstelling voor het gebruik van waterstof in turbine-motoren. Ook dat idee is verre van nieuw en al in de jaren 80 vlogen de Russen een omgebouwd passagiersvliegtuig op waterstof (zie ook (Brewer, 1991). Voor waterstof geldt dat het weliswaar aanzienlijk minder zwaar is, maar ook aanzienlijk meer ruimte nodig heeft. In een vliegtuig zijn gewicht en ruimte altijd erg schaars en daarom hebben dergelijke brandstoffen een grote impact op het vliegtuigontwerp en zeker ook de kosten en tijd gemoeid met het ontwikkelen van een vliegtuig op een dergelijke brandstof.

Waterstof is in die zin wel een apart geval. De energiedichtheid van waterstof is namelijk veel hoger dan die van kerosine (zie Figuur 4) voor gewicht (bij vloeibaar waterstof een factor 3) maar juist veel lager voor volume (bij vloeibaar waterstof een factor 4). Waterstof kan naar alle waarschijnlijkheid ook gebruikt worden in de huidige generatie motoren (Kivits, Charles, & Ryan, 2010), al zijn daarvoor wel aanpassing aan motoren nodig. Nadelen van waterstof zijn dat er erg veel volume nodig is om het op te slaan, dat het gekoeld of onder hoge druk bewaard moet worden en dat het licht ontvlambaar en explosief is.

Hybride vliegtuigen

Vaak worden 'hybride vliegtuigen' voorgesteld om de emissies naar nul te brengen. Helaas is dat in de meeste gevallen niet mogelijk, want hybride betekent in die gevallen een mix van bijvoorbeeld een batterij plus elektrische motor naast een volwaardige door fossiele energie gedreven voortstuwing. Deze dubbele motor en brandstof/energiesystemen hebben allereerst een enorm gewicht, ruimte- en kostennadeel, maar bovendien blijkt de batterij in de meeste gevallen slechts een paar procent van het totale energiegebruik te dekken en de reductie van de CO₂-emissie is navenant gering. Soms worden ook waterstof en batterijen of waterstof verbranden en in brandstofcellen gebruiken als hybride voorgesteld. Hoewel daar meer potentie in zit, de veel te zware batterij blijft weg en beide voortstuwingssystemen zijn zonder CO₂ emissies, blijf je zitten met veel extra complexiteit en kosten.

³ Zie <https://apus-aero.com/aeronautical-engineering/i-planes/i-2/>

Alternatieve brandstoffen

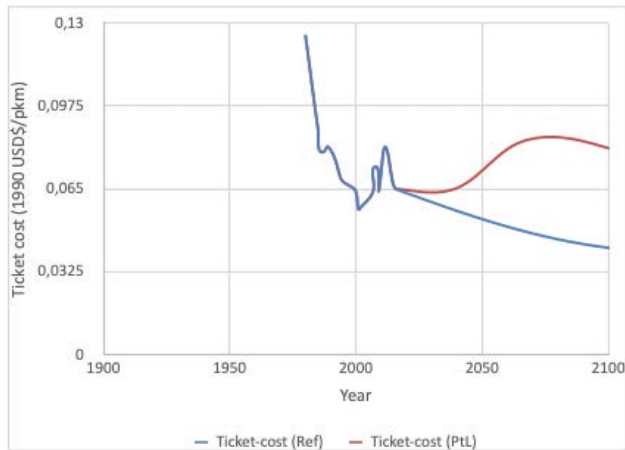
De standaard brandstof in de luchtvaart is op dit moment kerosine. Dit is een brandstof die een beetje vergelijkbaar is met diesel. De hoeveelheid energie die in een kilogram kerosine zit is erg hoog. Voor de luchtvaart is dit van groot belang omdat letterlijk elke gram telt. Daarnaast is kerosine niet licht ontvlambaar en bevriest niet als een vliegtuig op grote hoogte vliegt. Een huidig nadeel van kerosine is dat er relatief veel zwavel in zit. Deze zwavel is o.a. een bron van ultrafijn stof. Het RIVM is momenteel bezig met een langjarig onderzoek naar de invloed van ultrafijn stof op de gezondheid. Een probleem met veel alternatieven zoals ethanol, methanol en vloeibaar methaan, is dat hun energiedichtheid lager is dan van kerosine (zie Figuur 4).

Om de huidige vloot te kunnen gebruiken en toch de emissies sterk te verlagen is het ook mogelijk zogenaamde “drop-in” brandstoffen toe te passen. Deze brandstoffen kunnen in het bestaande systeem van vliegtuigen en de daarbij behorende logistieke operatie gebruikt worden. Deze drop-in brandstoffen zijn gelijk aan kerosine of lijken daar zo sterk op dat dit gebruik is toegestaan. Mogelijke vormen hiervan zijn bio-kerosine, Gas-to-Liquid (GtL), Coal-to-Liquid (CtL), Power-to-liquid (PtL, ook wel solar fuel of e-fuel genaamd). Al deze brandstoffen zijn vloeibaar en hebben een energiedichtheid die (bijna) identiek is aan die van kerosine.

Bij GtL en CtL wordt fossiele brandstof (respectievelijk aardgas en kolen), via een chemisch proces omgezet naar een vloeibare brandstof. Het proces daarvoor is al bijna een eeuw oud. Er is ook al aangetoond dat deze brandstof veilig is voor vliegtuigen. Nadeel van deze brandstoffen is dat ze nog steeds uitgaan van fossiele bronnen en dus de CO₂-uitstoot er niet door zal verminderen. Het voordeel is wel dat door het omzettingproces de verontreinigingen die in standaard kerosine zitten, zoals zwavel, eruit gehaald zijn. De verbranding is dus veel schoner. Experimenten van TU Delft hebben dit aangetoond (Snijders & Melkert, 2011). Dit heeft dus meteen effecten op de lokale luchtkwaliteit rond luchthavens. Op dit moment is het wettelijk toegestaan om tot 50% van deze brandstoffen bij te mengen bij gewone kerosine. Het probleem op dit moment is de beperkte beschikbaarheid en de hogere kosten.

