

Die Flügel der Concorde.

Analogsimulation als Sichtbarmachung von Störung

Wissensknoten: Flüssigkeiten und Gase

Bereits in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts konnte der englische Mathematiker Benjamin Robins mithilfe eines ballistischen Pendels feststellen, dass die maximale Geschwindigkeit eines Geschosses nicht bloß von der Feuerkraft des Geschützes, sondern auch und entscheidend von dessen Form abhängt.¹ Ein Geschoss ist wie ein Schiff, das sich durchs Wasser schiebt, wobei allerdings der Widerstand des Mediums Luft erst bei sehr viel größeren Geschwindigkeiten relevant wird. Trotzdem war damit der entscheidende Paradigmenwechsel eingeleitet: Wer schnelle Autos und Flugzeuge bauen möchte, muss deren Form genauso sorgfältig planen wie ein Schiffskonstrukteur.

Beginnen wir also mit den Flüssigkeiten bzw. dem Wissen der Hydrodynamik. Flüssigkeiten befinden sich im Gleichgewicht, wenn jeder Widerstand gegen Formänderung gleich Null ist. Das heißt nichts anderes, als dass der Druck in der Flüssigkeit überall senkrecht auf der Fläche steht, auf die er wirkt. Allerdings sind Flüssigkeiten nahezu inkompressibel, wohingegen Gase stark kompressibel sind. Ein Schiff kann noch so schnell fahren, es wird das Wasser nicht zusammenpressen. Bei einem Flugzeug hingegen muss mit diesem Effekt buchstäblich gerechnet werden. Solange jedoch keine merkliche Volumenänderung eintritt, lassen sich Gase (zunächst) wie inkompressible Flüssigkeiten behandeln.²

Eine vollständige Kenntnis über die Bewegung einer Flüssigkeit wäre dann gegeben, wenn zu jedem Zeitpunkt der Ort und die Geschwindigkeit eines jeden Teilchens bekannt sein würden. Dies ist jedoch aufgrund der extrem hohen Teilchenanzahl und der damit verbundenen (Über-)Komplexität schlichtweg unmöglich. Es soll daher im Folgenden einfach davon ausgegangen werden, dass sich in einem ausgewählten Bereich, der zwar klein gegenüber dem Fahrzeug ist, sehr viele Moleküle mit einer bestimmten mittleren Geschwindigkeit in eine bestimmte mittlere Richtung bewegen. Unter dieser Voraussetzung kann deren Dichte bestimmt werden, also das Verhältnis von Masse zu Volumen. Die Dichte besagt, wie viele Moleküle sich beispielsweise in einem Würfel der Kantenlänge 1 cm befinden. Auf ein solches System von Würfeln, auch Strömungszustand genannt, wendete in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts erstmals der Mathematiker Leonhard Euler die Newton'schen Kraftgesetze an.

1 Vgl. Christian Kassung: Das Pendel. Eine Wissensgeschichte, München 2007, S. 91–100.

2 Vgl. Ludwig Prandtl: Tragflügeltheorie. Mitteilung I. In: ders., Albert Betz: Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik, Göttingen 2010, S. 9–35, hier: S. 17.

Bildwelten des Wissens
Band 15

Claudia Blümle, Claudia Mareis, Christof Windgätter (Hg.)

VISUELLE ZEITGESTALTUNG

DE GRUYTER

„Die Bewegungsgesetze für einen sich selbst überlassenen Körper, in Bezug auf die Fortsetzung der Ruhe oder Bewegung beobachtet, gelten eigentlich für unendlich kleine Körper, die als punktförmig angesehen werden können. In Körpern mit einer endlichen Größe, deren einzelne Teile unterschiedliche Bewegungen ausführen, versucht zwar jeder Teil diesen Gesetzen zu gehorchen, jedoch ist dies aufgrund der Beschaffenheit des Körpers nicht immer möglich. Dieser folgt daher selbst einer Bewegung, die aus den Bestrebungen seiner Einzelteile zusammengesetzt ist.“³

Mit anderen Worten konstruierte Euler 1755 eine Bewegungsgleichung für Strömungssysteme, die als partielle Differenzialgleichung dargestellt werden kann:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}_g + \vec{f}_p = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p$$

Auf der linken Seite dieser Gleichung steht, wie sich die Geschwindigkeit des kleinen Würfels verändert, also wohin er sich bewegen wird. Auf der rechten Seite stehen die auf den Würfel einwirkenden Kräfte: die äußeren Kräfte wie Gravitation – der Würfel wird ja aufgrund seiner Schwere auch nach unten gezogen – und die Druckkraft.⁴

