

Revolution über den Wolken

LUFTFAHRT Die Fluglinien stehen vor dem größten Wandel seit Erfindung der Jet-Triebwerke. Ihre Maschinen sollen schnellstmöglich klimaneutral fliegen, aber wie kann das gelingen? Weltweit arbeiten Ingenieure an neuen Technologien und Treibstoffen.



Wenn am 19. Juni erstmals seit 2019 die Luftfahrtbranche wieder ihr Hochamt zelebriert, werden Hunderttausende Menschen zum Flughafen Le Bourget nordöstlich von Paris strömen, zur weltgrößten Luft- und Raumfahrtmesse. Nach Jahren der Tristesse während der Pandemie gönnen sich Airlines, Hersteller, Start-ups und Fachpublikum ein großes Fest.

Die Erzkonkurrenten Airbus und Boeing werden mit ihren jüngsten Verkaufserfolgen protzen – und die könnten in diesem Jahr ganz besonders üppig ausfallen. Noch ist nichts offiziell, aber Emirates aus Dubai könnte in Paris bis zu 150 Riesenjets bei beiden Herstellern bestellen. Die indische Billigfirma IndiGo plant sogar, 500 Maschinen aus der

Airbus-A320-Familie zu ordern. Es wäre die größte Einzelbestellung der Luftfahrtgeschichte, allerdings müssen die Inder geduldig sein: Airbus wie Boeing sind bei ihren Bestsellern über Jahre hin ausverkauft.

Bei solchen Nachrichten scheint es, als könnte nichts den Optimismus der Branche trüben. Doch der Eindruck täuscht. Viele Besucher der Paris Air Show werden weniger über das wiedererstarkte Wachstum der Fliegerei sprechen – sondern über die Konsequenzen, vor allem ihre Mitschuld an der Klimakrise. Mehr Flugzeuge, mehr Flüge und Passagiere, das geht nicht zusammen mit mehr Klimaschutz.

Die Branche hat zwar versprochen, vom Jahr 2050 an in der Bilanz klimaneutral zu

sein, aber sie bleibt vage bei den Maßnahmen, die sie für dieses Ziel ergreifen will. Über der Party von Le Bourget hängt deswegen ein Damoklesschwert: Verliert die Politik die Geduld – und greift durch? Erste Schritte sind getan:

► Frankreich hat gerade Inlandsflüge verboten, sofern eine Strecke innerhalb von 2,5 Stunden per Zug zu schaffen ist.

► Schweden und Dänemark haben angekündigt, dass alle Inlandsflüge ab 2030 emissionsfrei sein müssen, obwohl entsprechende Verkehrsflugzeuge noch nicht existieren. Norwegen will bis 2040 nachziehen.

► Israel hat seine Airports für besonders emissionsstarke Maschinen wie den Jumbojet oder den A380 gesperrt.



Hoffnung auf Fortschritt

Wie Fliegen bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden soll, Beitrag in Prozent

nachhaltige, teils synthetische Treibstoffe (SAF)
65

neue Antriebs-technologien (z.B. Elektro oder Wasserstoff)
13

effizientere Abläufe und Infrastrukturen
3

Kompensationen und CO₂-Abscheidung
19

5-Quelle: IATA

noch einfach mal in den Urlaub fliegen können?

In der Defensive verweist die Branche gern darauf, dass die gesamte Fliegerei nur etwa zwei Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen ausmache. Fast nichts also, verglichen mit dem Gebäudesektor, dem Straßenverkehr oder der Industrie. Das stimmt und ist trotzdem grundfalsch.

Flugzeuge richten viel mehr Schaden an, als ihr wachsender Anteil am CO₂-Ausstoß suggeriert. Der Abgasstrahl der Triebwerke enthält neben CO₂ und Stickoxiden auch Rußpartikel – die können dafür sorgen, dass sich in der Troposphäre Kondensstreifen am Himmel bilden, die sich oft über Stunden halten und verhindern, dass Wärmestrahlung von der Erde in den Weltraum entweicht.

Die Klimawirkung der Luftfahrt liegt daher nicht bei zwei Prozent, sondern laut der europäischen Luftfahrtbehörde EASA mindestens zwei-, vielleicht sogar vierfach höher. Kondensstreifen tragen mehr zur Erderwärmung bei als die CO₂-Emissionen der Flugzeuge selbst.