Bio-kerosine en ander biobrandstoffen zijn technisch gezien vergelijkbaar met GtL en CtL. Het voordeel van deze type brandstoffen is dat ze wel daadwerkelijk de CO₂-uitstoot reduceren. Op levenscyclus basis is dat tussen de “van vrijwel geen besparing” tot 85% (de Jong et al., 2017). Nadelen zijn de relatief geringe energie omzettingsefficiëntie van bladgroen (Biello, 2012) met algen als eenzaam hoogtepunt op maximaal 3%, nog altijd tien keer minder dan de beste zonnecellen. Daardoor is veel ruimte nodig tussen de 200 en 6000 liter/ha (algen 60.000). Daar komt bij dat de rest de netto uitstoot van CO₂ lang niet omlaag gaat maar dat deze uitstoot nog steeds gebeurt op kruishoogte terwijl de opname van CO₂ plaats vindt op zeeniveau.

Een veelbelovend nieuw alternatief is Power-to-Liquid brandstoffen (Schmidt & Weindorf, 2016; Terwel & Kerkhoven, 2017). Hierbij wordt kerosine gemaakt door CO₂ uit een industriële bron (CCU; carbon capture and usage) of rechtstreeks uit de lucht te halen en de koolstofatomen daaruit los te maken. Het chemische proces is ruwweg vergelijkbaar met de productie van GtL en CtL maar de bron van de koolstofatomen is anders. De benodigde energie voor dit proces moeten uit duurzame bronnen (wind, zon, waterkracht) gehaald worden om de CO₂ emissies naar bijna nul te kunnen reduceren. Het voordeel van deze brandstof is dat ze geen ‘vruchtbare’ grond nodig heeft en dus niet zo makkelijk interfereert met de productie van voedsel of natuur en ook goed toepasbaar is in de luchtvaart. Ten opzichte van biobrandstoffen gebruiken ze ongeveer tien keer minder ruimte, honderd tot duizend keer minder water en is de levenscyclus reductie van CO₂ bijna 100% (Schmidt & Weindorf, 2016). Grootste nadeel is dat de kosten tussen de twee en zes keer hoger zijn dan die van fossiele kerosine. Nadelen zijn ook hier weer de beschikbaarheid en de kosten. Wat de kosten betreft kan men stellen dat deze goed door de sector gedragen kunnen worden wanneer er wereldwijd in de pas lopende mandaten worden ingevoerd. Op basis van een introductiepad waarbij dat tot 100% bijmengen in 2050 kan leiden en viervoudige kosten voor e-fuels vergeleken met fossiele kerosine laat Figuur 6 zien wat het gevolg voor de ticketkosten zal zijn. Duidelijk mag zijn dat die niet hoger worden dan de afgelopen tien jaar en dat de veranderingen zeer geleidelijk zullen verlopen vergeleken met normale marktontwikkelingen. Derhalve lijkt er geen reden te zijn om aan te nemen dat dergelijke mandaten kostentechnisch niet door de luchtvaartsector opgevangen zouden kunnen worden.



Figuur 6: mogelijk verloop van de ticketprijs bij een wereldwijde gemandateerde introductie van e-fuels tot 100% in 2050. Gebaseerd op het dynamische Global Tourism & Transport Model (Peeters, 2017).

De Werkgroep Duurzame Brandstoffen (WDB) heeft onlangs een rapport gepubliceerd met de plannen in Nederland op het gebied van e-fuels (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021).

Een lijstje van de plannen en ambities:

- In 2030 is 14% van de fossiele kerosine vervangen door alternatieve brandstoffen (SAF)
- In 2050 moet dit 100% zijn.
- In 2070 moeten de emissies van de luchtvaart nul zijn.
- In 2024 moet er 200.000 ton SAF worden geproduceerd in Nederland, oplopend via 500.000 ton in 2026 ongeveer 700.000 ton in 2030.
- Een e-fuel fabriek draait per 2028.

Opvallend is dat de groei van de productiecapaciteit in de planning afneemt tussen 2030 en 2026, terwijl men juist in 2030 op ene sterk groeipad moet zitten om de 100% SAF te kunnen halen in 2050. Het lijkt dat de ambitie voor productiecapaciteit hoger kan en moet zijn om op de langere termijn de doelen te kunnen halen. De rol van e-fuels zou groter moeten zijn om conflicten met landgebruik en andere duurzaamheidsproblemen te voorkomen. Overigens geeft het ministerie aan dat de hoeveelheid duurzame energie benodigd voor de productie van e-fuels conflicteert met de problemen die Nederland heeft om voor alle sectoren voldoende te produceren. Daarom merken wij op dat dergelijk e-fuels fabrieken zowel vanuit kosten als doelmatigheidsperspectief veel beter in landen met zeer veel zon aangelegd kunnen worden. Nederland zou die brandstof af moeten nemen, al kan die vooralsnog ook ter plekke getankt worden door andere maatschappijen. Dat werkt dan net als groene stroom die ook niet per adres wordt geleverd maar in de gehele elektriciteitsmix zit.