Hiervon ausgehend, ließe sich fragen, wie ein solcher Strömungszustand visualisiert werden kann. Nehmen wir an, jeder der kleinen Würfel wäre mit einem Lämpchen ausgestattet und das ganze System würde einmal pro Sekunde fotografiert. Während der Belichtungszeit der Kamera bewegen sich die Lämpchen, so dass sie Striche in die Richtung ihrer Bewegung zeichnen. Und zwar umso längere Striche, je schneller sie sich bewegen. Das Ergebnis ist ein perfektes Vektorfeld $v(r)$, das keinerlei mathematische Kenntnis darüber voraussetzt, was ein Vektor ist. Verbindet man die Geschwindigkeitsvektoren mit einem Bleistift, ergeben sich die sogenannten Stromlinien. Diese Linien verlaufen überall in der Richtung der Strömung, das heißt, deren Tangenten zeigen stets in die Richtung des Geschwindigkeitsvektors des zugehörigen Würfelchens. Im realen Laborexperiment lässt sich diese Sichtbarmachung durch Fähnchen im Windkanal oder feine Rauchdüsen bewerkstelligen. ▶ **Abb. 1** Was zu der weiterführenden Frage führt, ob dem Muster der Stromlinien noch weiteres physikalisches Wissen eingeschrieben ist.

3 Leonhard Euler: *Mechanica Sive Motus Scientia Analytica Exposita*. Petropoli: Ex Typographia Academiae Scientiarum, Bd. 1, 1736, S. 37. Übers. C.K.

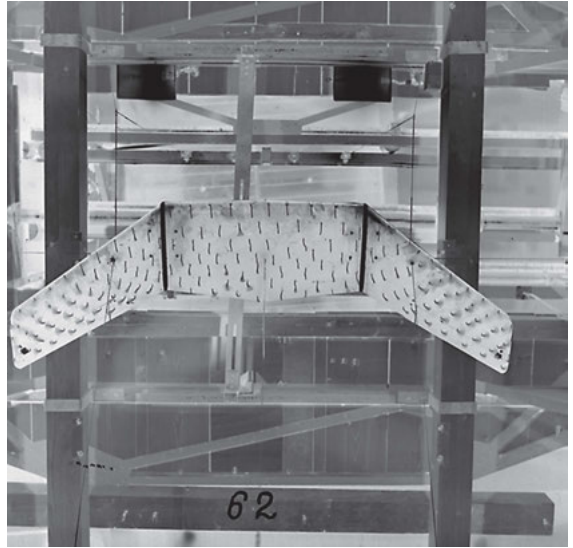
4 Vgl. Leonhard Euler: *Principes généraux de l'état d'équilibre des fluides*. In: *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin*, Berlin 1757, S. 217–273.

Nun gilt in Flüssigkeiten nicht nur die Kraft- oder Impulserhaltung im Newton'schen Sinne, wie sie Euler reformuliert hatte, sondern auch das Gesetz der Massenerhaltung. In Strömungen verschwinden keine Moleküle, und es tauchen auch keine neuen Teilchen auf. Um die Massenerhaltung oder Kontinuitätsgleichung auf Strömungszustände anzuwenden, wird eine sogenannte eindimensionale Strömung betrachtet, indem aus einer Stromröhre nicht mehr Würfel, sondern Stromfäden herausgeschnitten werden, also gedachte Röhrchen entlang der Strömung, durch die sich die Würfel bewegen und, das ist entscheidend, deren Geschwindigkeit, Druck und Dichte konstant sind. Die Stromfäden sind also die Materialisierung der Stromlinien.

Entlang dieser Stromlinien nun ist die Strömung stationär: Ihre Geschwindigkeit verändert sich nicht, das heißt, in der Euler-Gleichung ist der Ausdruck $\partial v / \partial t$ gleich Null. Mittels Integralrechnung verwandelt sich dann die Euler-Gleichung in nachfolgenden Ausdruck, den Vater Johann und Sohn Daniel Bernoulli zuvor in den beiden Werken *Hydrodynamica* (1738) und *Hydraulica* (1732/1739) publiziert hatten:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h + p = \text{const.}$$

Es gilt also die Konstanz der Bernoulli'schen Summe aus dynamischem Druck aufgrund der Strömung, Gravitationsdruck und statischem Druck entlang der Stromlinie. Mit anderen Worten ist die Geschwindigkeit dem Querschnitt eines Stromfadens umgekehrt proportional. Wo also die Geschwindigkeit groß ist, da drängen sich viele Stromfäden zusammen. Die Zahl der Stromfäden pro Fläche ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit an diesem Ort. Damit ist ein erster konkreter Hinweis auf das gegeben, was wir den Stromlinien ansehen können: Je dichter diese zusammenliegen, umso schneller ist die Bewegung an dieser Stelle. Und umso höher ist der Druck an dieser Stelle. Stromlinien visualisieren nicht nur die Richtung einer Strömung, sondern auch deren Geschwindigkeitsverteilung: Wer Beschleunigung gestalten will, der muss Linien verdichten. Womit wir zu den Stromlinien und deren Sichtbarkeit zurückgekehrt wären.



1: Sichtbarmachen der Strömung um einen abgestumpften Pfeilflügel mit Querruder, 1942.