Im Jahr 2050, so schreiben die Atmosphärenforscherinnen Lisa Bock und Ulrike Burkhardt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, wird es wegen des zu erwartenden starken Wachstums der Fliegerei dreimal mehr Wolken aus Kondensstreifen geben als noch im Jahr 2006. Die am meisten betroffenen Gebiete: die USA und Europa.

So groß der Schaden, so winzig der Kreis der Verursacher: 89 Prozent der Menschheit sind im Jahr 2018 am Boden geblieben, die allermeisten davon waren sogar noch nie in der Luft. Etwa vier Prozent aller Menschen flogen 2018 in andere Länder. Und nur rund ein Prozent der Erdenbürger nutzte das Flugzeug intensiv.

Diese ungefähr 80 Millionen Leute sind für mindestens die Hälfte der Umweltschäden durch die Fliegerei verantwortlich, wie der deutsche Mobilitätsforscher Stefan Gössling, 52, von der Linnaeus-Universität in Schweden vorrechnet.

In einer gerechten Welt müssten die Frequent Travellers nach dem Verursacherprinzip für das Malheur aufkommen, etwa in Form von steil ansteigenden Gebühren für jedes weitere Ticket. Mit diesem Geld könnte sogar die grüne Verwandlung der Luftfahrt finanziert werden. Doch die Realität ist anders: Die Airlines schenken ihren Vielfliegern Upgrades auf bequemere Sitze und Anreize, noch mehr zu reisen und noch mehr Emissionen zu verursachen.

Dabei gibt es Versuche, alles zum Besseren zu verändern. Sie finden sich aber selten in den Entwicklungsabteilungen der großen Konzerne. Diese versuchen, die Effizienz ihrer Branche zu steigern, doch sie denken selten radikal. In der Münchner Prinzregentenstraße hingegen residiert eine junge Firma, die neue Ideen präsentieren kann.

Das Start-up Vaeridion will nicht weniger als den Kurzstrecken-Flugverkehr neu erfinden. Co-Gründer und Firmenchef Ivor van Dartel, 39, hat mehr als zwölf Jahre als Ingenieur bei Airbus verbracht, auch an einem hybridelektrischen Prototyp namens »E-Fan X« war er maßgeblich beteiligt. Das Projekt wurde vom Konzern gestoppt – und van Dartel kündigte. Jetzt entwirft er eine reine Elektro-Passagiermaschine.

Der »Microliner« soll ein energetisch äußerst genügsames Flugzeug mit zwei Elektromotoren hinter nur einem Propeller werden. Die Batterien stecken nicht im Rumpf, sondern in den sehr langen Tragflächen. Die aerodynamisch nach Prinzipien der Segelfliegerei optimierte Leichtbaukonstruktion soll eine Reichweite von zunächst 500 Kilometern ermöglichen, sie soll neun Passagiere befördern und von nur einem Piloten geflogen werden können.

Für Flugzeuge dieser Klasse gelten einfachere Zulassungsanforderungen, daher kostet ihre Entwicklung auch nur rund 150 Millionen Euro, nicht Milliarden wie bei den Neuschöpfungen von Airbus und Boeing. Den Erstflug peilt van Dartel für 2026 an.

Doch wer soll damit fliegen? Der Absolvent der TU Delft in den Niederlanden will mit seinem Elektrohüpfen eine neue Ära der Regionalmobilität begründen.

Ein Großteil der Deutschen wohnt höchstens 20 Kilometer entfernt von einem kleinen Flughafen, der für den »Microliner« ausreichend wäre. Neuartige Direktverbindungen würden mit ihm möglich, etwa von Münster nach Kiel, von Regensburg nach Bielefeld, von Schwerin nach Aachen.

Auf jeder dieser Strecken böte der »Microliner« gegenüber Autos mit Verbrennungs- oder Elektromotor bedeutende Vorteile beim Energieverbrauch, bei der Reisezeit schlägt er Busse und Bahnen. Die Bundesbahn wird auf solchen Strecken wohl nie bessere Angebote machen können, sie ist mit dem Erhalt der maroden Schienen zwischen den großen Städten vollends ausgelastet.

Das sei die Chance des »Microliners«, glaubt van Dartel. Die bei ihm

► Der Amsterdamer Flughafen Schiphol will allen Privatflugzeugen Start- und Landeverbot erteilen, das war eine Forderung von Klimaaktivisten. Überdies will die Regierung die Maximalzahl der kommerziellen Flüge am größten Airport des Landes reduzieren.