5. Luchtvaartnota 2020-2050

Op verzoek van de Tweede Kamer is een beleidsnota voor de luchtvaart ontwikkeld voor de periode 2020-2050. Deze zogenaamde Luchtvaartnota probeert een nieuwe koers voor de luchtvaart te geven. Het streven is om via deze nota alle aspecten van de luchtvaart meer met elkaar in balans te brengen. Dit betreft de volgende aspecten:

1. Veiligheid in de lucht en op de grond
2. De (internationale) bereikbaarheid van Nederland
3. Een aantrekkelijke en gezonde leefomgeving
4. Een duurzame luchtvaart

Het opstellen van deze nota en de ambities die hierin gegeven zijn, zijn uniek. Nergens in de wereld is men al zo ver gegaan een dergelijk geïntegreerd beleidsvoorstel te presenteren. Het is ook voor het eerst dat leefbaarheid expliciet wordt meegenomen in het luchtvaartbeleid. Ook het adaptieve karakter van de nota is bijzonder. Men geeft nu al aan dat dit een agenda is voor de komende vijf jaar maar dat deze daarna geactualiseerd zal worden. Dit kan bijvoorbeeld als er in het internationale speelveld een nieuwe situatie ontstaat.

Belangrijk is het wel te beseffen dat de nota uitgaat van een volledig klimaat neutrale luchtvaart in 2070. Dat terwijl het Akkoord van Parijs uitgaat van een het beperken van de wereldwijde opwarming van maximaal 2 graden in 2050 en ook de Europese Green Deal uitgaat van een klimaat-neutraal Europa in 2050. Alhoewel al eerder gezegd de luchtvaart op dit moment een relatief bescheiden bijdrage levert aan de opwarming van de aarde, kan dit deel zowel absoluut als relatief de komende decennia toenemen. De vraag is dan of de gestelde ambitie hoog genoeg is.

CO₂-plafond

Een van de aspecten die voortkomen uit de Luchtvaartnota is het instellen van een CO₂-plafond. Middels dit plafond wordt de totale CO₂-uitstoot van de luchtvaart beperkt. Dit is an sich een interessante benadering van het CO₂-probleem. De praktische uitvoering gaat wel de nodige aandacht vragen. De uitvoering zou zich richten op het koppelen van de in Nederland getankte kerosine. Dit is een makkelijke keuze want het rechtstreeks meten van de echte CO₂-uitstoot is niet mogelijk. We eten wel dat de verbranding van 1 kg kerosine leidt tot de uitstoot van 3,16 kg CO₂. Daarmee is de directe verbinding gelegd tussen getankte kerosine en de CO₂-uitstoot. Een nadeel is wel dat brandstof die elders getankt wordt niet meegenomen wordt in deze analyse, het zogenaamde tankering. Dit zou kunnen leiden tot strategisch gedrag wat de werkelijke CO₂-uitstoot doet toenemen in plaats van doet afnemen.

Bijmengverplichting

Een ander aspect dat in de Luchtvaartnota genoemd wordt is een bijmengverplichting voor duurzame brandstoffen (14% in 2030). Dit is een belangrijke stap die de vicieuze cirkel van beperkte beschikbaarheid en hoge kosten enigszins zou kunnen doorbreken. Belangrijk is wel dat een dergelijke maatregel op Europese schaal wordt ingevoerd. Anders zal ook hier strategisch gedrag gaan plaatsvinden en heeft het negatieve effecten op de Nederlandse concurrentiepositie.

(Technische) ontwikkelingen

Het is goed te beseffen dat Nederland een uniek luchtvaartland is. Al heel lang beschikken we over een bijna complete “infrastructuur”. Die begint bij opleidingsinstituten op MBO, HBO en WO-niveau. Daarnaast wordt er hoogwaardig wetenschappelijk onderzoek gedaan op o.a. de TU Delft en bij het Koninklijk Nederlands Luchtvaartcentrum (NLR) en TNO. Dan beschikken we ook over een uitgebreide maakindustrie die als toeleverancier de sector belevt. En er zijn ook nog de gebruikers in de vorm van luchthavens, luchtvaartmaatschappijen en de Koninklijke Luchtmacht. Deze infrastructuur kan met een goed beleid beter uitgenut worden. Met een goed onderbouwd en goed gefinancierd nationaal onderzoeksprogramma kan er beter worden aangesloten bij de Europese programma’s. Op dit vlak laten we als Nederland echt nog dingen liggen.

6. Kansen Nederlandse industrie

We hebben in Nederland:

- Grote luchtvaartindustrie: conceptueel en detail vliegtuigontwerp, productie.
- Brandstofcel-industrie
- Waterstof technologie en industrie
- E-fuel industrie en kennis
- Vormen een spil in het Europese luchtvaartnetwerk met mogelijkheden als marktleider voor distributie van waterstof en e-fuels.

De combinatie van al deze takken van relevante industrie biedt veel mogelijkheden. Deze worden nu onvoldoende uitgenut voor het verduurzamen van de luchtvaart. Een passend overheidsbeleid zou hier enerzijds kunnen zorgen voor belangrijke stappen richting duurzame luchtvaart. Maar ook anderzijds zou dit onze concurrentiepositie kunnen versterken.