Schallformen: Parabeln und Hyperbeln

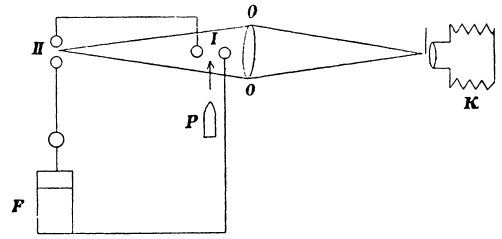
Im Gegensatz zu seinem Vater ging es Daniel Bernoulli darum, konkrete experimentelle Beobachtungen zu erklären. Dies ist besonders wichtig, weil es zeigt, wie eng Mathematik und Empirie, Episteme und Technik in der Hydrodynamik miteinander verknüpft sind. Dies gilt auch für die Sichtbarmachung der Schalldynamik, die nicht in den Laboren der Physiker und Ingenieure beginnt, sondern auf den Schlachtfeldern des Krimkriegs 1864 und des Deutsch-Französischen Kriegs 1870/71. Dort trat eine neue Art von Schussverletzungen auf: zerplatzte Knochen, zerrissene Weichteile, großflächige Austrittswunden. Diese ließen unmittelbar erkennen, dass die Geschosse der modernen Gewehre eine Sprengwirkung besaßen und nicht nur ein Loch in die Körper der Feinde bohrten, das in etwa ihrem Querschnitt entsprach. Der belgische Physiker Louis Melsens vertrat bereits 1872 die These, dass die Geschosse an ihrer Spitze quasi ein zweites Geschoss aus Luft mit sich führten. Es waren gar nicht die Kugeln selbst, die durch die Körper drangen, sondern eine Luftschicht, die jeden direkten Kontakt zwischen Mensch und Kugel verhinderte. Das Problem an Melsens Hypothese einer „projectile-air“ war das Fehlen eines sichtbaren Beweises und eine Strömungstheorie, die sich bis dato auf die inkompressiblen Fluide beschränkte.

So beginnen die Versuche von Ernst Mach und Peter Salcher, den Flug einer Gewehrku­gel fotografisch aufzuzeichnen, genau mit diesem Problem.⁵ 1884 gelingen die ersten Aufnahmen einer Kugel im Flug, doch ohne dass die vom Projektil mitgeführten Luftmassen aufgezeichnet werden. In der Folge greifen beide auf ein Verfahren zurück, das August Toepler Anfang der 1860er-Jahre entwickelt hatte: die sogenannte Schlierenmethode.

Eine Schliere ist nichts anderes als eine Stelle in einem lichtdurchlässigen Medium, an dem sich die Dichte verändert. Schlieren entstehen beispielsweise in alten Glasscheiben, in denen das Licht aufgrund unterschiedlicher Dichten in verschiedene Richtungen gebrochen wird. In gleicher Weise verändert eine Gewehrku­gel die Dichte der Luft, wenn ihre Geschwindigkeit im Bereich der kritischen Schallgeschwindigkeit liegt. Mach und Salcher verwenden nun einen von der Gewehrku­gel selbst ausgelösten Funken, um die Kugel zu beleuchten. **Abb. 2** Das durch die Schlieren hindurchtretende Licht wird von einer Sammellinse an einer Blendenkante gebündelt und fotografiert. Je nach Stellung dieser Blendenkante werden die regulär gebrochenen oder die irregulär gebrochenen Lichtstrahlen ausgeblendet. Der Funke leuchtet für etwa eine fünfhunderttausendstel Sekunde auf – eine Zeit, innerhalb derer die Projektile unge-

5 Vgl. hierzu beispielhaft ausführlich: Christoph Hoffmann, Peter Berz (Hg.): Über Schall. Ernst Machs und Peter Salchers Geschosßfotografien, Göttingen 2001.

fähr einen Millimeter weit fliegen. Da alles im Dunkeln liegt und die Kugel den Blitz direkt auslöst, muss kein Kameraverschluss mit dem Kugelflug synchronisiert werden.



2: Versuchsanordnung zur Geschossfotografie.

Im Mai 1886 liegen die ersten Aufnahmen vor. Sie zeigen eindeutig, dass eine Schallwelle eine Störung der Dichteverteilung der Luft darstellt und nicht etwa eine Masse, die durch den Raum transportiert wird. Neben den Schlieren am Kopf des Projektils fallen aber noch weitere Streifen auf, die an beiden Seiten des Projektilkörpers ansetzen und geradlinig nach hinten verlaufen. Sie sehen aus wie eine dreidimensionale Bugwelle eines Schiffs und werden deshalb Wellenkegel genannt. Es kommt zu zwei berühmten Aussagen. Erstens: „Die Luftmasse erscheint als ein das Projectil einhüllendes Rotationshyperboloid, dessen Achse in der Flugbahn liegt.“⁶ Die Form des Kegels ist also eine Hyperbel, eine fest definierte, einfache mathematische Kurve. Und zweitens: Der Sinus des Winkels zwischen Wellenkegel und Projektilachse ist gleich dem Quotienten von Schallgeschwindigkeit und Projektilgeschwindigkeit:⁷

$$\sin \alpha = \frac{v}{\omega}$$

Je schneller also die Kugel fliegt, umso kleiner der Winkel der Stoßwelle. Die Pointe der Schlierenmethode ist somit eine zweifache. Erstens kann man die Verdichtungen der Luft direkt sichtbar machen und damit auf die Geschwindigkeiten zurückschließen. Zweitens zeigt auch die Schlierenmethode Stromlinien und ist so gesehen entbehrlich. Es genügt theoretisch ein Objekt im Windkanal und etwas Rauch.⁸