»Stück für Stück«, sagt ein Manager, »kommen die Dinge ins Rutschen.« Um weitere Eingriffe abzuwenden, muss sich die Luftfahrt rasch wandeln – doch wie, wenn sie doch auf Kerosin nicht wirklich verzichten kann? Werden Elektroflieger oder mit Wasserstoff betriebene Jets die Wende bringen? Und wer wird künftig

»TTBW«-Projekt von Boeing (Illustration): Sparsamere Flieger mit neuer Technologie kommen frühestens 2035 auf den Markt

Illustration: NASA

fälligen Ticketpreise, sagt er, lägen nur etwas über dem, was die Bahn für einen Fahrschein in der ersten Klasse nehme. Für Geschäftsreisende, aber auch für viele Familien, könne der Flieger eine verlockende Alternative werden. Pro Jahr, so hofft van Dartel, werde Vaeiridion irgendwann 1000 dieser Maschinen verkaufen können, allen voran in Deutschland, Frankreich, den Beneluxstaaten und Skandinavien. Van Dartel setzt auch darauf, dass der wartungsarme Elektroantrieb viele Airlines mit seinen geringen Kosten lockt.

Eine Handvoll weiterer Firmen arbeitet an ähnlichen Projekten. Das berühmteste nennt sich »Alice«, dahinter steckt die israelische Firma Eviation. Ende September bestand die ebenfalls neunsitzige Maschine in den USA ihren Jungfernflug. Acht Minuten lang blieb der Elektroflieger in der Luft – er verbrauchte dabei aber so viel Strom, dass Eviation die maximale Reichweite hinterher von 815 auf 460 Kilometer korrigieren musste. Die Energiedichte der jetzt verfügbaren Batterien ist noch bescheiden.

Eviation hat für seinen Ökoflieger gleichwohl schon über 300 Bestellungen im Wert von mehr als vier Milliarden Dollar erhalten, darunter auch von der Deutschen Post, die »Alice« im DHL-Frachtverkehr einsetzen will. Air New Zealand, eine der wenigen Airlines mit glaubhaftem Ehrgeiz beim Klimaschutz, hat zugesagt, bis zu 23 dieser Maschinen für ihre Inlandsstrecken zu kaufen.

Die Neuseeländer haben auch Interesse an einem Konkurrenzprodukt aus Frankreich: an »Cassio«, einem Flugzeug mit 5 bis 12, später 19 Plätzen. Es kann vollelektrisch und besonders geräuscharm starten und landen; sollte es unterwegs mehr Reichweite brauchen, schaltet sich ein Verbrennungsmotor hinzu.

Der Prototyp ist schon über 10.000 Kilometer geflogen. Das Serienmodell »Cassio 330« wird jetzt auf der Paris Air Show erstmals vorgestellt; Ende 2024 soll es zugelassen werden. Gebaut wird es in Südwestfrankreich von dem Start-up VoltAero, und dessen Kopf und Mitbegründer ist in der Flugzeugbranche bestens bekannt: Jean Botti, 65.

Zehn Jahre lang, bis 2016, war Botti Chief Technical Officer im Vorstand von Airbus. Er weiß, wie Konzerne ticken – und warum es für sie so schwer ist, Innovationen hervorzu- bringen.

Bei Airbus hat Botti eine neue Abteilung für Elektroflieger geschaffen. Mit Absicht hat er sie aber außerhalb des Konzerns unter dem Namen Volt Air wie ein simuliertes Start-up angesiedelt, um es von Airbus möglichst abzuschotten. So ein Riesenunternehmen habe die destruktive Eigenart, dass jede frische Idee gleich von »zehn Leuten« zerredet werde. »Das System reibt dich auf«, sagt Botti.

Der vielfach ausgezeichnete Ingenieur hat 2010 den Bau eines ersten Mini-Elektrofliegers verantwortet, ein zweiter, der »E-Fan«, überflog 2015 den Ärmelkanal. Botti hatte 2014 auf der Berliner Luftfahrtmesse ILA freudig angekündigt, dass der »E-Fan« nun

»Wir dürfen die Luftfahrt nicht umbringen. Wer will schon im Schiff über den Atlantik fahren?«

Jean Botti, Flugzeugentwickler

in Serie gehe, überdies werde Airbus einen elektrischen Regionalflieger entwickeln für bis zu 80 Passagiere.