7. Antwoorden op de gestelde detailvragen

Technologische aspecten

- *Wat is de stand van zaken van de technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart? Is momenteel sprake van een nieuwe generatie duurzamere vliegtuigen die op termijn kan worden ingezet?*
In beginsel is elke nieuwe generatie vliegtuigen zuiniger dan de generatie die ze vervangt. Dat komt niet alleen omdat brandstof een fors deel van de operationele kosten van een vliegtuig vormen, zo'n 20-30%, maar ook omdat de vervoerprestaties van een vliegtuig (de zogenaamde 'payload-range'), alsook de start- en landingsbaanlengte en derhalve het aantal luchthavens waar het vliegtuig gebruik van kan maken, in hoge mate afhangen van de brandstofefficiëntie. Dus het antwoord is in beginsel 'ja'. Dat neemt niet weg dat de historisch sterke verbetering van efficiëntie, er niet voor heeft gezorgd dat het totale brandstofverbruik is afgenomen; in tegendeel, deze is juist sterk gegroeid, maar zou uiteraard nog harder gegroeid zijn zonder de voortdurende technische verbeteringen. Dit geldt ook in grote lijnen voor geluidhinder en luchtkwaliteit.
- *Welke technologische ontwikkelingen worden de komende jaren verwacht?*
Naast de gangbare, evolutionaire ontwikkelingen in alle aspecten van een vliegtuigontwerp, aerodynamica, constructie, motortechniek met name hogere drukken en temperaturen in turbines, geared turbofans en dergelijke, die gemiddeld tot een ongeveer 1% per jaar verbetering leiden, is de grootste verbetering voor CO2-emissies te verwachten van alternatieve brandstoffen en met name van e-fuels via het power-to-liquids proces. Voor revolutionaire nieuwe vliegtuigontwerpen (nieuwe vliegtuigconfiguraties, zeer hogesnelheidspropellers, elektrische vliegtuigen en waterstof-brandstofcel-elektrische vliegtuigen), bestaat al decennialang belangstelling, maar de verwachting is dat deze, de komende decennia geen significante invloed zullen hebben op de gemiddelde vlootprestaties. Wel zijn er steeds meer initiatieven waaronder kleine, zoals van ZeroAvia en grote zoals het ZEROe project van Airbus (Airbus, 2021), waarin de Nederlandse industrie ook participeert.
- *Hoe pakken deze technologische ontwikkelingen uit voor de korte- (continentaal) en de lange afstandsvluchten (intercontinentaal)?*
Historisch gezien ontwikkelden conventionele lange-afstandsvliegtuigen zich iets sneller dan die voor korte afstanden en de verwachting is dat dat wel zo zal blijven. Echter, de revolutionaire techniek zal zich juist ontwikkelen van kleine naar steeds grotere vliegtuigen zoals nu al zichtbaar is.
- *Welke internationale 'best practices' op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart kunnen in de Nederlandse context worden gerealiseerd?*
Wanneer de luchtvaart geïsoleerd wordt bekeken, dan zijn er relatief weinig mogelijkheden voor verduurzaming op het gebied van brandstofefficiëntie en klimaatverandering. De beste optie is dan om vanuit Nederland de ontwikkeling van e-fuels voortvarend ter hand te nemen. Het Ministerie geeft daarvoor goede handvatten (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021), maar daar zal een tandje bijgezet moeten worden om de ambities te halen. Voor geluid en luchtkwaliteit zijn ook geen doorbraken te verwachten. Sterker nog, bijvoorbeeld elektrisch vliegen zouden ook tot meer lawaai kunnen leiden. Dit komt enerzijds omdat elektrische vliegtuigen aangedreven worden door propellers die niet stil zijn en anderzijds doordat elektrische vliegtuigen veel kleiner zullen zijn dan de bestaande verkeersvliegtuigen en re dus veel meer vluchten nodig zullen zijn. Elektrisch vliegen met waterstof en brandstofcellen is wel een oplossing voor luchtkwaliteit rond luchthavens.
- *Welk besparingspotentieel hebben de technologische ontwikkelingen voor de verschillende emissies (luchtkwaliteit, klimaat, geluid en brandstofverbruik)? Hoe verhoudt dat zich tot de huidige emissies en de prognoses hiervan?*
Voor klimaat/CO2 emissies en brandstofverbruik: de vanuit de sector en binnen de huidige markt te verwachten verbeteringen zullen slechts een kwart van de huidige groei op kunnen vangen, met andere woorden, de emissies groeien met circa 75% van de volumegroei. Het huidige internationale beleid is naar verwachting niet in staat daar substantieel verandering in te brengen.

Niet-CO2 klimaateffecten: deze zijn voor een belangrijk deel te ondervangen door vliegroutes aan te passen. Dat gaat echter ten koste van extra CO2-emissies (5-10%) en ook iets hogere operationele kosten (2-3%). Onder internationale afspraken is dat dus goed mogelijk. Wat daarbij van belang is, is dat de extra CO2-emissies een lange termijn bijdrage (vele generaties) zullen leveren aan klimaatverandering die niet, of slechts met zeer grote inspanningen – versneld terug te draaien zal zijn. De niet-CO2 effecten zijn van kortdurende aard (dagen tot maximaal zo'n tien jaar), waardoor het de vraag is of die aangepakt moeten worden zolang dat extra CO2 oplevert.

De genoemde e-fuels hebben een groot besparingspotentieel. Bij gebruik van CCU is dat tot 50%, bij een systeem waarin atmosferische CO2 wordt gebruikt tot bijna 100%. In een toekomst gebaseerd op e-fuels is het vermijden van niet-CO2-effecten een milieukundig gezien goede optie.

Voor geluid: voortdurende vlootvernieuwing heeft een positief effect op de geluidsproductie. De belangrijkste bron van geluid tijdens de start zijn nu nog steeds de motoren. Tijdens de nadering en landing begint zo langzamerhand het geluid dat wordt geproduceerd door de omstroming van romp en vleugels maatgevend te worden (airframe noise). Dit komt omdat de motoren in de loop der jaren significant stiller zijn geworden. Een nog betere aerodynamische vormgeving van het vliegtuig kan ook het "airframe noise" verder doen afnemen. De lange termijn ontwikkeling laat zien dat de vliegtuigen niet alleen steeds zuiniger worden maar ook steeds stiller zullen worden.

