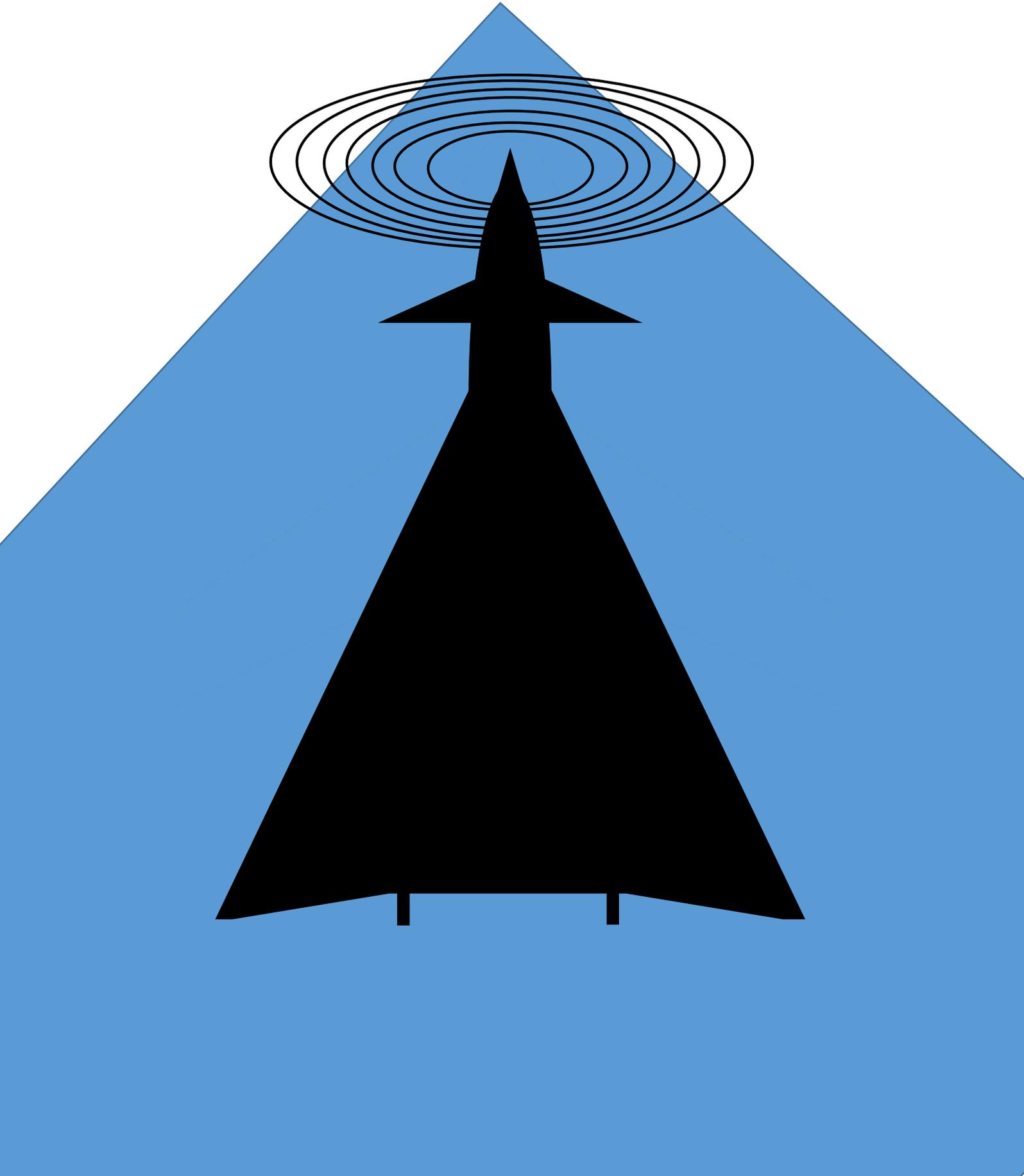


Überschallflugzeuge



Überschallflugzeuge

Inhaltsverzeichnis

1	Danke an	3
2	Einleitung	3
3	Die Anfänge	4
4	Düsentriebwerke	6
4.1	Was ist dann ein Mantelstromtriebwerk?	7
4.2	Nachbrenner	8
4.3	Supercruise	9
5	Raketentriebwerke	10
6	Staustrahltriebwerke	11
7	Bell X-1	12
8	Lockheed Martin F-22 <i>Raptor</i>	13
9	Lockheed Martin SR-71 <i>Blackbird</i>	14
10	North American XB-70 <i>Valkyrie</i>	16
11	Hyperschall	18
11.1	North American X-15	19
11.2	Boeing X-43	20
12	Überschall Passagierflugzeuge	21
12.1	<i>Concorde und Co Projekte</i>	22
12.2	BOOM Airliner	25
13	Schlussfolgerung	26
14	Quellen	27
14.1	Internetquellen	27
14.2	Bücher- und Zeitungsquellen	27
14.3	Bildquellen/Abbildungen	28

1 Danke an

Béatrice Eifes (tutrice)

Christian Speicher (Vater) für sein Interesse und Wissen seit der Kindheit

2 Einleitung

Seit jeher träumen Menschen vom Fliegen und auf einmal, vor ungefähr 150 Jahren, ging alles ganz schnell, viele verschieben sich dem Experimentieren mit Fluggleitern, Otto Lilienthal glitt so als erster Mensch durch die Lüfte. Mit der Erfindung des Motors waren neue Möglichkeiten geschaffen, 1903 schafften die Brüder Wright den ersten Motorflug der Geschichte und mit dem 1. Weltkrieg fanden Flugzeuge erstmals Einsatz. Im zweiten Weltkrieg wurde Strahltriebwerke und Raketentriebwerke erfunden... Aber die Geschichte später nochmal im Detail (siehe Kapitel 4).

Ich will mich mit diesem Thema beschäftigen, da es ein Thema ist, über welches ich noch praktisch nichts weiß. Doch das ist nicht so, weil es mich weniger interessiert, im Gegenteil es interessiert mich sehr. Ich erhoffe mir mit dieser Arbeit mein Wissen und vielleicht auch das des Lesers zu erweitern, in diesem Sinne viel Spaß beim Lesen.



Abbildung 1: Lockheed Martin F-35 Lightning II im Flug / Quelle: google

3 Die Anfänge

Alles begann im 2. Weltkrieg, Flugzeuge mussten immer schneller werden, und da das Limit von mit Propellern betriebenen Flugzeugen erreicht war mussten neue Lösungen her. Zwar konnten einige Flugzeuge nah an die Schallgeschwindigkeit herankommen, doch oft waren an dem Punkt die Belastungen schon so hoch, dass die Flugzeuge einfach auseinanderbrachen. Deswegen wurde damals auch die Schallmauer als undurchdringlich eingestuft, es



Abbildung 2: North American P-51 Mustang im 2. Weltkrieg / Quelle: bing

war die Grenze der zu erreichenden Geschwindigkeit mit Flugzeugen. Kriege bringen technischen Fortschritt, im Zweiten Weltkrieg wurde das Düsentriebwerk erfunden, dadurch waren Flugzeuge jetzt viel schneller. Doch da Strahltriebwerke erst gegen Ende des Zweiten Weltkriegs erfunden wurden, war die Errungenschaft der Menschheit die Flugzeuge schon kurz danach die Schallmauer durchbrechen lies eine Andere: Das Raketentriebwerk (siehe Kapitel 5). Kurz nach dem Zweiten Weltkrieg wurde so schon in den USA mit der Bell X-1 der Durchbruch der Schallmauer geschafft (siehe Kapitel 7).