Aber was ist daraus geworden? Nichts. Botti kennt das nur zu gut: 1998 war er bei General Motors verantwortlich für die Brennstoffzelle, die das Automobil ab 2004 revolutionieren sollte. »Unsere Entwicklungsbudgets waren enorm«, sagt er, »aber wo sind wir heute?« Bei Flugzeugen sei es nicht anders.

Seine erste Konferenz zu Wasserstoffflugzeugen hat Botti bei Airbus 2008 abgehalten. »Jetzt haben wir 2023.« Zwar entwickelt Airbus nun tatsächlich mit gehörigem Aufwand drei Flugzeugmodelle mit Wasserstoffantrieb. 2035 soll das erste davon auf den Markt kommen – doch Botti ist skeptisch, ob das so schnell gelingt.

»Wenn es eine Firma gibt, die es kann, dann diese, Airbus hat das Geld und die Ressourcen«, sagt er. Aber selbst das reiche nicht. Für den neuen Treibstoff müssten sich auch

die Flughäfen eine parallele milliardenteure Infrastruktur anschaffen, unter anderem aufwendig zu sichernde Wasserstofftanks, in denen der Stoff bei –253 Grad Celsius gelagert werden muss. Wenn die Flughäfen sich der Infrastruktur verweigern, wird es unter den Airlines keine Käufer für Wasserstoffflieger geben, ganz gleich, wie gut die Airbus-Entwickler waren.

So wie Botti das sagt, klingt es, als ahnte er bei der Wasserstofffliegerei eine Wiederauflage des alten Hightech-Tricks: viel versprechen, wenig halten, weitermachen wie bisher. Er sagt aber auch, dass Airbus' Interesse an Wasserstofffliegern auch als Notfallversicherung verstanden werden könne. Falls nämlich etwa der Airbus A320 in Zukunft bestimmte Strecken wegen politischer Vorgaben nicht mehr bedienen dürfe, hätte der Konzern eine alternative Technologie parat, um überhaupt noch im Geschäft zu bleiben.

Boeing hat ebenfalls vor, frühestens 2035 einen kompletten Neuentwurf mit neuer Technologie auf den Markt zu bringen. Ein Kandidat dabei nennt sich »TTBW«, was für Transonic Truss-Braced Wing steht. Dabei geht es um Flugzeuge mit sehr dünnen und langen Tragflächen, die mit Streben am Rumpf verankert werden. Gemeinsam mit der Nasa will Boeing bis 2028 ergründen, ob diese Flügeltechnologie tatsächlich wie erwartet zu 30 Prozent Einsparungen im Treibstoffverbrauch führt.

Bis dahin baut Boeing weiter herkömmliche Flugzeuge, die bis weit nach 2050 im Einsatz bleiben. Der Konzern setzt aber darauf, dass sie künftig anders betankt werden. Schon heutige Triebwerke können nämlich auch Biokerosin nutzen, das aus altem Speiseöl und Schlachtabfällen hergestellt wird.

Dieses SAF (Sustainable Aviation Fuel) aus nachwachsenden Rohstoffen senkt den CO₂-Ausstoß um bis zu 80 Prozent, passt perfekt zur Infrastruktur der Flughäfen und lässt sich im Flugzeugtank mit fossilem Kerosin mischen. Zudem erzeugt SAF am Himmel auch deutlich weniger der klimaschädlichen Kondensstreifen.

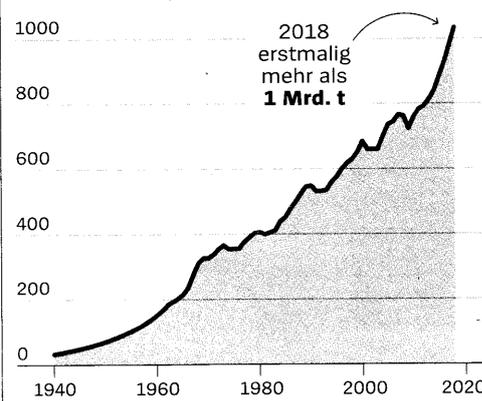
Das Biokerosin hat nur zwei Makel. Je nach Herstellungsweise ist es zwei- bis achtmal so teuer wie Sprit aus fossilen Energieträgern. Und: Es kann bislang nur tropfchenweise hergestellt werden. 2022 entsprach der Anteil von SAF an der Weltproduktion von Kerosin gerade mal 0,1 Prozent, rechnerisch nicht einmal ein Eimer für jeden kommerziellen Flug.

