

# Flugzeuge „lesen“ und verstehen lernen

Von Martin Binder, unter Mitarbeit von Nadine Hilbert, Margarete Lehmann, Felix Truschel und Samuel Wilhelm

## Fliegen als Thema von Technikunterricht

„Mancher [...] sieht sie und staunt und vermeint, die durch die Lüfte vermöchten zu schweben, müssten Unsterbliche sein.“ Gottähnlich erscheinen Ikarus und Dädalus in Ovids Sage. Sie fliehen aus der Gefangenschaft auf Kreta mit selbstgebauten Flügeln. Und während Ikarus von der Faszination des Fliegens übermütig wird und abstürzt, gelingt Dädalus die Flucht. Die Sage hat zumindest zwei Lehren: Werde nicht tollkühn. Lass dich aber auch nicht abhalten davon, Ideen beharrlich umzusetzen, nur weil es vor dir unmöglich schien.

Heute ist das Flugzeug bei größeren Entfernungen das schnellste und eines der sichersten Verkehrsmittel. Reisen ans andere Ende der Welt können zum Tagesausflug werden, in einer bis zwei Flugstunden erreichen wir jede Hauptstadt Europas. Es ist aber auch ein sehr umstrittenes Verkehrsmittel, weil es die ungünstigste Ökobilanz von allen hat und weil immer mehr Menschen rund um Flughäfen Tag und Nacht größten Belastungen ausgesetzt sind.

Im Technikunterricht gehört Flugtechnik zu den klassischen Themen, seit Jahrzehnten werden Bumerangs, Rotoren und Modellflugzeuge gebaut. Nach wie vor sehr hilfreich ist dazu das Kapitel „Flugzeuge“ im Band zur Maschinentechnik von Stührmann und Wessels (1981, 132 ff.). Aktuelle Beiträge findet man in tu 168 und 170 (s. u.).

Begibt man sich im Internet und in Handreichungen zum Unterricht auf die Suche nach Erklärungen, wie Flugzeuge funktionieren, dann stößt man überwiegend auf Erläuterungen zum dynamischen Auftrieb. Das ist aus verschiedenen Überlegungen heraus didaktisch fragwürdig.

Zum einen liefern alle physikalischen Erklärungen zusammen keine konsistente Erklärung des Fliegens. Auch wenn wir schon viel darüber wissen: Bis heute verstehen wir nicht, wie das genau funktioniert.

Zweitens ist das Wissen, über das wir verfügen, so abstrakt und unanschau-

lich, dass nicht selbst die meisten Erwachsenen daran scheitern. Die durchaus gängige Erklärung, der Luftstrom auf der Oberseite eines Flügelprofils sei schneller, weil dort der Weg länger wäre und daraus entstehe ein Auftrieb, mag einleuchtend klingen, ist aber schlicht falsch.

Drittens, und das ist gleichzeitig das zentrale technikedidaktische Argument, können mit dem Wissen über naturgegebene Wirkzusammenhänge nur einzelne Einflüsse auf Flugzeugtechnik erklärt werden, die nutzlos für ein Verständnis der sinngebenden Zusammenhänge bleiben. Offen bleiben dabei ausgerechnet die finalen Fragen: Weshalb wird überhaupt geflogen? Welche Formen von Fluggeräten gibt es? Welche technischen Lösungen für einzelne Probleme gibt es und nach welchen Gesichtspunkten erfolgt die Entscheidung für die eine oder die andere Variante? Welche Folgen hat der Flugverkehr: für Mensch, Gesellschaft und Natur?

## Ausgewählte Aspekte der Flugzeugtechnik

Zunächst sollen Einflüsse aufgezeigt werden, die die Entwicklung von Flugtechnik bestimmen. Dabei wird nach den Zwecken gefragt, nach den Personen und Firmen, ohne die keine Technik entstehen kann, und es wird auf die Interessenkonflikte geblickt, die mit dem Flugverkehr verbunden sind.