Schall ist das Geräusch, das ein Objekt erzeugt, Schwingungen in der Luft die Lebewesen hören können. Diese Schallwellen haben eine bestimmte Geschwindigkeit, die vom Luftdruck und Temperatur beeinflusst wird, so nimmt sie in zunehmender Höhe ab. Sie beträgt zum Beispiel bei $-56,5\text{ °C}$ = ungefähr 11 Kilometer Höhe, also die Reisehöhe für Passagierflugzeuge, 1062 km/h.

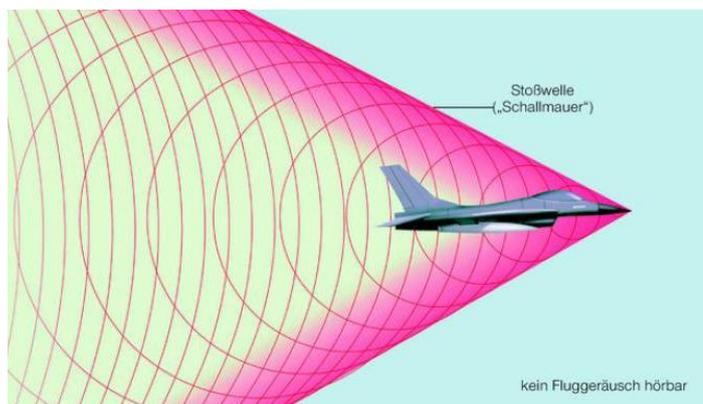


Abbildung 3: Abbildung der von einem Flugzeug ausgehenden Schallwellen; demnach würde sich das Flugzeug wenn es Überschall fliegt vor diesen Wellen befinden / Quelle: Google

Wenn sich ein Flugzeug der Schallmauer nähert wird die Luft an den Vorderkanten des Flugzeugs komprimiert, diese Luftverwirbelungen sind sichtbar, es ist der Lufttrichter, den man kurz vor der Durchbrechung der Schallmauer sieht. So erhöht sich der Luftwiderstand des Flugzeuges abrupt, deswegen brauchen die meisten Überschallflugzeuge einen Nachbrenner, der ihnen den nötigen Zusatzschub verleiht, um die Schallmauer zu durchbrechen. Das ist auch einer der Gründe warum Propellerflugzeuge keine Überschallgeschwindigkeit erreichen können. Außerdem vergrößert sich der Luftwiderstand eines Flugzeuges kurz vor dem Durchbrechen der Schallmauer erheblich, was bei einem Propeller, der sich irgendwann nicht mehr schnell genug drehen kann, natürlich ein Problem darstellt. Man kann die Schallmauer also nur mit sehr aerodynamischen Flugzeugen wie zum Beispiel Kampffjets durchbrechen. Außerdem muss der Antrieb viel mehr Schub liefern als nötig wäre, um das Flugzeug in der Luft zu halten, um auch sicher den Durchbruch der Schallmauer zu schaffen.



Abbildung 4: Eine Boeing F/A 18 Super Hornet beim Durchbrechen der Schallmauer / Quelle. Google

4 Düsentriebwerke

Passagierflugzeuge wie wir sie kennen fliegen mit Hilfe von Düsentriebwerken, schwer zu glauben, dass das Konzept bei Überschallflugzeugen das gleiche ist. Der „Feuerschweif“ der oft zu sehen ist, ist der Nachbrenner, den die meisten Flugzeuge brauchen, um Überschall zu erreichen (siehe Kapitel 4.2). Einige moderne Kampffjets brauchen keinen Nachbrenner mehr um langfristig Überschallgeschwindigkeiten fliegen zu können Diese Fähigkeit nennt man Supercruise (siehe Kapitel 4.3).

Grundsätzlich hat ein Düsentriebwerk genau das gleiche Ziel wie ein Propellerantrieb auch: anströmende Luft schneller zu machen und so einen Vorwärtstrieb zu erzeugen. Doch ein Düsentriebwerk, vor allem moderne Mantelstromtriebwerke, nutzen mehrere Techniken, die in einem Triebwerk vereint werden. Wenn man Luft erhitzt dehnt sie sich aus, dieses Phänomen wird benutzt, um den Jetstrahl zu erzeugen der das Flugzeug nach vorne bewegt. Bei einem Düsentriebwerk wird die Luft zunächst verdichtet, um die Temperatur und den Druck der Luft zu erhöhen, dazu wird sie durch eine Reihe von Verdichtern getrieben. Außerdem führen die Verdichter der Luft auch Energie zu, die erhalten wird, um eine Turbine hinter der Brennkammer zu drehen. Danach wird die Luft in der Brennkammer entzündet und die Luft dehnt sich abrupt aus. Vereinfacht wird also ein Hochgeschwindigkeitsstrahl erzeugt, je schneller dieser Strahl, desto mehr Schubkraft hat ein Triebwerk, dieser Schub befördert das Flugzeug nach vorne. Kurz gesagt ist es das Zusammenspiel des Verdichters, der Brennkammer und der Turbine, die am Ende die einströmende kalte Luft in einen heißen schnellen Luftstrahl umwandeln. Das ist ein Strahltriebwerk in vereinfachter Form erklärt, doch in Wirklichkeit kommen noch je nach Art des Triebwerks noch andere Verdichter und Turbinenschaufeln hinzu.