Die Dinge weitergedacht, ergibt sich jedoch zwangsläufig ein nicht geringes Problem: Wie soll man und kann man überhaupt einen Windkanal bauen, bei dem die Luft auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt wird? Kann ein Medium, die Luft, schneller strömen als die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Information, dem Schall, in diesem Medium? Zur Jahrhundertwende gab es nicht wenige Stimmen, die dies verneinten. Und wie steht es um das Verhältnis von Technik und Ästhetik, wenn es doch gelänge, den Geschwindigkeitsbereich zu verlassen, in dem Stromlinien für gewöhnlich zu beobachten sind?

6 Ernst Mach, zit. nach Hoffmann, Berz (s. Anm. 5), S. 30.

7 Vgl. Ernst Mach, Peter Salcher: Photographische Fixirung der durch Projectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge. In: Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, 1887, Band 95, S. 764–780.

8 Vgl. hierzu auch das Forschungsprojekt zum Windtunnel an der Zürcher Hochschule der Künste, z. B. jüngst in: Florian Dombois, Mario Schulze (Hg.): Wind Tunnel Bulletin, 2018, Heft 8.

Formwissen: V2 und Concorde

Kaum ein Flugzeug hat die Ästhetik der Stromlinie derart nachhaltig geprägt wie die Concorde. Mit dem ersten Abheben des Prototyps 001 am 2. März 1969 – genau 61 Tage zuvor hatte die russische TU-144 bereits ihren Jungfernflug absolviert – erhielt der Überschallflug seine ikonische Form: den elegant geschwungenen Deltaflügel. Fortan war ein ziviles, wenn auch kostspieliges Durchbrechen der Schallmauer für Jedermann möglich. Der subsonische Geschwindigkeitsbereich ging nahtlos in den transsonischen über, zumindest solange, bis die Concorde ihren zweifachen ‚Heldentod‘ sterben musste: Der Unfall vom 25. Juli 2000 – eine schnöde Reifenpanne aufgrund eines Metallteils auf der Startbahn – durfte den Mythos nicht beenden, weshalb unter enormen Kosten die Tanks verstärkt und stabilere Reifen entwickelt wurden: für knappe zwei letzte Jahre Flugzeit.⁹

Was man auch an diesem ‚Heldentod‘ sieht: Die Concorde war ein zutiefst politisches Flugzeug. Entstanden im Kalten Krieg und in direkter Konkurrenz zur russischen Tupolev TU-144 ging es um die aeronautische Stärkung und Modernisierung Europas gegenüber Amerika wie um die westliche Beherrschung des irdischen Luftraums.¹⁰ Doch die Geschichte der Concorde fängt sehr viel früher an. Bereits 1943 entwickelte die Britische Regierung eine Konzeptstudie für ein Überschallpassagierflugzeug, allerdings wurden diese Ideen erst in den 1950er-Jahren wieder aufgegriffen, der Kooperationsvertrag zwischen Frankreich und England dann 1962 unterzeichnet. 1976 begann der regelmäßige Flugdienst, also nach über 13 Jahren Entwicklungszeit – die Konzeptphasen nicht eingerechnet. Über die Kosten gibt es unterschiedliche Angaben, ein realistischer Mittelwert liegt bei 5 Milliarden Dollar.

Ein Gutteil dieser Kosten ist in die Entwicklung der Flügelform gegangen. Sie ist das Ergebnis von 5.000 Stunden Windkanal.¹¹ Wie ist dann aber die Aussage zu verstehen, mit der Kenneth Owen in seinem Concorde-Buch das Kapitel über die Form der Tragflächen beginnt: „Wise men of aviation claim that ‘If an aeroplane looks right, it is right.’“¹² Oder Morien Morgan, der Direktor der RAE, der behauptet: „No one can question the loveliness.“¹³ Gibt es etwa eine tiefere Verbindung zwischen der

9 Zur medialen und mythischen Dimension des Unfalls vgl. Christian Kassung (Hg.): Die Unordnung der Dinge. Eine Wissens- und Mediengeschichte des Unfalls, Bielefeld 2009.

10 Vgl. Erik M. Conway: High-Speed Dreams. NASA and Technopolitics of Supersonic Transportation, 1945–1999, Baltimore, MD 2005, S. 66f. und Brian Calvert: Flying Concorde, St John’s Hill (Shrewsbury) 1982, S. 145–152.

11 Vgl. Ken Larson: To Fly the Concorde, Pennsylvania 1982, S. 44.

12 Kenneth Owen: Concorde. New Shape in the Sky, Hitchin (Hertfordshire) 1982, S. 33.

13 Morien Morgan: A New Shape in the Sky. In: The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, 1972, 76, S. 1–18, hier: S. 1.

visuellen Wahrnehmung einer Fahrzeugform und deren hydro- oder aerodynamischen Eigenschaften? Kann man Physik schlichtweg sehen?