2050 aber wird die Welt für eine grüne Fliegerei enorm viel SAF brauchen, mindestens 500 Milliarden Liter pro Jahr. Wo sie herkommen sollen, ist bislang ein Mysterium.

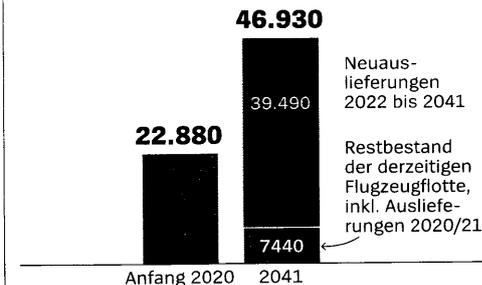
Die Mengen an entsorgungspflichtigem Frittierfett und Schlachtabfällen zur Gewinnung von SAF sind endlich. In Zukunft sollen mehr ölhaltige Pflanzen raffiniert werden, aber auch die dafür geeigneten Ackerflächen sind knapp. Manche Firmen versuchen, Hausmüll, Holzreste oder Algen in SAF umzu-

In schmutzigen Höhen

Globale CO₂-Emissionen durch Flugverkehr, in Mio. Tonnen pro Jahr

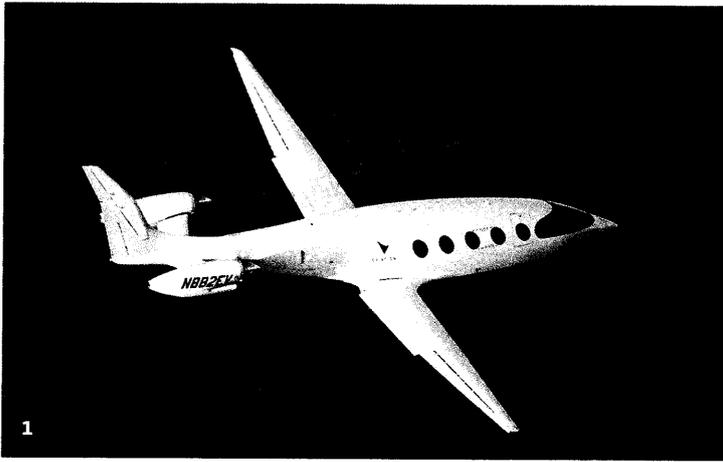


Prognostizierte Anzahl der Flugzeuge* weltweit bis zum Jahr 2041



* Passagierflugzeuge ab 100 Plätzen und Frachtflugzeuge ab 10 t Nutzlast

■ Quellen: Our World in Data, Airbus

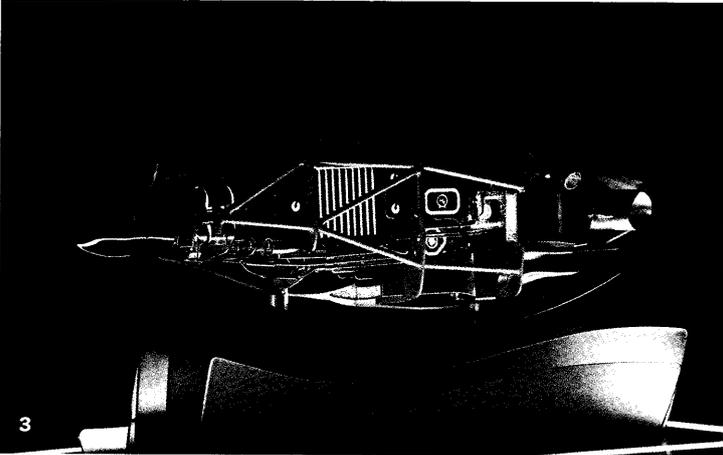


1



2

Gilles Rolle / REA / laif



3

Herve Gousse / Airbus



4

Illustration: Vaeridion / obs

wandeln, doch marktfähig sind diese Technologien noch nicht.