Voor emissies: de emissies van een vliegtuig zijn een op een gerelateerd aan het brandstofgebruik. Zuiniger motoren, een lager gewicht van de constructie en een betere aerodynamica leveren direct reducties in emissies op. Daarnaast liggen er nog veel kansen in het motorontwerp om de relatieve emissies, emissies per geleverde stuwkracht, ook aanzienlijk te verminderen. Voortdurende investeringen op dit vlak zijn daarom ook noodzakelijk. Dat geldt niet alleen voor de ontwikkeling van nieuwe vliegtuigtypes door fabrikanten maar ook in het fundamenteel en toegepast onderzoek. Daarnaast kunnen ook een optimalisatie van de gevlogen routes een significant effect hebben (tot zo'n 5-10%). Niet alleen een herindeling van het Nederlands luchtruim kan daaraan bijdragen maar ook de invoering van de Single European Sky. Op dit moment wordt er op veel vluchten nog steeds onnodig "omgevlogen".

Bedrijfseconomische aspecten

- *Wat zijn realistische tijdspaden voor de inzet van de nieuwste technologieën door de luchtvaartmaatschappijen? Wat zijn belemmeringen en kansen voor versnelling van deze inzet en voor bijvoorbeeld uitfasering van de minst duurzame vliegtuigen in zowel burger- als vrachtluchtvaart?*
Antwoorden op de vraag hoe de techniek zich kan ontwikkelen zijn niet eenvoudig te geven en economische gevolgen daarvan zelfs nog lastiger. In onderstaande tabel (doorlopend naar de volgende pagina) hebben we de belangrijkste mogelijkheden op een rijtje gezet met tijdspaden en -deels kwalitatief - enige opmerkingen over de kosten.

Technologie	Effect	Ontwikkeltijd	Luchtvaart-brede implementatie	Economie
<i>Evolutionaire technologie</i>	<i>2050-2100: 1,0%/jr-0,7%/jr</i>	<i>Stapsgewijs per generatie ca 15% per 15-25 jaar</i>	<i>Voortdurend</i>	<i>Intern deel luchtvaartstelsysteem</i>
<i>Revolutionaire vliegtuig configuraties</i>	<i>zo'n 10-20% additionele efficiëntie verbetering</i>	<i>20-30 jaar</i>	<i>na 2060 maar vergt nu significante investeringen in fundamenteel en toegepast onderzoek.</i>	<i>In beginsel kan dit binnen sector; probleem is het risico van de vele tientallen miljarden ontwikkelkosten per type plus aanpassingen infrastructuur</i>

Technologie	Effect	Ontwikkeltijd	Luchtvaart-brede implementatie	Economie
<i>Elektrisch vliegen (batterij)</i>	<i>100% mits 100% duurzame energiebronnen</i>	<i>Korte afstand: 20-40 jaar Lange afstand: 30-60 jaar</i>	<i>Korte afstand: na 2080 Lange afstand: na 2100</i>	<i>Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten</i>
<i>Elektrisch vliegen (Waterstof, brandstofcel)</i>	<i>100% mits 100% duurzame energiebronnen</i>	<i>Korte afstand: 20 jaar Lange afstand: 20 jaar</i>	<i>Korte afstand: na 2050 Lange afstand: na 2080</i>	<i>Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten</i>
<i>Biobrandstoffen</i>	<i>40-80%</i>	<i>geen voor 1^{ste} en 2^{de} generatie; 10 jaar voor 3^{de} (bv algen)</i>	<i>2-3% vervanging per jaar</i>	<i>Brandstofkosten circa 1% tot 10% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad</i>
<i>e-fuels (PtL)</i>	<i>95-100% mits duurzame bronnen</i>	<i>via CCU: 5 jaar via CCA: 10-15 jaar</i>	<i>2-3% vervanging per jaar; in 30 tot 50 jaar volledige vervanging. Op dit vlak zou Nederland een voortrekkersrol kunnen spelen.</i>	<i>Brandstofkosten circa 2% tot 18% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad</i>
<i>Aanpassing vliegprocedures ter vermijding niet-CO₂ klimaateffecten en "omvliegen"</i>	<i>Circa 40% klimaateffect; noot: circa 10% toename CO₂</i>	<i>afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar?)</i>	<i>afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar?) Invoering van de Single European Sky is daarbij gewenst.</i>	<i>Circa 3-10% extra operationele kosten</i>

Maatregelen overheid

- *Welke belemmeringen zijn er om te komen tot een duurzamere luchtvaart? Welke mechanismen hebben een negatieve invloed op de effectiviteit van nieuwe technologieën en overheidsmaatregelen?*
De belangrijkste belemmering voor meer revolutionaire (configuratie, elektrisch vliegen, waterstof) dan evolutionaire technologische ontwikkeling vormen de existentiële⁴ bedrijfsrisico's verbonden aan ontwikkeling van dergelijke technologie binnen het bestaande duopolie (Airbus en Boeing).

Voor batterij-elektrisch vliegen: de benodigde batterijtechniek is op dit moment volstrekt onvolgende en kan theoretisch waarschijnlijk niet worden gerealiseerd maar zal sowieso nog decennia op zich laten wachten.

Voor waterstof-brandstofcel-elektrisch. Hiervoor zijn geen theoretisch technische belemmeringen en de ontwikkeling van een vliegtuig zou in principe met bestaande technologie ter hand genomen kunnen worden. Nederland kan hieraan bijdragen via fondsen voor onderzoek in internationaal verband.