### 1. Zwecke und technische Lösungen

Die Bedürfnisse und Zwecke, für die Flugverkehr eine Lösung sein kann, sind vielfältig, in [Tabelle 1](#) sind ausgewählte dargestellt.

Die verschiedenen Zwecke werden in der Konstruktion z. B. nach VDI-Richtlinie 2221 zu Anforderungen konkretisiert (Ergebnis: Anforderungsliste). Daraus werden Funktionen beschrieben, die nach Wichtigkeit geordnet werden (Ergebnis: Funktionsstruktur). Das ganze System wird in Module gegliedert (Ergebnis: Baustruktur) und für die einzelnen Module werden Lösungen gesucht und entwickelt (Ergebnis: Wirkstruktur). Am Ende jeder dieser Schritte muss entschieden werden, ob die Aufgaben zumindest zufriedenstellend erledigt wurden und welche Vorschläge weiterverfolgt werden. Dabei fließen neben den nutzer- und produktbezogenen Funktionen<sup>1</sup> ökonomische, rechtliche, terminlich, logistische usw. Überlegungen ein. Daraus entstehen spezifisch auf die Anforderungen und Rahmenbedingungen abgestimmte technischen Lösungen. [Abbildung 1](#) zeigt das am Beispiel der Querschnitte<sup>2</sup> durch eine Passagier- und eine Frachtmaschine.

Ein kreisrunder Querschnitt wäre physikalisch betrachtet der günstigste, weil sich bei ihm die Kräfte, die durch den Unterschied zwischen Kabinen- und Außendruck vorhanden sind, optimal ausgleichen. Beim hier abgebildeten Airbus wurde davon abgewichen, um Raum für ein zweites Passagierdeck zu schaffen. Die Passagiere müssen nun relativ hoch einsteigen, was mit den Gangways eines Flughafens kein Problem darstellt. Der untenliegende Laderaum kann gut vom Rollfeld aus

Zwecke ...	... und daraus resultierende Anforderungen (Auswahl)
Warentransport	Sicherer Transport, auch bei Turbulenzen (Start, Flug und Landung); möglichst große Menge an Waren; schnelles Be- und Entladen; Einbinden des Transports in die Logistik von Expeditionen; Berücksichtigung der Vorschriften für Flugverkehr (z. B. Sicherheit, Emissionen) ...
Reisen von Menschen	Schnelles, sicheres Reisen; möglichst viele Passagiere; Bequemlichkeit und Wohlfühlen der Passagiere (aufrechtes Gehen zum Sitzplatz, Sicherheitstechnik wie Gurte und Sauerstoffmasken, bequemes Sitzen, Schlaf muss möglich sein, Blick ins Freie, Nahrungsaufnahme); Transport von Gepäck; Sicherheits- und Emissionsvorschriften; Ein- und Ausstieg in einer definierten Zeitspanne, auch in Notfällen ...
Freizeitgestaltung, Sport	1-2 Passagiere; kostengünstige Maschinen; geeignet für Piloten mit vergleichsweise wenig Erfahrung; start- und landefähig auf kurzen Rollfeldern; Vorschriften für Flugverkehr; spezifisch: Betrieb ohne Motor, besonders wendig ...
Militärische Zwecke	Hohe Geschwindigkeiten; Wendigkeit; Transport und Abfeuern bestimmter Waffen in definierten Mengen; landefähig unter spezifischen Bedingungen; Überwachung aus der Luft; schlecht von Radar erfassbar; Abwehr feindlicher Angriffe gegen die Maschine; spezifische Vorschriften für militärischen Flugverkehr, Demonstration von Stärke ...
Forschung	Transport und Betrieb von Laboreinrichtungen, Sensoren, Aufnahmegegeräten; Datenübertragung während dem Flug; Passagiere reisen im beruflichen Kontext ...