Am 5. November 1956 machte Dietrich Küchemann, der seine Doktorarbeit am Göttinger Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung bei Ludwig Prandtl geschrieben hatte und nach dem Zweiten Weltkrieg nach England ausgewandert war, auf der ersten Sitzung des Supersonic Transport Aircraft Committee den entscheidenden Vorschlag: eine deltaförmig gepfeilte Tragfläche, die im vorderen Teil konvex, im hinteren Teil konkav geschwungen ist – wie die flamboyante Form der Spätgotik.¹⁴ Zuvor hatte man unter anderem eine m-förmige Tragfläche diskutiert.¹⁵ Der Gedanke dahinter: Je schneller ein Flugzeug fliegen soll, umso geringer muss der Strömungswiderstand der Tragfläche gemacht werden. Soweit teilt das Flugzeug das Problem eines jeden schnellen Fahrzeugs. Die beiden zentralen Lösungsstrategien heißen Pfeilung und Flächenregel.

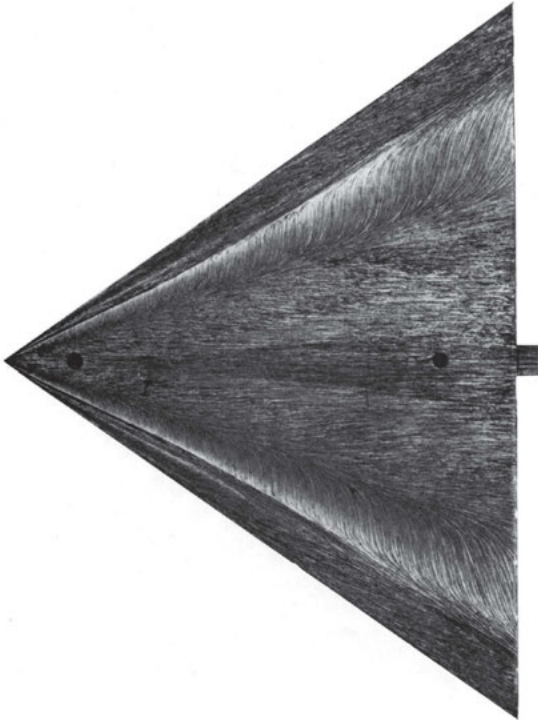
Die Pfeilung ist ein Konzept, das bereits 1935 von Adolf Busemann anlässlich des hoch politischen 5. Volta-Kongresses der Accademia d'Italia in Rom vorgetragen, bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs jedoch nur innerhalb Deutschlands weiterentwickelt und angewendet wurde. Liegt ein Flügel rechtwinklig zur Rumpfachse, dann wird er auch in Normalrichtung von den Luftteilchen angeströmt. Neigt man aber den Flügel um einen Winkel φ nach hinten, dann kann die Anströmgeschwindigkeit in eine normale und eine tangential Komponente zerlegt werden, wobei nur die normale Komponente wirksam ist: Der Strömungswiderstand verringert sich deutlich, weshalb schnelle Autos an ihrer geneigten Windschutzscheibe erkennbar sind. Die kritische Geschwindigkeit, bei welcher der Strömungswiderstand im Bereich der Schallgeschwindigkeit plötzlich steil ansteigt, kann über die Pfeilung verschoben werden. Busemann formuliert mathematisch: Für die wirksame Machzahl gilt $M=M_0 \cos \varphi$.

Das Wissen um die Pfeilung war von hohem militärischem Wert, weshalb die Patentierung 1939 geheim erfolgte, also ohne Bekanntmachung und Eintragung in die Patentrolle. Dem Patent waren umfangreiche Windkanalversuche von Alfred Betz in Göttingen zwischen 0,5 und 1,2 Mach vorausgegangen.¹⁶ Unabhängig von den intensiven deutschen Entwicklungen veröffentlichte Robert T. Jones erstmals 1945 eine theoretische Arbeit über den Pfeilflügeleffekt. Nach Kriegsende wander-

14 Vgl. Dietrich Küchemann, Eric Maskell: Controlled Separation in Aerodynamic Design. In: RAE Technical Memorandum Aero, März 1956, Heft 463.

15 Zur Genealogie der verschiedenen Tragflächenkonzepte vgl. Morgan (s. Anm. 13), S. 3–6.

16 Vgl. Werner Heinzerling: Flügelpfeilung und Flächenregel, zwei grundlegende deutsche Patente der Flugzeugaerodynamik. In: Arbeitskreis Luftverkehr der TU Darmstadt (Hg.): Neuntes Kolloquium Luftfahrt an der TU Darmstadt, Darmstadt 2002, S. 1–44, hier S. 5f.



3: Deltaplügel mit gerader Oberfläche bei 55° Anstellwinkel.

ten Personen, Geräte und Wissen um den Hochgeschwindigkeitsflug zügig in alliierte Hände.