Biobrandstoffen kennen twee belangrijke belemmeringen: de duurzaamheid (inclusief maatschappelijk draagvlak) en de effectiviteit. Wat het eerste betreft vormen de (potentiële) conflicten tussen het verbouwen van biomassa voor biobrandstoffen ten opzichte van voedselproductie en het grote ruimtegebruik en daardoor de druk op natuur en ecosystemen. Biomassa uit afvalproducten

⁴ De investering is dermate groot dat een bedrijf, bij mislukking, het eigen voortbestaan op het spel zet.

maakt de brandstof afhankelijk van afval uit de voedingsindustrie, terwijl de verduurzaming van die industrie deels via het verminderen van afval zal lopen, waardoor het toekomstige volume van dergelijke brandstoffen onzeker is. Wat betreft effectiviteit zijn er twee problemen: bladgroen vormt in het algemeen geen efficiënte omzetter van zonne-energie in andere vormen van energie, zeker vergeleken met zonnecellen en windturbines, de benodigde landbouw leidt tot diverse vormen van broeikasgassen (methaan, verandering van landgebruik, etc.) en het proces om van de biomassa brandstof te maken kost veel energie. Dat laatste speelt bijvoorbeeld bij algen, waar een kans bestaat dat het proces op levenscyclusniveau energie kost in plaats van opbrengt (Slegers, Wijffels, Van Straten, & Van Boxtel, 2011). Daar moet dus veel duurzame energie bij.

e-Fuels (PtL) hebben – op basis van CCU - vooralsnog geen technologische belemmeringen. Alle verschillende technologische en processtappen zijn niet alleen beschikbaar, maar ook al groot-schalig toegepast in de industrie (maar voor andere doeleinden). Nederland is bezig zich hier in een voortrekkersrol te ontwikkelen. Een tandje erbij lijkt wel verstandig.

- *Welke maatregelen kan de rijksoverheid nemen om verduurzaming van de luchtvaart te stimuleren en innovatie te versnellen? Welke maatregelen behoren bij uitstek tot het domein van de overheid en welke zouden door de sector zelf genomen moeten worden? Welke maatregelen zouden in Europees verband kunnen worden genomen? Welke overheidsinstrumenten bieden internationaal en nationaal de beste mogelijkheden?*

De maatregel voor meer revolutionaire ontwikkelingen liggen in het enerzijds garanderen van afzet voor de technologie (luchtvaartmaatschappijen worden sterk aangespoord dan wel via regelgeving gedwongen het revolutionaire vliegtuig af te nemen; dat dekt het marktrisico) en afdekking van existentiële risico's voor de ontwikkelkosten. Dergelijke maatregelen vergen een wereldwijde ondersteuning.

Voor waterstof-brandstofcel-elektrisch kan Nederland bijdragen via onderzoeksfondsen in internationaal verband. Ook dit is een lange-termijn oplossing, maar met een grotere zekerheid over de kans van slagen en de tijdsduur van implementatie.

Biobrandstoffen: huidige beleid bestaat uit onderzoek naar (experimenten met en implementatie van) biobrandstoffen (o.a. algen, 3de generatie biomassa). Een diepgravende onafhankelijke studie naar de belemmeringen op het gebied van duurzaamheid lijkt aanbevelingswaardig.

E-Fuels (PtL). Deze oplossing staat pas enkele jaren in de belangstelling. Er ligt een rol voor de overheid om het gebruik van e-fuels te stimuleren omdat, bij een prijsverschil van meer dan 100%, grootschalige opname in de vrije markt geen grote kans maakt. Daarom is het brandstof-bijmeng-mandaat dat de Luchtvaartnota voorstelt een essentiële stap om de milieukosten te internaliseren zonder ingewikkelde en indirect werkende belasting en subsidiesystemen in te hoeven richten. Ook de initiatieven om e-fuel productie op grote schaal te stimuleren is noodzakelijk. De extra kosten zijn voor de luchtvaartsector als gehele goed te dragen – het verleden heeft veel sterkere prijsschokken laten zien die de sector ook heeft doorstaan – maar het is zinvol te overwegen met zoveel mogelijk landen een samenwerking aan te gaan en dan te bekijken of in landen in het Midden-Oosten⁵ een fabriek is te bouwen. De zonnecentrales die op dit moment in bijvoorbeeld Abu Dhabi worden gebouwd zijn enorm en bieden relatief goedkope duurzame energie.

Niet-CO₂ effecten zouden in beginsel in het Nederlandse luchtruim kunnen worden verminderd door bij het kiezen van route en vlieghoogte – met name van Nederland overvliegende vliegtuigen - rekening te houden met de kans op contrail vorming. Een studie naar het effect daarvan (op klimaat, andere emissies, economisch, veiligheid, juridische aspecten) en voor situaties waarin alleen Nederland dit toepast of bijvoorbeeld de gehele EU, verdient aanbeveling. Omdat de CO₂-emissies door deze maatregelen toe zullen nemen, is deze maatregel vooral klimaateffectief in samenhang met de invoering van nul-emissies e-fuels.

⁵ <https://www.euronews.com/2020/06/12/as-solar-energy-rises-in-the-middle-east-will-the-sun-set-on-the-oil-gas-sector>.

Overige (flankerende) maatregelen: bevorderen internationaal treinvervoer door de markt te helpen betere informatie en boekingsmogelijkheden te ontwikkelen, door een gelijk fiscaal speelveld te creëren, door de luchtvaartnota uit te breiden naar een internationale reisnota, door de verdere aansluiting van Nederland op het HSL-net voortvarend ter hand te nemen (met name in oostelijke en noordelijke richting), en, op de zeer korte termijn, door de belemmeringen die de directe verbinding Amsterdam-Londen in de weg staan, weg te nemen. Voorts zou er een duidelijker link gelegd kunnen worden tussen het luchtvaartbeleid en het (inkomend) toerismebeleid en met name de (milieu-)gevolgen daarvan. Het NBTC zou daarbij een 'carbon-check' kunnen hanteren bij de strategische marktontwikkeling van het toerisme naar Nederland en prioriteit kunnen leggen bij het ontwikkelen van meer nabije bronmarkten die over land (per auto, trein, etc.) naar Nederland kunnen reizen.