Mindestens 15 Jahre wird es noch dauern, bis ein anderes Verfahren namens PtL (Power to Liquid) zur Herstellung synthetischen Kerosins in industriellem Maßstab einsatzbereit ist. Viele setzen große Hoffnungen in die Technologie. Nötig sind dafür nur Wasser und das in der Luft vorhandene CO₂. Damit aus diesen Zutaten in komplexen Prozessen aber nachhaltiges E-Kerosin entstehen kann, sind gewaltige Mengen an grünem Strom notwendig. In diesem Szenario wird Europas Luftverkehr ab 2050 mehr Energie aus erneuerbaren Quellen verbrauchen als alle batterieelektrischen Autos der EU zusammen.

Die EU hat gerade in einem historischen Schritt beschlossen, den Fluglinien feste Vorgaben für den SAF-Einsatz zu machen. Ab 2025 muss jede Maschine mit mindestens zwei Prozent Biokerosin betankt werden. Dieser Anteil steigt: Ab 2030 müssen es sechs Prozent sein, in Fünfjahresschritten erreicht er 70 Prozent bis 2050.

Rasch wird sich daher in der EU ein erzwungener SAF-Boom ereignen. Existierende Raffinerien müssen immer schneller umgebaut werden, Hunderte SAF-Produktionsanlagen zusätzlich entstehen. Allein bis 2030

muss sich die SAF-Produktion in der EU in etwa verzehnfachen und danach massiv steigern.

Ob das machbar ist? »Menschen sind am effektivsten, wenn sie unter Druck stehen«, sagt Botti. Ohne Druck »werden sie abwarten«. Noch sei der Druck längst nicht hoch genug, »der Sprit ist ja da«. Aber die Wende nahe, sagt er, »ich sehe dafür überall Anzeichen«.

Botti glaubt an Elektroflieger auf der Kurzstrecke, auf Langstrecken sei SAF die einzige Hoffnung: »Wir dürfen die Luftfahrt nicht umbringen«, sagt Botti. »Wer will schon im Schiff über den Atlantik fahren?«

Mobilitätsforscher Gössling glaubt kein Wort von dem, was Hersteller und Airlines als technische Lösungen für das Klimaproblem präsentieren. Er hört ihnen schon zu lange zu – seit mehr als einem Vierteljahrhundert. Alles, was sie sagten, lasse sich so zusammenfassen: »Die Lösung ist immer in der Zukunft«, in Wahrheit verändere sich so gut wie nichts.

SAF hält Gössling theoretisch für gut, nur: »Die nötigen Volumina werden wir nicht produzieren können. Das ist in so kurzer Zeit nicht machbar«, sagt er.

Gössling spricht aus, was keine Airline, kein Flugzeugbauer je ein-

1 | Elektroflieger »Alice«

2 | »E-Fan« von Airbus mit dem damaligen Technikchef Botti 2015

3 | Wasserstofftriebwerk bei Airbus (Schnittmodell)

4 | Geplanter »Microliner« von Vaeridion (Illustration)

gestehen würde: »Wir müssen den Flugverkehr reduzieren.« Sonst bleiben alle Klimaziele illusorisch. Verhaltensänderungen, Verbote, höhere Preise, all dies sei nötig. Vor allem auf der Langstrecke müsse die Zahl der Flüge sinken, dort werden zwei Drittel allen Kerosins verfeuert.

Der Experte entwirft ein Gedankenspiel. Die Fluggesellschaften sollten aufgrund staatlicher Vorgaben ihr permanentes Wachstum aufgeben müssen. Wenn sie die Zahl der Sitze weltweit auch nur einfrieren, würden sich die Tickets wegen der gleichwohl seit Jahrzehnten steigenden Nachfrage verteuern. Damit stiegen wohl auch die Gewinne der chronisch profitschwachen Airlines. Von diesem Geld könnten sie die Transformation ihrer Branche zu mehr Klimaschutz selbst bezahlen.

Ein weiterer positiver Effekt der teureren Tickets: »Es würden vor allem noch Leute fliegen, die ein echtes Anliegen haben«, glaubt der Forscher.

Doch wer hat das, ein »Anliegen«? Geschäftsleute: ja, Touristen: nein? Der Gesellschaft stehe eine raue, aber notwendige Debatte bevor: »Wie viel Luftverkehr muss sein?«, fragt Gössling. »Wer soll, wer darf fliegen?« Marco Evers