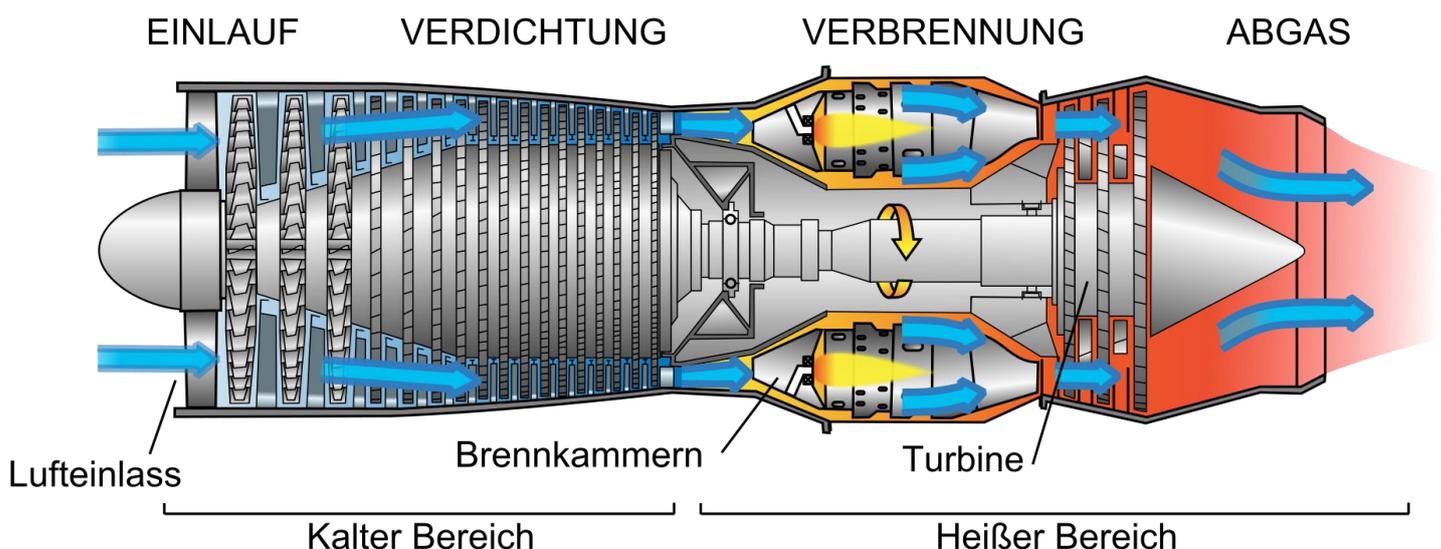
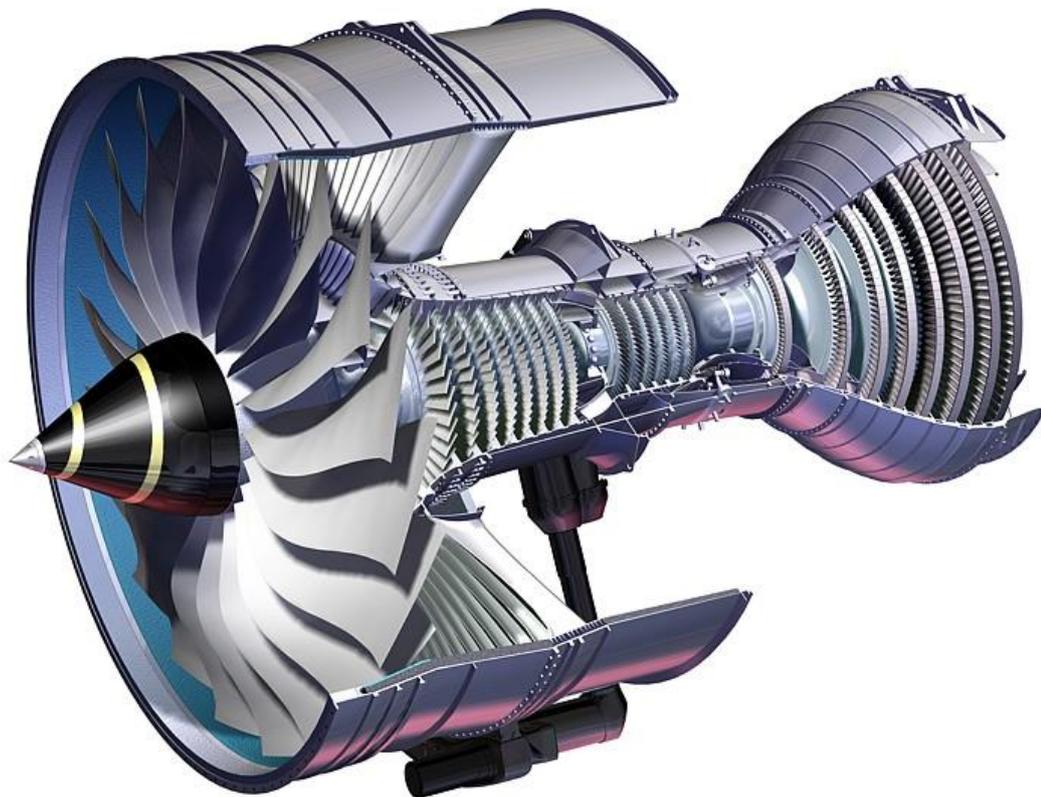


Abbildung 5: Aufbau eines Düsentriebwerks / Quelle: Google

4.1 Was ist dann ein Mantelstromtriebwerk?

Nicht zu verwechseln sind konventionelle Strahltriebwerke mit Mantelstromtriebwerken, wie wir sie von Verkehrsflugzeugen kennen. Diese benutzen das ursprüngliche Strahltriebwerk nur als Herzstück, dazu noch die besagten zusätzlichen Verdichter und Turbinenschaufeln. Drum herum sitzt ein Gehäuse mit einem großen Fan wessen Reaktionskraft den größten Teil der Schubkraft erzeugt. Dieser Fan leitet nämlich einen Großteil der Luft um das eigentliche Strahltriebwerk herum. Der sich nach hinten verengende Raum sorgt dafür, dass die Luft, also der Mantelstrom in diesem Fall, kraftvoller nach hinten herausgepresst wird und so Schub erzeugt. Das gleiche Phänomen kann man beobachten, wenn man seine Lippen zusammenzieht und dann ausatmet, wobei die Luft kraftvoll austritt. Wenn man hingegen den Mund weit öffnet tritt die Luft sehr schwach aus. Zurück zum Fan, dieser spielt nämlich noch eine andere wichtige Rolle, er saugt viel mehr Luft an wie ein herkömmliches Triebwerk, das wirkt sich natürlich auch positiv auf die Leistung des



Triebwerks aus.

Abbildung 6: Aufbau eines Mantelstromtriebwerks / Quelle: Google

4.2 Nachbrenner

Der Nachbrenner verlieh Düsenflugzeugen erstmals die Fähigkeit Überschallgeschwindigkeiten zu erreichen. Nicht jedes Triebwerk hat einen Nachbrenner, nur Flugzeuge die Überschallgeschwindigkeiten erreichen müssen. Schließlich ist es ja nicht so als würde die zusätzliche Kraft keinen Sprit verbrauchen und normalerweise werden Überschallflugzeuge auch nicht mit dem Ziel konstruiert wenig Sprit zu verbrauchen. Das ist auch ein Grund warum sich Überschallpassagierjets noch nicht so richtig durchsetzen konnten. Noch fehlt ein Triebwerk, das leistungsfähig und sparsam genug ist. Aber beim Militär ist das nebensächlich, Hauptsache das Flugzeug ist schnell, dann werden eben die Tanks vergrößert oder die gängige Methode der Luftbetankung genutzt.

Aber wie funktioniert so ein Nachbrenner eigentlich? Strahltriebwerke saugen Luft an, komprimieren und verschnellern sie indem die Luft durch mehrere Turbinenschaufeln gejagt ,mit Kerosin vermischt und entzündet wird. Zum Schluss ist in dem Luft-Treibstoffgemisch jedoch noch genug Sauerstoff enthalten, um es nochmal mit Hilfe einer weiteren Kerosineinspritzung zu entzünden. Dieses zusätzliche Bauteil hinter dem eigentlichen Triebwerksauslauf nennt man Nachbrenner.