Nederland zou het reeds lopende onderzoek naar de gevolgen van luchtvaart voor fijnstofemissies in internationaal verband kunnen uitbreiden en verbreden naar niet alleen de directe epidemiologische gezondheidseffecten, maar ook de relaties tussen concentraties en bronnen en de techniek om deze emissies in de motor te verminderen.

- *Welke 'best practices' op het gebied van overheidsbeleid kunnen in Nederland zelf worden gerealiseerd?*
Voor geluidhinder geeft onderzoek aan dat vooral nachtvluchten bepalen hoeveel hinder wordt ervaren (Bartels, Rooney, & Müller, 2018). Een strakker nachtregime wordt op sommige luchthavens met succes toegepast (b.v. de huidige 50/50-regel voor groei op Schiphol). In navolging van geluid zou ook een 50/50 regel voor CO₂-emissies ingesteld kunnen worden.

Juridische aspecten

- *Welke ontwikkelingen spelen momenteel op nationaal, Europees en internationaal niveau (bijvoorbeeld via EASA en ICAO) om de luchtvaartsector te stimuleren verduurzamingsmaatregelen te nemen?*
Regelgeving die betrekking heeft op het vliegtuig, de motor of de brandstof wordt niet bepaald in Nederland maar in het wereldwijde en Europese verband. Belangrijk is het te beseffen dat dat Nederland een relatief grote stem in ICAO en EASA verband heeft en die kan gebruiken om druk internationaal op te bouwen voor een transitiepad naar e-fuels, versnelde regelgeving omtrent geluid en emissies van de motoren. Daarnaast kan Nederland zelf werken aan betere alternatieven voor luchtvaart, bredere visie op internationale mobiliteit (i.p.v. per modaliteit) en bijvoorbeeld ICT toepassingen ter vervanging van bepaalde reizen.
- *Welke juridische mogelijkheden en beperkingen gelden in nationaal en internationaal verband bij het afdwingen van maatregelen in het kader van verduurzaming?*
De huidige regelgeving bevindt zich op nationaal, Europees en VN (ICAO) niveau, is sterk verweven en niet altijd eenvoudig te duiden. Het VN-beleid voor luchtvaart is niet voldoende om de effecten van klimaatverandering tegen te gaan, dat wil zeggen, de emissies van CO₂ uiteindelijk in de tweede helft van deze eeuw naar nul te reduceren.