Tabelle 1: Zwecke und Anforderungen an die Lösungen.

beladen werden. Die Gänge auf den Passagierdecks befinden sich schon allein deshalb nicht an der Außenseite, weil dort ein aufrechtes Gehen nicht möglich wäre. Die Einengung der Kopffreiheit durch die Gepäckaufbewahrung über den Sitzen ist gut zu erkennen.

Bei der Antonow ist der Boden über eine relativ flache Laderampe befahrbar, was für eine Frachtmaschine einen enormen Vorteil darstellt. In der rechten Darstellung ist zu sehen, wie auch hier die physikalisch optimale Form dem Zweck des Flugzeugtyps untergeordnet wurde. Ein Zwischendeck würde das Laden von Gütern mit großen Abmaßen verhindern und eine zweite Beladungsebene schaffen, die

dann Hubmaschinen oder eine erhöhte Zufahrt erforderlich machen würde. An diesem Beispiel zeigt sich der Vorteil, Technik von den konkreten Nutzungshandlungen her zu analysieren. Dadurch erst erschließen sich die Interessen- und Zielkonflikte, die zu den konkreten technischen Gestaltungen führen.

## 2. Pioniere der Flugzeugtechnik

Oft hängt es von einzelnen Persönlichkeiten ab, wie sich ein ganzer Technikbereich entwickelt. **Otto Lilienthal** ist der berühmteste Flugpionier, weil ihm als Erster ein dokumentierter längerer Gleitflug gelang (1891 in Derwitz bei Potsdam). Er ist aber bei weitem nicht

der Einzige<sup>3</sup>: Wie so oft in der Technikgeschichte führte auch die Suche nach der Bewältigung des „Fliegeproblems“ (Lilienthal 1889, IV) zu Parallelentwicklungen.

Lilienthal war Konstrukteur und Inhaber einer Fabrik für Dampfmaschinen. Zunächst beobachtete er den „Vogelzug als Grundlage der Fliegekunst“, so der Titel seines berühmten Buches. Er führte Experimente durch, für die er Messgeräte und -verfahren entwickelte. Seine Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen dem Luftwiderstand und der Flügelstellung haben bis heute Gültigkeit. Er erkannte aber früh, dass der Vogelflug kaum als Vorbild für einen starren Flugapparat taugt (s. <http://www.lilienthal-museum.de/olma/34.htm>). Auf die Theorien zum Strömungsverhalten von Fluiden und Gasen in ummantelten Körpern von Bernoulli (1738) und Venturi (1797), die oft zur theoretischen Erklärung des Auftriebs herangezogen werden, griff Lilienthal nicht zurück.

Erfolgreich war er stattdessen bei der Entwicklung eines Flugapparats. Er optimierte schrittweise die Flügelformen, das Gestell und die Bespannung (ebd., 100 ff.). Seine ersten Flüge trugen ihn ungefähr 25 m weit. Das mag heute wenig klingen, setzt aber voraus, dass Lilienthal ohne Wissens- und Erfahrungsgrundlage den Sprung ins Unbekannte wagte, im wahrsten Sinne des Wortes. Schon zwei Jahre später gelangen ihm Flüge bis 250 m und drei Jahre nach dem Erstflug brachte er einen „Normalsegelapparat“ in einer ersten Kleinserie auf den Markt.

Lilienthal verunglückte 1896 in Berlin tödlich beim Versuch, die Flugdistanz



Abbildung 1: Querschnitte durch eine Passagiermaschine (Airbus A 380) und eine Frachtmaschine (Antonow An-124).

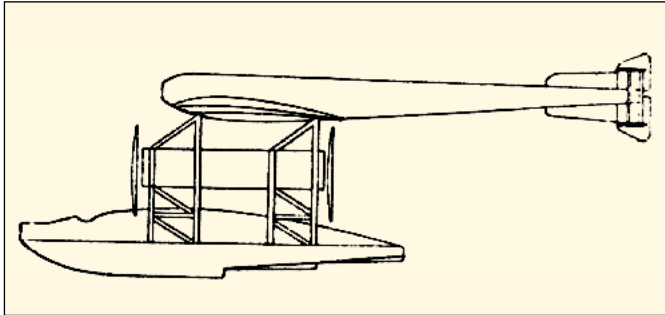


Abbildung 2: Dornier Rs III.