Allerdings heißt Pfeilung zugleich, dass der Auftrieb verringert wird, wodurch das Flugzeug bei geringen Geschwindigkeiten möglicherweise nicht mehr stabil bleibt. Und genau hier liegt der zentrale Unterschied zum Auto, dessen Form auf hohe Geschwindigkeiten hin optimiert werden kann – weshalb Rennfahrzeuge der Formel-1 ähnliche Grundformen aufweisen. Dagegen stellt jedes Flugzeugdesign grundsätzlich einen Kompromiss dar, und genau deshalb wurde so lange um die Flügelform der Concorde gerungen: „no single speed could be taken as the design speed since subsonic, transonic and supersonic performance were all important.“¹⁷

Was die Concorde nun bei geringer Geschwindigkeit in der Luft hält, ist nicht ihr Auftrieb, sondern sind Luftwirbel, die gezielt an der Vorderkante der Tragfläche entstehen und das Flugzeug nach oben ziehen, natürlich bei entsprechend erhöhtem Luftwiderstand. ➤ **Abb. 3** Dies ist der Punkt, an dem die Geschichte der Concorde-Tragflächen wieder zu Maskell und Küchemann zurückfindet: In ihrem Papier von 1956 greifen sie auf die Pfeilung von Busemann/Jones zurück, schlagen aber gleichzeitig vor, „that one could positively stimulate a separation pattern that could be made to generate a stable system of free vortex layers that would exhibit a regular growth with increasing incidence“.¹⁸ Anders formuliert: Bei jedem Tragflügel treten Strömungsablösungen auf, und zwar für gewöhnlich dort, wo sich zum Tragflächenende hin der Querschnitt verringert und deshalb nach Bernoulli einen Druckanstieg erzwingt. „The real issue was not whether separation occurred or not, but where it occurred.“¹⁹

¹⁷ Owen (s. Anm. 12), S. 41.

¹⁸ Owen (s. Anm. 12), S. 38.

¹⁹ Morgan (s. Anm. 13), S. 7. Vgl. auch Eric C. Maskell: Flow Separation in Three Dimensions. In: RAE Report Acro, Nov. 1955, 2565.

Ins Visuelle zurückübertragen heißt das: Je stärker die Luft oberhalb der Tragflächen kondensiert, je mehr Schlieren man dort sieht, umso besser geht die Rechnung auf. ➤ **Abb. 4** Die Bernoulli-Gleichung wird also erneut sichtbar. Dicht aneinandergesprente Stromlinien bedeuten zwangsläufig einen höheren Druck, womit die Tragfläche nach oben gezogen wird.



4: Vortex lift der Concorde.

Damit ist die Form der Concorde theoretisch vollständig, denn die Luftwirbel entstehen bei großem Anstellwinkel, weshalb die Nase der Concorde abgesenkt werden muss, damit die Piloten bei der Landung überhaupt etwas sehen können. Doch das zentrale Problem an der Strömungsablösung bleibt, dass sie als chaotisches Verhalten weder exakt berechenbar noch exakt vorhersehbar ist. Sie ist das Gegenteil von schönen stationären Stromlinien: hässliche Turbulenzen, die sich aufgrund von kleinsten Flügellunebenheiten stark verändern und deshalb im Windtunnel auch nur bis zu einem gewissen Grad simuliert werden können – je größer das Modell, umso genauer. Der Maßstab der verwendeten Concorde-Modelle reichte von 1/75 bis 1/6. Ziel dieser Visualisierungen war es, die vormals als hässlich erachteten Luftverwirbelungen nicht zu minimieren, sondern sie vielmehr kontrolliert auf die Flügeloberseite zu zwingen.

Das zweite zentrale Designkonzept schneller Flugzeuge ist die sogenannte Flächenregel. In Dessau entwickelte der österreichische Ingenieur Otto Frenzl für die Firma Junkers Flugzeug- und Motorenwerke den Hochgeschwindigkeitswindkanal HK 900, um den Luftwiderstand unterschiedlicher Flügelformen zu untersuchen. Dabei entdeckte er, dass sich der Strömungswiderstand minimieren lässt, wenn die Querschnittsflächen des Flugzeugs in Längsrichtung möglichst stetig an- und dann möglichst stetig absteigen, bei so geringem Gesamtquerschnitt wie möglich. ➤ **Abb. 5** Was bedeutet dies für die sichtbare Form eines Flugzeugs? Beispielsweise erhöht sich an der Stelle des Rumpfes, an der die Flügel ansetzen – zumal, wenn diese nicht gepfeilt sind – der Querschnitt sehr stark. Möchte man derartige Diskontinuitäten gemäß der Flächenregel vermeiden, so bietet es sich an, im Bereich der Flügel den Querschnitt des Rumpfes zu verringern. Mit anderen Worten: Ein schnelles Flugzeug besitzt – genau wie die Coca-Cola-Flasche seit 1915 – eine schmalere Taille. Zwar ist diese bei der Concorde aufgrund ihres langgestreckten Rumpfes kaum zu erkennen, aber es ist vielleicht gerade diese unmerkliche Verjüngung, die formgebend wirkt. ➤ **Abb. 6**