Meistens kann der Pilot des Flugzeugs den Nachbrenner in mehreren Stufen einstellen. Man muss sich den Triebwerksausgang eines mit einem Nachbrenner bestückten Strahltriebwerks wie einen Trichter vorstellen. Bei vollem Schub ist der Ausgang voll geöffnet. Bei moderatem oder wenig Schub ist er je nach dem etwas mehr oder weniger zusammengezogen. Bei zugeschaltetem Nachbrenner sieht man je nach Stufe ein Glühen im Innern oder einen Feuerschweif bei hoher Beteiligung des Nachbrenners.



© Michel Speicher

Abbildung 7: Nachbrenner einer MC Donell Douglas F-4 Phantom / Quelle: eigenes Bild

4.3 Supercruise

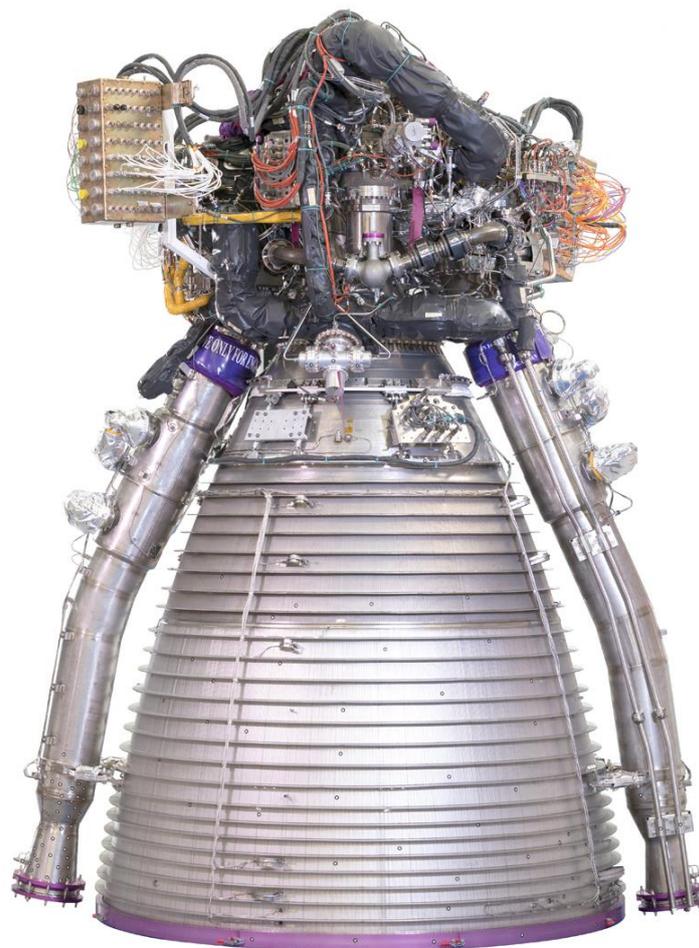
Supercruise nennt man bei einem Flugzeug die Fähigkeit langfristig ohne Nachbrenner im Überschallflug zu bleiben. Mittlerweile ist es eine wichtige Eigenschaft, welche einige moderne Kampfflugzeuge bereits erfüllen können. Supercruise wird in Zukunft auch eine immer wichtigere Eigenschaft werden, so könnte man schon in wenigen Jahren ohne Nachbrenner schon Mach 1 und mit Nachbrenner Mach 3, 4 oder sogar 5 erreichen. Anfangs empfand man Delta- und/oder Doppeldeltaflügel als am effektivsten für Supercruise-Flugzeuge, diese sind jedoch kontraproduktiv gegenüber der Manövrierfähigkeit. Solche Flugzeuge verbrauchen logischer Weise auch viel mehr Treibstoff. Wegen diesem Problem wurden auch neue Triebwerke entwickelt, Turbojettriebwerke mit Nachbrenner zum Beispiel, diese sind jedoch im Unterschallbereich nicht effektiv genug, besser sind daher Triebwerke mit variablem Nebenstromverhältnis, also im Unterschallbereich mit einem hohen Nebenstromverhältnis, sodass es einem sparsamen Mantelstromtriebwerk ähnelt. Bei Hochgeschwindigkeiten hingegen kann das Nebenstromverhältnis auf fast null herabgesetzt werden, wodurch der Schub sowie jedoch auch der Treibstoffverbrauch in die Höhe gejagt wird. Beispielhaft hierfür ist zum Beispiel das General Electric YF120 Triebwerk der F-22 Raptor (siehe Kapitel 8)



Abbildung 8: Lockheed Martin F-22 Raptor mit angeschalteten Nachbrennern / Quelle: Google

5 Raketentriebwerke

Frühe experimentelle Überschallflugzeuge wie die Bell X-1 wurden also mit Raketentriebwerken gebaut, da es der stärkste Antrieb war, den man derzeit kannte. Raketentriebwerke funktionieren wie bereits besagt ohne Luft, oder sonstige angesaugte Materie. Das System ist jedoch das gleiche wie bei einem Strahltriebwerk: Energie, die bei einer Verbrennung entsteht in kinetische Energie umwandeln, also eine Beschleunigung. In der Brennkammer eines Raketentriebwerks wird also Treibstoff verbrannt und der erzeugte Druck als Schub genutzt. Raketen, die ins Weltall fliegen sollen, gibt es noch nicht sehr lange, erst um die 90 Jahre, diese sind mit Flüssigtreibstoff betrieben. Anders als Silvesterraketen oder Raketen wie sie China schon im 12. Jahrhundert zu militärischen Zwecken nutzte, diese Raketen werden nämlich mit Feststoffen wie zum Beispiel Schwarzpulver betrieben. Viel später erst im 18. Jahrhundert fing man auch an Flüssigtreibstoffraketen zu konstruieren. Genauso einen Antrieb kann man auch für Flugzeuge benutzen. Das hat von Vorteil, dass man auch in sehr sauerstoffarmen Höhen oder gar bis ins Weltall fliegen könnte, da Raketentriebwerke ja auch im Vakuum funktionieren. Außerdem spart der Antrieb selbst viel



©ArianeGroup Holding

Platz und hat trotzdem eine immense Schubkraft, von den notwendigen Tanks jedoch nicht zu sprechen.

Abbildung 9: Raketentriebwerk einer zeitgenössigen Raketen / Quelle: Google

6 Staustrahltriebwerke

Anders wie Strahltriebwerke, nutzen Staustrahltriebwerke keine Verdichtungsfans, sondern nutzen die Geschwindigkeit der einströmenden Luft und verdichten sie nur durch den schmalen werdenden Lufteinlass. In der Brennkammer wird die Luft entzündet, so dehnt die Luft sich schlagartig aus und wird durch den Luftstrom durch das Triebwerk nach hinten ausgestoßen. Solche Triebwerke werden meistens mit Wasserstoff betrieben und werden vor allem im Bereich der Hyperschallfluggeräte eingesetzt.