Abbildung 3: Die Do 27 von Bernhard Grzimek.

immer weiter auszudehnen. Mit seinem Pioniergeist und seiner Tatkraft hat er die Entwicklung von Flugzeugen wesentlich beeinflusst – und nebenbei die physikalische Erforschung des Fliegens überhaupt erst möglich gemacht.

Mit **Claude Dornier** soll ein zweiter wichtiger Pionier der Flugzeugtechnik genannt werden (nicht zuletzt auch, weil dieser Beitrag aus einem Kooperationsprojekt mit dem Dornier Museum in Friedrichshafen hervorging). Dornier arbeitete für die Zeppelin-Werke. 1914 wurde eine Abteilung unter seiner Leitung an das Seemoser Horn am Bodensee ausgelagert. Die „Abteilung Do“ sollte sich vorwiegend der Entwicklung von Flugbooten widmen. Ein erstes Modell, das „Riesenflugboot See I“ (Rs I), war noch nicht erfolgreich: Die Geschwindigkeiten genühten nicht für den Start, die Techniker bekamen die Probleme mit den „Fernwellen“ nicht in den Griff, die erlauben, Motor und Propeller getrennt voneinander unterzubringen. Drei Jahre später bewältigte das Nachfolgemodell Rs III (**Abbildung 2**)<sup>4</sup> aber schon eine Flugstrecke von über 1000 km.

Viele Flugzeuge der Firma Dornier gelten heute als Klassiker der Luftfahrttechnik, z. B. die Flugboote, die Senkrecht- und STOL-Maschinen (Short Take-Off and Landing). Die Do 27 (**s. Abbildung 3**)<sup>5</sup> war das erste deutsche Flugzeugmuster, das nach dem 2. Weltkrieg in die Produktion ging. Einer breiten Öffentlichkeit wurde sie durch den Tierfilmer Grzimek bekannt.

Das Fahrwerk ist einfach und robust gebaut, der Propeller hoch platziert. Die Rechteckflügel (s.u.: Tragflächenformen) haben einen hohen Strömungswiderstand, was höhere Geschwindigkeiten behindert. Dafür

bieten sie bei geringen Geschwindigkeiten schon relativ hohe Auftriebskräfte. All das erlaubt Starts und Landungen auf unbefestigten, auch grasbewachsenen Pisten. Unterhalb der Tür ist ein Trittbügel zu sehen, der aerodynamisch sehr ungünstig ist. Auch dieses Detail ist dem Einsatz fernab von Flughäfen mit Boardingtreppen geschuldet.

An der wechselvollen Firmengeschichte von Dornier lassen sich die wirtschaftlichen und politischen Einflüsse auf Technik gut nachzeichnen. Die Firma entstand u. a. mit dem Ziel, Militärgerät zu entwickeln. Vor und im Ersten und Zweiten Weltkrieg hatte sie daher aus nationaler Sicht strategische Bedeutung, ihre Rolle im „Dritten Reich“ ist im Dornier Museum dokumentiert. Jeweils nach den beiden Kriegen waren die Entwickler mit dem Problem konfrontiert, dass Deutschland der Aufbau einer Flugzeugindustrie untersagt war. Dornier ging daher Kooperationen im Ausland ein, u. a. in der nahegelegenen Schweiz und mit Fiat in Italien. So konnten weiterhin Flugzeuge entwickelt werden, ohne die Verträge offenkundig zu verletzen. Um wirtschaftlich abgesichert zu sein, diversifizierte sich Dornier in andere Anwendungsbereiche. So wurden schon zwischen den Kriegen erfolgreiche Textilmaschinen entwickelt. Aus den Forschungen zu den Starfighter-Abstürzen in den 1960er Jahren entstand in der Medizinsparte der Nierensteinzertrümmerer.