Referenties

- Abate, M., Christidis, P., & Purwanto, A. J. (2020). Government support to airlines in the aftermath of the COVID-19 pandemic. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101931.
- Airbus. (2021). ZEROe. Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. Retrieved 02-06-2021, from <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>
- Alonso, J., Catalano, F., Cumpsty, N., Eyers, C. J., Goutines, M., Grönstedt, T., Hileman, J., Joselzon, A., Khaletskii, I., Mavris, D., Ogilvie, F., Ralph, D., Sabnis, J., Wahls, R., & Zingg, D. (2018). *Independent expert integrated technology goals assessment and review for engines and aircraft. 2017 independent expert integrated review panel. DRAFT version for review*. Montreal: ICAO.
- Bartels, S., Rooney, D., & Müller, U. (2018). Assessing aircraft noise-induced annoyance around a major German airport and its predictors via telephone survey – The COSMA study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 246-258.
- Biello, D. (2012). Plants versus Photovoltaics: Which Are Better to Capture Solar Energy? *Scientific American*.
- Bouwer, J., Saxon, S., & Wittkamp, N. (2021). *Back to the future? Airline sector poised for change post-COVID-19*. New York: McKinsey.
- Bows-Larkin, A., Mander, S., Traut, M. B., Anderson, K. L., & Wood, F. R. (2016). Aviation and Climate Change—The Continuing Challenge. In Blockley (Ed.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. New York, NY: John Wiley & Sons, Ltd.
- Breugelmans, O., Houthuijs, D., & van Poll, R. (2016). *Inventarisatie van gezondheids- en belevingsonderzoeken (1996-2015) rondom (regionale) luchthavens van nationale betekenis* (No. RIVM Briefrapport 2016-0101). Bilthoven: Rijksinstituut voor Milieu en Volksgezondheid.
- Brewer, G. D. (1991). *Hydrogen aircraft technology*. London: CRC Press.
- Cames, M., Harthan, R. O., Füssler, J. r., Lazarus, M., Lee, C. M., Erickson, P., & Spalding-Fecher, R. (2016). How additional is the Clean Development Mechanism? Analysis of the application of current tools and proposed alternatives (No. CLIMA.B.3/SER12013/0026r). Berlin: Öko-Institut.
- Delgado Gosálvez, M., van Ham, J., Joosten, S., Juschus, d., Nieuwerth, G., van Pelt, T., Smit, L., Takken, M., Wang, Y., & Ziere, T. (2018). *Green Flying. Final Report*. Delft: TU Delft.
- EASA. (2017). *Notice of Proposed Amendment 2017-01. Implementation of the CAEP/10 amendments on climate change, emissions and noise* (No. NPA 2017-01). Cologne: European Aviation safety Agency.
- EEA. (2018). *Aviation and shipping — impacts on Europe's environment TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report* (No. EEA Report No 22/2017). Kopenhagen: European Environmental Agency.
- Eijgelaar, E., Peeters, P. M., de Bruijn, K., & Dirven, R. (2016). *Travelling large in 2015. The carbon footprint of Dutch holidaymakers in 2015 and the development since 2002* (No. ISBN: 978-90-819011-7-8). Breda: NHTV University for Applied Sciences in collaboration with NBTC-NIPO Research.
- Hepburn, C., O'Callaghan, B., Stern, N., Stiglitz, J., & Zenghelis, D. (2020). Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Oxford Review of Economic Policy*, 36.
- IATA. (2020). *World air transport statistics 2020* (No. ISBN 978-92-9264-122-1). Montreal-Geneva-London: International Air transport Association.
- ICAO. (2021). CORSIA and COVID-19. Retrieved 13-05-2021, from <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-and-Covid-19.aspx>
- IPBES. (2020). *IPBES Workshop on Biodiversity and Pandemic. Workshop report* (No. DOI:10.5281/zenodo.4147317). Bonn.
- De Jong, S., Antonissen, K., Hoefnagels, R., Lonza, L., Wang, M., Faaij, A., & Junginger, M. (2017). *Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 64.
- Keuken, M., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, B., Brunekreef, B., & Hoek, G. (2014). Ultrafijn stof rondom Schiphol. In woonwijken van Amsterdam en Amstelveen zijn concentraties van ultrafijn stof verhoogd. *Tijdschrift Lucht*, 6, 8-11.
- Kivits, R., Charles, M. B., & Ryan, N. (2010). A post-carbon aviation future: Airports and the transition to a cleaner aviation sector. *Futures*, 42(3), 199-211.
- Lee, D., Fahey, D., Skowron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S., Freeman, S., Forster, P., & Fuglestedt, J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment, in Press*, 117834.
- Maertens, S., Grimme, W., Scheelhaase, J., & Jung, M. (2019). Options to Continue the EU ETS for Aviation in a CORSIA-World. *Sustainability*, 11(20), 5703.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Geluidsbelastingkaarten luchthaven Schiphol voor het gebruiksjaar 2016*. The Hague: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2021). *WDB Action programme*. The Hague: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Natuur en Milieufederatie Noord-Holland. (2017). *Versterking stiltegebiedenbeleid Noord-Holland*. Eindrapport. Zaandam: Natuur en Milieufederatie Noord-Holland.
- Peeters, P., Eijgelaar, E., Neelis, I., & Adrichem, C. (2020). *De impact van luchtvaartgeluid op toerisme en verblijfsrecreatie. Verkennend onderzoek voor Zuid-Limburg*: Centre of sustainability, Tourism and Transport.
- Peeters, P. M. (2000). Annex I: *Designing aircraft for low emissions. Technical basis for the ESCAPE project*. (No. 00.4404.17). Delft: Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie.
- Peeters, P. M. (2017). *Tourism's impact on climate change and its mitigation challenges. How can tourism become 'climatically sustainable'?*, Delft University of Technology, Delft.
- Peeters, P. M., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S. A., & Gössling, S. (2016). Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D*, 44, 30-42.
- Peeters, P. M., & Melkert, J. A. (2018). Factsheet toekomst verduurzaming luchtvaart (No. juni 2018). Den Haag: Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.
- Peeters, P. M., & Middel, J. (2007). Historical and future development of air transport fuel efficiency. In R. Sausen, A. Blum, D. S. Lee & C. Brüning (Eds.), *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC); Oxford, United Kingdom, 26th to 29th June 2006* (pp. 42-47). Oberpfaffenhoven: DLR Institut für Physik der Atmosphäre.
- Y Piontti, A. P., Perra, N., Rossi, L., Samay, N., & Vespignani, A. (2019). *Charting the Next Pandemic: Modeling Infectious Disease Spreading in the Data Science Age*. Cham: Springer.
- Rapoza, A., Sudderth, E., & Lewis, K. (2015). The relationship between aircraft noise exposure and day-use visitor survey responses in backcountry areas of national parks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(4), 2090-2105.
- Riley, E. A., Gould, T., Hartin, K., Fruin, S. A., Simpson, C. D., Yost, M. G., & Larson, T. (2016). Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmospheric Environment*, 139, 20-29.
- RIVM. (2017). *Plan van aanpak meerjarig onderzoeksprogramma "Gezondheidsrisico's ultrafijn stof rond Schiphol"* (No. Versie 21 4 2017). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). *Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Dessau-Roßlau: Umwelt Bundesamt.
- Slegers, P., Wijffels, R., Van Straten, G., & Van Boxtel, A. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. *Applied Energy*, 88(10), 3342-3353.
- Snijders, T. A., & Melkert, J. A. (2011 of Conference). Evaluation of Safety, performance and emissions of Synthetic Fuel Blends in an Cessna Citation II. Paper presented at the 3AF/AIAA Aircraft noise and emissions reduction symposium, , 25-27 October, 2011, Marseille, France.
- Snyder, C. (1998 of Conference, July 7, 1998). Zero-emissions aircraft? Scenarios for aviation's growth: opportunities for advanced technology. Paper presented at the NASA Environmental Compatibility Research Workshop III, Monterey, CA.
- Snyder, C. A., Berton, J. J., Brown, G. V., Dolce, J. L., Dravid, N. V., Eichenberg, D. J., Freeh, J. E., Gallo, C. A., Jones, S. M., & Kundu, K. P. (2009). Propulsion Investigation for Zero and Near-Zero Emissions Aircraft. NASA TM-215487.
- Syed, F., & Ullah, A. (2021). Estimation of economic benefits associated with the reduction in the CO2 emission due to COVID-19. *Environmental Challenges*, 3, 100069.
- Terwel, R., & Kerkhoven, J. (2017). *Climate-neutral Aviation with Current Engine Technology: The Take-off of Synthetic Kerosene Production in the Netherlands*: Topconsortium voor Kennis en Innovatie Energie & Industrie.
- Wang, Z., Galea, E. R., Grandison, A., Ewer, J., & Jia, F. (2021). Inflight transmission of COVID-19 based on experimental aerosol dispersion data. *Journal of Travel Medicine*.

Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO, TNO en VSNU bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.



Tweede Kamer
DER STATEN-GENERAAL