Was haben nun diese beiden theoretischen Konzepte der Pfeilung und der Flächenregel mit den Stromlinien zu tun? Der entscheidende Punkt ist, dass die Form der Concorde nicht errechnet wurde. Es gab noch keine Computer, die in der Lage gewesen wären, die numerische Strömungssimulation durchzuführen. Die Form der Concorde basiert also nicht primär auf den theoretischen Konzepten von Pfeilung und Flächenregel, sondern auch und vor allem auf den experimentellen Techniken und Praktiken, die zur Entwicklung dieser Konzepte geführt haben: der Simulation im Windkanal mit Visualisierung der Strömungen und analoger Messung der Kraftwirkungen. Insofern, ausgehend von der Kontinuität der formerzeugenden Praktiken, ist die Concorde – bei aller Unterschiedlichkeit der Gestalt – ein Nachfahre der V2. Gleichzeitig könnten die Unterschiede nicht größer sein: Vergeltungswaffe versus ziviles Verkehrsmittel, Rakete versus Flugzeug, begrenzte versus freie Flugbahn und so weiter. Doch wären beide Flugkörper nicht möglich gewesen ohne einen Ultraschallwindkanal, in dem die Simulation eines Hochgeschwindigkeitsflugs mit Hunderten von unterschiedlichen Modellen möglich ist.

Was zu Ludwig Prandtl und nach Göttingen zurückführt. Das Medium der Stromlinie ist die Luft. Erst deren Kompressibilität erlaubt es, dass sich Informationen darin bis zu einer gewissen Geschwindigkeit ausbreiten. Nun gibt es aber Dinge, die sich schneller bewegen können als das Medium selbst und damit dessen Gesetze schlichtweg auf den Kopf stellen: Was passiert, wenn ein Ding seine eigene Welle überholt, schneller fliegt als die Spuren, die es hinterlässt?²⁰ Welche Gesetzmäßigkeiten treten hier an die Stelle der einfachen Verhältnisse Bernoullis? Und schließlich: Müsste die Geometrie, die Form dieser schnellsten Geschwindigkeit nicht eine grundsätzlich andere sein?²¹

Eine Antwort auf diese Fragen kann nur ein Windkanal geben, der mit Überschallgeschwindigkeit arbeitet. Windkanäle gibt es seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, doch mit dem Problem der Überschallströmung von Gasen beschäftigte sich nach der Jahrhundertwende erstmals der Physiker Prandtl. So entsteht 1904 der Windkanal der Modellversuchsanstalt für Aerodynamik der Motorluftschiff-Studien-gesellschaft in Göttingen. Hier ging es zunächst um die beste Form für Luftschiffe, also für extrem langsame Fahrzeuge. Im Verlauf des Ersten Weltkriegs kam dann die Gestaltung von Flugzeugrümpfen und -tragflächen hinzu, die Geschwindigkeit nahm

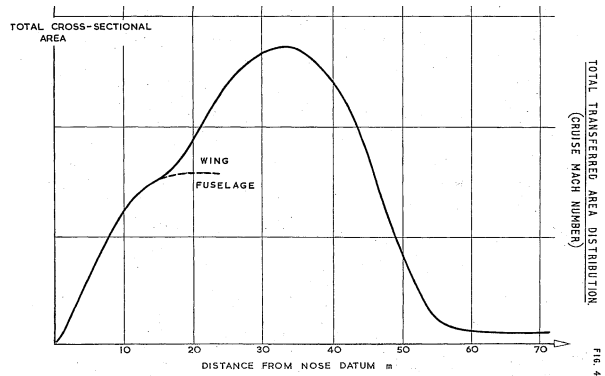
20 Vgl. zu dieser medientheoretischen Überlegung auch Peter Berz: *Mach 1*. In: Hoffmann, Berz (s. Anm. 5), S. 381–453, 397f.

21 Ich lasse im Folgenden den sehr wichtigen Aspekt der Materialität außen vor, vgl. hierzu beispielsweise Susanne Falk, Roland Schwarz: *Aluminium – Metall der Moderne*. In: Werner Schäfke et al. (Hg): *Aluminium. Das Metall der Moderne. Gestalt Gebrauch Geschichte*, Köln 1991, S. 27–70.

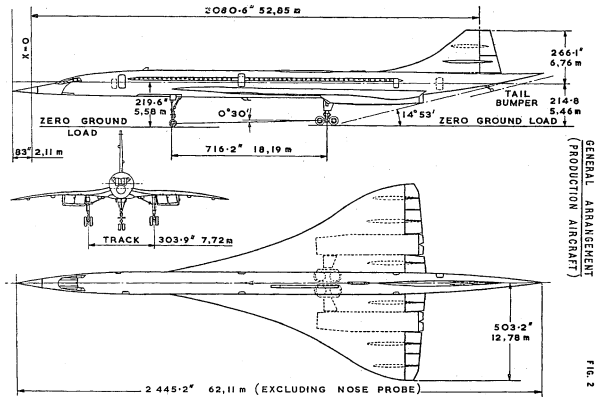
also zu. Als der Vertrag von Versailles den Wiederaufbau der Luftstreitkräfte verbot, wurden die Windkanäle zur Karosserieentwicklung von Autos genutzt: So kam etwa 1921 das „Tropfenauto“ des Flugzeugbauers Edmund Rumpler zu seiner legendären Form. Enger sind sich Land- und Luftfahrzeuge in ihrem Design niemals gekommen, aber weiter voneinander entfernt waren die Theorie des Überschalls und die experimentelle Praxis ebenfalls nie. Es ist also alles andere als verwunderlich, dass sich die Stromlinie, unmittelbar aus den Windkanalversuchen mit Luftschiffen und Flugzeugen hervorgegangen, seit den 1930er-Jahren auch im Rennwagenbau immer mehr durchsetzte. Der ungarische Ingenieur Paul Jaray, der zunächst bei Zeppelin gearbeitet hatte, ließ sich 1922 einen stromlinienförmigen Serienwagen patentieren.