Mit der Beteiligung am westdeutschen Raumfahrtprogramm ab 1962 wurden so hohe Investitionen erforderlich, dass der Druck zur Fusion wuchs. Streitigkeiten zwischen den Familienmitgliedern begünstigten, dass die Firma schließlich an Daimler-Benz verkauft

wurde. Sie wurde zunächst mit anderen deutschen Firmen zur Deutschen Aerospace (DASA), später auf Druck der Bundesregierung mit europäischen Unternehmen zur EADS fusioniert. In der europäischen Einbindung wurde eine gute Möglichkeit gesehen, die deutsche Luftfahrtindustrie außenpolitisch salonfähig zu machen.<sup>6</sup>

Ein Blick in den Wikipedia-Artikel „Dornier-Werke“ gibt u. a. eine interessante Übersicht über die Flugzeugmuster aus dem Hause Dornier. In ihnen materialisieren sich die spezifischen Ziel- und Interessenkonflikte, unter denen die Konstrukteure arbeiteten.

### 3. Interessenkonflikte

Weil viele Menschen weit weg und auch „kurz mal“ in den Urlaub wollen und weil manche hunderte Kilometer zur Arbeit zurücklegen, wöchentlich oder sogar täglich – weil wir möglichst frischen Tee, Kaffee und Blumen aus den entferntesten Regionen der Welt kaufen wollen – weil eine schnelle Lieferung relevanter sein kann als höhere Transportkosten – aus diesen und anderen Gründen nehmen die zurückgelegten Flugkilometer in Deutschland Jahr für Jahr zu. Per Luftfracht wird eher hochpreisige Ware transportiert (s. tu 168, Wiemer et al. 2018, 23). Laut dem Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie setzte die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie 2016 ca. 37 Milliarden Euro um und beschäftigte 110.000 Personen.<sup>7</sup> Die zivile Luftfahrt hat daran einen Anteil von 73 %, die militärische von 20 % und die Raumfahrt von 7 %.<sup>8</sup>

Nun gibt es neben den Menschen, die als Reisende, Konsumenten und Arbeitnehmer von der Luftfahrt profitieren, leider auch solche, die von ihr





Abbildung 4: Winglet an einem A 380.

belastet werden, ohne zu profitieren. Mit zunehmender Flugdichte wird das „Fliegeproblem“ (s. o. Lillenthal) immer mehr zu einem vielschichtigen sozialen Problem. Unterschiedliche „Stakeholder“ verfolgen jeweils eigene Ziele und verfügen über unterschiedliche Einflussmöglichkeiten. Die Praxis des Flugverkehrs ist durch zahlreiche Konventionen, Normen und Gesetze reguliert. Ein Teil unserer Lebenspraxis wäre ohne Flugverkehr nicht realisierbar – man denke an weltweite Meetings von Unternehmen oder der Politik und an die Urlaubsziele.

Will man verstehen, wie ein Flugzeug zu seiner konkreten Gestalt kommt, muss man ein ganzes Geflecht an Einflüssen einbeziehen: die Bedürfnisse, Interessen und Möglichkeiten der Menschen, gesellschaftliche Konventionen, technikhistorische Entwicklungslinien und auch physikalische Wirkzusammenhänge. Das soll an einem weiteren Gestaltungsdetail illustriert werden: an den sogenannten Winglets an den Flügeln (s. Abbildung 4)<sup>9</sup>.

Winglets sind nicht erforderlich, damit ein Flugzeug abheben kann. Obwohl sie schon 1897 entwickelt wurden, setzten sie sich erst in der Folge der

Vorteile	Nachteile
Hohe Auftriebswerte bei niedrigen Geschwindigkeiten, günstig bei Steig- und Sinkflug	Erhöhter Luftwiderstand bei hohen Geschwindigkeiten
Höhere Wendigkeit um die Rollachse	Geringere Wendigkeit um die Gierachse
Treibstoffersparnis von bis zu 5 %	
Günstige Beeinflussung der Wirbelschleppen, die am Ende der Tragflächen entstehen	
	Höhere Biegemomente an der Tragfläche
Veränderte Flugeigenschaften v. a. bei der Landung mit stärkeren Seitenwinden	

Tabelle 2: Einflüsse von Winglets auf die Flugeigenschaften.