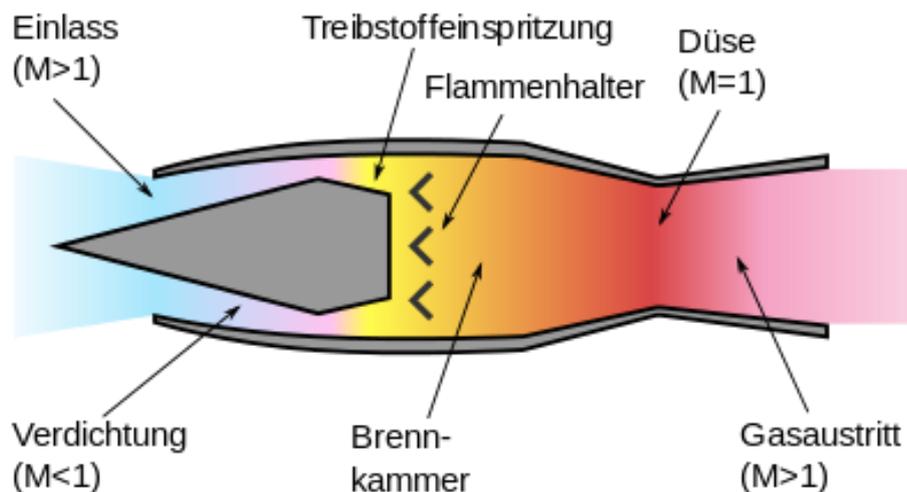


Abbildung 10: Aufbau eines Staustrahltriebwerks / Quelle: Google

7 Bell X-1

Die X-1 war das erste Überschallflugzeug der Welt. Die erste Bell X-1, genannt „Glamorous Glennis“ hat mithilfe ihres ebenfalls legendär gewordenen Piloten am 14. Oktober 1947 erstmals die Schallmauer durchbrochen. Die verhältnismäßig kleine Bell X-1 war an den Rumpf eines umgebauten B-29 Bomber gehängt worden, von wo aus sie später startete, also in mehreren Kilometern Höhe abgekoppelt werden sollte. Dann wurde das Raketentriebwerk gestartet, beschleunigt und als erstes Flugzeug der Welt die



Abbildung 11: Die Bell X-1 im Flug / Quelle: Google

Schallmauer durchbrochen. Kriege bringen technischen Fortschritt, das hat dieses Projekt besser denn je gezeigt, es hat nur zwei Jahre nach Kriegsende in Anspruch genommen Überschall zu erreichen. Jahrzehnte der Forschung und Entwicklung wurden durch den Zeitdruck und den Konkurrenzkampf zwischen den Großmächten erheblich verkürzt.

Die Bell X-1 war eine Revolution in der Luftfahrt, doch vom Militär wurde sie nie eingesetzt und das Strahltriebwerk dominierte nach dem zweiten Weltkrieg den Markt. Zwar blieben diese Flugzeuge noch im Unterschallbereich, jedoch waren sie mehr als schnell genug um mit der Zeit und dem Feind mitzuhalten. Raketenflugzeuge blieben und sind auch heute noch Sache der jeweiligen nationalen Raumfahrtbehörde, da sie einfach zu schwierig einzusetzen und zu kostspielig sind.

Die Bell X wurde als eines von vielen Projekten schon im zweiten Weltkrieg entwickelt, dies geschah bei der damals noch kleinen Firma Bell Aircraft Cooperation. Die Bell X-1 wurde nach bekannten Prinzipien konstruiert: Eine Kugel durchbricht beim Abfeuern die Schallmauer, also muss diese Form auch die richtige für ein Flugzeug sein, das stabil und aerodynamisch genug für den Durchbruch der Schallmauer ist. Strahltriebwerke gibt es noch nicht wirklich, es gibt nur einige Projekte die aber auch noch in der Planung stecken. Doch Raketentriebwerke sind bereit zu einer solchen Weiterentwicklung, die Tragflächen und das Leitwerk fielen sehr banal aus. Vom Konzept her also ein sehr einfaches Flugzeug, aber mehr sollte es ja auch nicht sein, nur ein Testflugzeug, wenn auch ein revolutionäres. Natürlich steckt schon etwas mehr dahinter, aber so lautet das Konzept der Bell X-1 einfach erklärt. Und es hat ja auch funktioniert, mit 1127 km/h beim ersten Versuch, hat die Bell X-1 mit dem Testpiloten und erfolgreichen Jagdfliegerpiloten Captain Charles Elwood Yeager im Cockpit die Schallmauer



Abbildung 12: Die Glamorous Glennis, heute im National Air and Space Museum in den USA / Quelle: Google

erfolgreich und wohlbehalten durchbrochen (das Gleiche galt natürlich für den Piloten).

8 Lockheed Martin F-22 *Raptor*

Die F-22 Raptor ist ein Beweis dafür, dass die Entwicklung von Überschallflugzeugen bis heute nicht stehen geblieben ist. Die F-22 ist eines der momentan noch wenigen Flugzeugen, das im Stande ist Überschallgeschwindigkeiten ohne Nachbrenner zu erfliegen. Ihre Vektorsteuerung ist eine auffällige Neuentwicklung, welche eine Steuerung mittels der Triebwerksstrahlen ermöglicht. Neue Formen der Tragflächen und des Leitwerks sind auch gut erkennbar und so reiht sie sich gut mit der neuen F-35 Lightning II in die fünfte Generation amerikanischer Kampfflugzeuge ein. 2008 galt die F-22 als bestes Jagdflugzeug weltweit, doch mittlerweile ist das nicht mehr sicher, denn auch die Entwicklung im Osten bleibt nicht stehen. Die moderne russische T-50 zum Beispiel sieht der Raptor nicht nur ähnlich, sondern besitzt auch gleiche Tarnkappenfähigkeiten. STEALTH nennt man diese immer wichtiger werdende Fähigkeit dem Radar zu entgehen. Diese wird erreicht indem die Radarwellen durch spezielle Formen und Beschichtungen in so viele Richtungen zurückgeworfen werden, dass sie nachher nicht mehr zurückzuverfolgen sind. Das fast 190 Millionen teure Kampfflugzeug ging als Sieger aus dem „Advanced – Tactical – Fighter“ Programm hervor das 1981 mit der Einreichung der Entwürfe der Firmen richtig anfang. 1985 wurde ein Flugzeug gefordert, das die F-16 und die F-15 ablösen sollte. Schlussendlich war es die YF-22 die gegen die Konkurrentin Northrop YF-23 Black Widow II gewann. Da aber nur 195 Exemplare der F-22 wegen dem hohen Stückpreis gebaut worden sind löste sie die F-15 nur teilweise ab und die F-16 Flotte soll nun endgültig durch die F-35 Lightning II ersetzt werden. Die F-22 ist momentan ein für die Schnelligkeit, spezielle Steuerung und Avionik bekanntes Flugzeug, das noch lange seine Dienste bei der US-Luftwaffe verrichten wird.



Abbildung 13: Zwei F-22 Raptor im Formationsflug und geöffneten Waffenschächten / Quelle: Google

9 Lockheed Martin SR-71 *Blackbird*

Die Blackbird ist mit einer Höchstgeschwindigkeit von 3529 km/h immer noch das schnellste Düsenflugzeug der Welt. Und das, trotz dass sie vor über 50 Jahren konstruiert wurde. Dieses legendäre Flugzeug hat Geschwindigkeiten von über dreifacher Schallgeschwindigkeit erreicht. Einzigartige Technik und komplett neue Innovationen haben dieses einzigartige Flugzeug bei den Skunk Works von Lockheed unter strengster Geheimhaltung entstehen lassen.