Die Situation um 1935 lässt sich damit wie folgt zusammenfassen: Paradoxer oder bezeichnenderweise entwickelt sich gerade im segelfliegenden Deutschland die Theorie des Überschallflugs rasant. Das imaginäre Potenzial dieses Raums jenseits der Schallmauer ist enorm:

Das Fliegen mit Überschallgeschwindigkeit wird also wahrscheinlich ein Traum bleiben. Es ist, wenn man an militärische Verwendung denkt, ein sehr verlockender Traum, denn auch der Flugzeugschall kann sich hier nur im Inneren des Machschen Kegels ausbreiten; es würde also das Flugzeug seine Bomben bereits geworfen haben, ehe man überhaupt etwas von ihm zu hören bekommt.²²



5: Flächenverteilung der Concorde.



6: Konstruktionsskizzen der Concorde.

22 Ludwig Prandtl: Die Rolle der Zusammendrückbarkeit bei der strömenden Bewegung der Luft. In: ders.: Gesammelte Abhandlungen zur angewandten Mechanik, Hydro- und Aerodynamik. Erster Teil, Berlin/Heidelberg 1961, S. 1046–1058, hier: S. 1056.

So entstanden die ersten Überschallwindkanäle nahezu zeitgleich, während Göring offiziell den Bruch mit dem Versailler Vertrag vollzog, weiterhin aber im Unterschallbereich geflogen wurde, weil es erstens noch keinen Turbinenantrieb und zweitens noch keine dazugehörige Theorie bemannter Flugobjekte gab. Bevor im Sommer 1939 in Peenemünde mit der experimentellen Raketenforschung begonnen wurde, konnte am Institut für Strömungslehre der TU Aachen eine Fläche von $0,1 \times 0,1$ m mit bis zu 3 Ma beforscht werden, in Göttingen der gleiche Querschnitt mit 1,2 Ma, nicht zu vergessen Zürich unter der Leitung von Jacob Ackeret. In Peenemünde konnten dann erstmals $0,4 \times 0,4$ m mit bis zu 4,4 Ma beströmt werden, allerdings nur im unterbrochenen Betrieb für etwa 20 Sekunden. Dies war der Experimentalraum, in dem die Form eines Flugobjekts entstand, das nicht Bomben abwarf, sondern selbst eine Bombe war: das Aggregat 4, besser bekannt unter dem Propagandanamen V2. Es wird in Feindesland eingeschlagen sein, bevor man es gehört haben wird – ein doppeltes *futurum exactum* im Jahr 1939.²³

Was ist nun die entscheidende wissenshistorische Verschaltung von V2 und Concorde, von Rakete und Flugzeug? Die Antwort auf diese Frage ist so überraschend einfach wie die daraus resultierenden Probleme weitreichend sind. Einem Geschoss wird zur Stabilisierung der Flugbahn ein Drehmoment mit auf den Weg gegeben, Raketen und Flugzeuge aber drehen sich gerade nicht um die eigene Achse, sondern sind selbststeuernd; beide benötigen daher Flügel.²⁴ Und aus den Raketenleitwerken werden dann, in einem Wissenstransfer von 1.500 Tonnen Papierdokumenten an die USA, unter der Leitung von Theodor von Kármán, die *sweepback wings* der B-47 Bomber, die den nicht gepfeilten B-29 ablösen.

Egal also, ob 911, V2, B-47 oder Concorde: Die Stromlinie ist der epistemische Knoten, der die Form schneller Dinge mit dem Wissen um Geschwindigkeit verbindet. Und der Windtunnel ist der Analogcomputer, in dem sich hydrodynamisches Wissen als Sichtbarkeit von Schlieren, Nebelzügen oder Windfähnchen materialisiert. Rechnen und Abbilden sind darin nicht voneinander zu trennen, sie finden als gemeinsame Praxis im Experimentalraum des Windkanals statt.

23 Vgl. UAH/HVP Archiv Nr. 66/11, Denkschrift über die Windkanäle der Heeres-Versuchsstelle Peenemünde, 1. Juni 1939, S. 3, zit. nach Sebastian Klapdor: Der Technologietransfer Deutschland–USA nach dem Zweiten Weltkrieg am Beispiel der Kochel Windkanalanlage, Norderstedt 2004, S. 18.

24 Vgl. Berz (s. Anm. 20), S. 406.