Ölkrise in den 1970er Jahren durch. Der Airbus A 310 war die erste Passagiermaschine, an der 1983 „Flügelendscheiben“ verbaut wurden – Vorläufer der Winglets, wie wir sie heute kennen. Sie bringen eine Reihe von Vor- und Nachteilen mit sich (s. Tabelle 2).

Zu sehen sind nicht einfach nur Vor- und Nachteile. Die zeilenweise Zuordnung verdeutlicht, dass z. B. die höheren Auftriebswerte bei Start und Landung mit einem Nachteil bei höheren Geschwindigkeiten erkauft werden müssen – der für Technik typische Kompromiss zwischen verschiedenen, auch konkurrierenden Zielsetzungen wird deutlich. Es muss eine Abwägung getroffen werden, die nicht einfach quantitativ generiert werden kann („4 Vorteile schlagen 3 Nachteile“). Vielmehr müssen die Einflussfaktoren gewichtet werden:

- Wie wichtig ist die Treibstoffersparnis? Oben wurde der hohe Warenwert in der Flugfracht genannt, sodass die Kerosinkosten u. U. nicht besonders ins Gewicht fallen. Wie ist das aber, wenn Passagierflüge von Berlin nach Madrid ab 50 € angeboten werden? Zum Vergleich: Bei ca. 2.300 km Fahrstrecke, einem Spritverbrauch von 5 l/100 km und einem Dieselpreis von 1,30 € würden mit dem Auto allein die Spritkosten 150 € betragen – bei 22 Std. Reisezeit! Wer würde also vom Fliegen abgehalten, selbst wenn die Kerosinkosten verdoppelt würden?
- Auftrieb im Steig- und Sinkflug: Wer profitiert davon, wenn eine Maschi-

ne steiler starten bzw. landen kann und wenn die Geschwindigkeiten dabei geringer werden? Wer die Proteste der Anwohner z. B. gegen die Verlängerung von Start- und Landebahnen kennt, weiß, weshalb Verbesserungen in diesem Bereich wichtiger sein können als höhere Kosten pro Flugkilometer.

- Beeinflussung der Flugsicherheit: Wirbelschleppen sind Felder mit Luftverwirbelungen, die unter und hinter einem Flugzeug entstehen. Sie führen dazu, dass Maschinen mit größeren zeitlichen Abständen landen müssen, um nicht durch alte Wirbelschleppen gefährdet zu sein – ein spürbarer Einfluss auf die Kapazität eines Flughafens. Außerdem können sie Dachziegel von Häusern im Anflugbereich abheben (s. Abbildung 5)<sup>10</sup>, was zu finanziellen Schäden führt und die gesellschaftliche Akzeptanz des Fliegens verringert.

### 5. Zusammenfassung: Technische Fragen zum Fliegen

Die Frage, wie das Fliegen funktioniert, kann auf ganz unterschiedliche Art beantwortet werden, zu jedem der bislang angeführten Aspekte ergeben sich andere Sichtweisen.

Physiker werden mit ihrem Wissen zum Auftrieb antworten. Sie werden die Eulersche Bewegungsgleichung, die Bernoulli-Gleichung, den Thomson’schen Wirbelerhaltungssatz und den Satz von Kutta-Joukowski zur Proportionalität des dynamischen Auftriebs zur Zirkulation bemühen. Am Ende müssen sie eingestehen, dass sie auch damit die physikalischen Zusammenhänge nicht vollständig erklären können.

Ingenieure werden über die physikalische Erklärung hinaus auf ihre Las-



Abbildung 5: Schlagzeile zu den Folgen von Wirbelschleppen in Berlin-Tegel.