Im Jahr 1957 hat der US-Geheimdienst CIA nach einem sehr schnell und sehr hoch fliegendem Spionageflugzeug verlangt. Lockheed und Convair wollten ihnen eins bieten. Im Kampf überzeugt der Chefingenieur von Lockheed, Kelly Johnson schlussendlich mit seinem Entwurf der Lockheed A-12. Das Herzstück der A-12 sind die beiden Pratt & Whitney J-58 Triebwerke, welche sich jeweils in der Mitte der stark nach hinten gefeilt Deltaflügel verbaut sind. Beide besitzen einen Kegel an ihrem Triebwerkseinlauf. Dieser dient dazu die eintretende Luft zu verlangsamen, da es die Triebwerkschaufeln bei solchen Windgeschwindigkeiten nicht aushalten würden. Auf den Triebwerken ist auch das etwas zum Rumpf zu geneigte Doppelleitwerk angebracht.



Abbildung 14: SR-71 Blackbird im Flug / Quelle: Google

Die A-12 Oxcart und die SR-71 Blackbird sind zwei verschiedene Versionen der Blackbird-Familie, die A-12 jedoch das erste der beiden Flugzeuge und die SR-71 das bekanntere. Das Projekt wurde begonnen um die für die Spionage der UDSSR mittlerweile ungeeignete Lockheed U-2 Dragonlady abzulösen. Diese war mit dem Konzept auslegt worden höher zu fliegen als die sowjetischen Raketen reichen würden. Damit hatten sich die Amerikaner allerdings verschätzt, glücklicherweise konnten sie die U-2 noch lange anderwärts einsetzen. Doch die Lösung ihres Problems wurde die Blackbird, denn sie war nicht nur schnell und flog auch noch sehr hoch, sie hing die feindlichen Raketen durch ihre nahezu gleiche Geschwindigkeit ab. Beide Flugzeuge, A-12 und SR-71 bestehen zu einem großen Teil aus Titan, da sie enormen Temperaturen standhalten mussten. Neuartige Materialien wie Aluminium wurden bei der SR-71 verbaut und neue Legierungen für die Außenhaut entwickelt, um den extremen Temperaturen standzuhalten. Ihre Geschwindigkeit und ihr Aussehen ließen die Blackbird zu einer Legende der Luftfahrt werden.



Abbildung 15: Eine A-12 Oxcart im Flug / Quelle: Google

10 North American XB-70 Valkyrie

Angesichts ihrer Größe und Geschwindigkeit ist die XB-70 eines der bemerkenswerten Flugzeuge überhaupt. Trotz, dass sie doppelt so groß ist, ist sie fast genau so schnell wie die SR-71 Blackbird (siehe Kapitel 9), das schnellste Strahltriebwerk betriebene Flugzeug der Welt (SR-71 Blackbird Höchstgeschwindigkeit: 3529 km/h und XB-70 Valkyrie Höchstgeschwindigkeit: 3249 km/h). Leider wurde dieses Flugzeug nie in Dienst gestellt, da der Fortschritt in Sachen Flugabwehr noch schneller voran ging, und so erwartete die XB-70 das gleiche Schicksal wie ihr sowjetisches Gegenstück, die Suchoi T-4, diese war jedoch nicht auch nur annähernd so gut wie die XB-70, zum Beispiel lag die maximale Geschwindigkeit bei nur Mach 1,9 während die der ausgereiften XB-70 bei Mach 3 lag. Außerdem war sie durch ihre geringere Größe in einigen Bereichen limitierter. Nichts desto trotz wären beide Flugzeuge der gegnerischen Luftabwehr nicht gewachsen gewesen. Doch ursprünglich hatte die XB-70 ja auch einen anderen Zweck, und zwar nur unter Beweis zu stellen, dass ein Mach 3 schneller Bomber keine Sache der Unmöglichkeit ist. Daher stammt auch das X vor dem B (B für Bomber), also für *experimental* Status. Insgesamt gab es nur zwei XB-70, beide waren Prototypen und hatten nur Attrappen als Waffenschächte, diese hätten bei einer B-70 dann bis zu 14 nukleare Waffen mittragen können. Um die Radarsignatur möglichst gering zu halten sind alle Waffen innerhalb des Rumpfes untergebracht. Die XB-70 wurde von 6 im Heck platzierten Strahltriebwerken mit Nachbrenner angetrieben, die charakteristischen Lufteinlässe befanden sich weiter vorne unter dem Rumpf. Ein einzigartiges Merkmal der XB-70 sind die nach unten klappbaren Flügelspitzen. Sie sind bis heute die größten aerodynamischen Klappen, die es je an einem Flugzeug gab. Der Zweck der riesigen Klappflügel ist eine andere Art der Auftriebsgewinnung, der Kompressionsauftrieb, hierbei wird die durch die Lufteinlässe erzeugte Schockwelle genutzt indem sie unter die Tragflächen geführt wird. Die besagten Klappflügel erhöhen den um 30% gesteigerten Auftrieb nochmals um 5%, so werden also 35% mehr Auftrieb im Überschallflug erzeugt und das ganz ohne mehr Luftwiderstand zu erzeugen. Außerdem gaben diese auch ein gutes Seitenleitwerk ab, sodass die eigentlichen Seitenleitwerke kleiner ausfielen konnten, so wurde Gewicht und Luftwiderstand eingespart, das heißt schnellere längere Flugstrecken.



Abbildung 16: XB-70 Valkyrie mit herunter geklappten Flügeln / Quelle: Google

Die XB-70 (1. Prototyp: AV-1) hatte ihren Erstflug am 21. September 1964 und die AV-2 dann am 17. Juli 1965. Der erste Mach 3 Flug wurde dann am 14. Oktober 1965 durchgeführt. Bei diesem ersten Mach 3 Flug wurden jedoch einige strukturelle Mängel sichtbar, sodass die maximale Geschwindigkeit der AV-1 auf Mach 2,5 reduziert werden musste. Die versetzt gebaute AV-2 hatte schon eine ausgefeiltere Avionik durch die aus früheren Flügen mit der AV-1 gewonnenen Erkenntnisse. So konnte die zweite XB-70 dauerhaft mit Mach 3 fliegen, erstmals erreichte diese Version ihre Mach 3 Geschwindigkeit am 3. Januar 1966. Die dritte XB-70 (AV-3) kam nicht mehr aus der Endmontage heraus, weil das Projekt aus Kostengründen gestoppt wurde.

Leider gibt es heute nur noch eine North American XB-70 Valkyrie (AV-1) zu bewundern, die AV-2 stürzte am 8. Juni 1966 in einem tragischen Unfall ab. Eine Lockheed F-104 Starfighter war mit ihr in einem Formationsflug kollidiert. Die F-104 war auch schon vorher als „Witwenmacher“ bekannt, auch diesem Tag machte sie ihrem Spitznamen alle Ehre, der Pilot der F-104, Joe Walker, derzeit oberster Testpilot der NASA starb sofort. Der Copilot der Valkyrie, Carl Cross, konnte sich nicht mehr retten, der Pilot Al White Chefpilot bei North American und dem XB-70 Programm konnte die Rettungskapsel auslösen und überlebte. Er flog ein halbes Jahr später wieder, jedoch nicht mehr mit der verbleibenden XB-70. Diese kann man seit dem 4. Februar 1969 im US Airforce Museum in Dayton (Ohio) besuchen.



Abbildung 17: Der verhängnisvolle Formationsflug; die F-104 Starfighter ist schon fast unter dem Flügel der XB-70 zu erkennen (orangenes Leitwerk) / Quelle: Google

11 Hyperschall

Als Hyperschall bezeichnet man Fluggeschwindigkeiten oberhalb der Mach 5 Marke, entsprechend ungefähr 6 125 km/h. Erstmals wurde die Hyperschallgrenze von der deutschen V-2 Rakete überschritten. Die Planung von Hyperschallwindkanälen folgte, diese wurden jedoch erst später in den USA umgesetzt. In den 1960ern wurden dann neue Rekorde mit der X-15 gebrochen (siehe Kapitel 11.1). Erst in den 1980er- Jahren kamen wieder Entwicklungen auf, während sich die USA mehr auf die Raumfahrt konzentrierten, schaffte Russland den ersten Überschallflug mit einem Staustrahltriebwerk, welches später im Bereich des Hyperschallfluges noch bis heute grundlegend ist. Außerdem planten sie auch in zwei aufeinander folgenden Projekten einen Hyperschallbomber. Nach 2000 wurden in den USA einige Tests mit unbemannten Flugzeugen durchgeführt. Das Thema Hyperschall ist auch im Moment sehr aktuell: 2014 schalteten sich die Chinesen mit ihrem Hyperschallgleiter WU-14 zu, dieser soll wie die X-43 auch Geschwindigkeiten von Mach 10 erreichen. Hyperschall ist eine extreme Geschwindigkeit für Flugkörper innerhalb unserer Atmosphäre auch wenn es in vielen Jahrzehnten schon wieder langsam sein wird... Denn jetzt schon gibt es unbemannte Experimentalflugzeuge wie die Boeing X-43 (siehe Kapitel 11.2) die Geschwindigkeiten von weit über Mach 9 (10.000 km/h) erreichen.

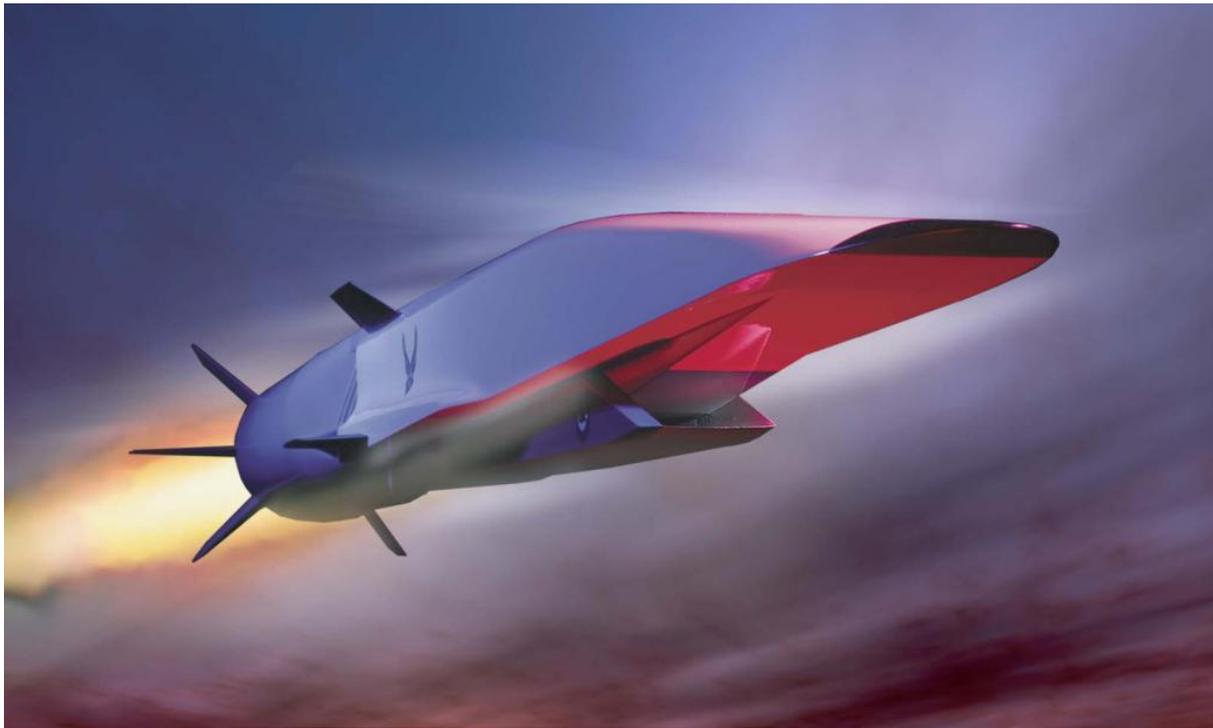


Abbildung 18: Animation einer X-51 Waverider Hyperschallrakete / Quelle: Google

11.1 North American X-15

Die X-15 war ein US-amerikanisches Hyperschall-Experimentalflugzeug. Mit ihr wurden extreme Höhen- und Geschwindigkeitsflüge erforscht. Sie stellte einige Rekorde auf die jedoch später von Raumfahrtprojekten übertrumpft worden. Vor allem die höchste erreichte Geschwindigkeit von 7274 km/h (Mach 6,72) ist herausragend. Auch die Konstruktion ist wie bei allen hoch Geschwindigkeitsflugzeugen sehr interessant: Die Struktur der X-15 besteht aus Titan und Stahl. Die Außenhaut besteht aus einer speziellen, hitzebeständigen Legierung auf einer Nickelbasis genannt Inconel-X, sie hält Temperaturen von bis zu 650 Grad Celsius stand. Die X-15 basiert auf einem von Walter Dornberger konzipiertem Konzept, dieser war auch Leiter des V-2 Programms im zweiten Weltkrieg. Die X-15 konnte auch nicht von allein starten, sie wurde an einem umgebauten B-52 Bomber angekoppelt und startete in der Luft ihr Triebwerk, nachdem sie von der B-52 abgekoppelt worden war. Das muss man sich vorstellen wie die Rakete eines Jagdflugzeuges. Das regelbare Raketentriebwerk XLR99-RM2 von Reaction Motors wurde mit Flüssigtreibstoff betrieben, von welchen in nur drei Minuten 15 Tonnen verbraucht wurden. Der Treibstoff selbst bestand aus flüssigem Sauerstoff, Ammoniak und Wasserstoffperoxid. Letzterer wurde zum Antrieb der Hochleistungsturbopumpen genutzt, welche den Treibstoff in die Brennkammer des Raketentriebwerks pressten. Bei solchen Geschwindigkeiten durften G-Kräfte von -3G (G im Minusbereich ist mit Schwerelosigkeit zu vergleichen, jedoch eher wie die im Höhepunkt eines Loopings wie die im Weltraum) bis +7,33 G nicht überschritten werden, damit das Flugzeug nicht in der Luft zerbrach. Bei den schnellsten Flügen wurde zusätzlich zu der besagten Inconel-X Verkleidung noch ein nicht wiederverwendbarer Hitzeschutz aufgetragen. Landen



Abbildung 19: Neil Armstrong mit einer Lockheed X-15 / Quelle: Google

konnte die X-15 selbstständig, doch das Heckfahrwerk wurde durch Kufen ersetzt, um Platz zu sparen.

11.2 Boeing X-43

Die X-43 ist ein aktuelleres Projekt der Hyperschallluftfahrt und hält momentan den Rekord für das schnellste Fluggerät mit einem luftatmenden Triebwerk. Die drei gebauten X-43 sind nur einmalig verwendbar. Das erste Exemplar scheiterte beim ersten Test im Juni 2001. Das zweite Exemplar flog planmäßig am 27. März 2004 und brachte sogar fast auf Mach 7 und hat damit die Hyperschallgrenze mehr als nur überschritten. Im November des gleichen Jahres sprengte das dritte Exemplar noch einmal den eigenen Rekord mit einer Geschwindigkeit von annähernd Mach 10 (10.617 km/h). Das Staustrahltriebwerk (siehe Kapitel 6) wurde gewollt nicht gekühlt und schmolz so schon im Bereich von gut zehn Sekunden! Im Gleitflug wurden beide X-43 danach kontrolliert in den Pazifik gestürzt. Der Start war jedoch wesentlich komplizierter: Zuerst wurde die kleine X-43 (4,6 Meter lang und 1,5 Meter breit) auf die Spitze einer umgebauten Pegasus-Rakete befestigt. Die mit zusätzlichen Stabilisatoren ausgestattete Pegasus-Rakete wiederum wurde von einem B-52 Bomber auf eine Höhe von über 12'000 Meter geflogen, wo sie wieder abgekoppelt wurde und die X-43 auf eine Höhe von ungefähr 30'000 Meter weiter hoch flog. In diesen 30 Kilometern stieg dann auch die X-43 in Aktion, nachdem sie von der Pegasus-Rakete gelöst worden war konnte das 1,27 Tonnen schwere Fluggerät 12 Sekunden lang selbstständig fliegen, davon 10 Sekunden mit der Rekordgeschwindigkeit von Mach 9,66. Das X-43 Projekt bekam als Nachfolger die X-51 Waverider diese ist bis jetzt aber noch nicht sehr erfolgreich gewesen.



Abbildung 20: Boeing X-43 / Quelle: Google

12 Überschall Passagierflugzeuge

Schneller, weiter, höher, das soll ein modernes Überschallflugzeug können, doch seit fast 50 Jahren gab es keinen Fortschritt mehr, die Concorde sollte bis heute das einzige Überschallpassagierflugzeug bleiben (siehe Kapitel 12.1). Zwar hat es Konkurrenzprojekte aus den USA und der Sowjetunion gegeben, doch nur die Europäer konnten ihr Flugzeug in den Liniendienst stellen. Die Tupolew Tu-144 ist jedoch wenigstens abgehoben, kam aber nie weiter als ins Museum. Nur die Zukunft bringt vielleicht ein neues Flugzeug hervor das der Concorde das Wasser reichen kann und auch den heutigen Anforderungen punkto Treibstoffverbrauch gewachsen ist. Die Firma BOOM scheint momentan allen voraus, während es viele unbedeutende Entwürfe von größeren Firmen wie Airbus, Boeing und Co gibt ist BOOM bereits am Bau eines Prototyps beschäftigt (siehe Kapitel 12.2)



Abbildung 21: Eine Concorde der British Airways / Quelle: Google

12.1 Concorde und Coprojekte

Die Concorde war ihrer Zeit weit voraus, auch wenn sie nicht allein kam. Neben ihr gab es auch noch zwei gescheiterte amerikanische Projekte und die qualitativ unzureichende Tupolew Tu-144, das muss man so verstehen: Bei der Concorde wurden nur erstklassige Materialien verwendet, das Budget war hoch, der Wettkampf der Nationen wichtig. Die Tu-144 war nicht so wichtig für die UdSSR gewesen. Die Concorde ist ein einzigartiges Flugzeug gewesen und hat bis heute keinen Nachfolger, doch eigentlich dürfte sie noch fliegen, denn die Fluglizenz wurde nie zurückgezogen. Doch heute wäre der Spritverbrauch dann doch zu hoch, was man jedoch mit einem simplen Austausch der Triebwerke richten könnte. Das zweite Problem ist psychisch: Jeder kennt die Geschichte vom Absturz der Concorde, aber wenige berücksichtigen bei dem Misstrauen oder ihrer Angst, dass es ein anderes Flugzeug war, das am Absturz schuld gewesen war.

25. Juli, 2000, eine Concorde der Air France startet voll besetzt mit deutschen Passagieren einer Kreuzfahrt. Das Flugzeug ist das zweite von zwei Concorde-Flügen, die an diesem Tag von Paris nach New York starten. Doch dort sollte sie nie ankommen, der Flug hat nur zwei Minuten gedauert, und in so einer Zeit schafft nicht einmal die Concorde es von Paris nach New York. Was jedoch gerne ignoriert wird ist, dass die Concorde immer sehr zuverlässig gewesen war und der Absturz zu 100% menschlichen Fehlern zu verdanken ist. Der Hauptgrund war ein Metallstück einer DC-10, diese war zuvor gestartet und hat das Teil vom Triebwerk unterwegs verloren. Das Stück war von einem Mechaniker mangelhaft befestigt worden und zerstörte nachher einen Reifen der Concorde, wessen Teile den Tank durchschlugen und der auslaufende Treibstoff entzündete sich am Nachbrenner der Triebwerke, die so der Reihe nach ausfielen. Außerdem hat ein Bauteil im Fahrwerk gefehlt was dazu führte, dass die Concorde beim Start ihre Spur nicht richtig halten konnte. Die Concorde ist fast von der Startbahn abgekommen und der Pilot musste mit einer zu niedrigen Startgeschwindigkeit starten. Dazu kam, dass das maximale Startgewicht überschritten worden war und der Schwerpunkt zu weit hinten lag. Zu allem Überfluss hat der Pilot nicht die vom Tower zugewiesene Startbahn genommen, so ist die Concorde mit Rückenwind gestartet, was ein verheerender Fehler war. Flugzeuge können nur bei geringem Gewicht und genug Geschwindigkeit mit dem Wind starten. Alle diese mehr oder weniger



Abbildung 22: Die Concorde schon mit dem Feuerschweif kurz vor dem Absturz /
Quelle: Google

schwerwiegenden Fehler und die fehlende Triebwerksleistung haben schlussendlich zum Absturz auf einem Nebengebäude eines Hotels geführt. Alle an Bord kamen ums Leben auch 6 Hotelgäste starben. Aufgrund dieses Unfalls wurde die Concorde schon bald außer Dienst gestellt, die offizielle Fluglizenz jedoch wurde nie zurückgezogen.



Abbildung 23&24: Die Cockpits der beiden Überschallpassagierjets im Direktvergleich, links die Concorde und rechts die TU-144 / Quelle: Eigene Fotos

Die Concorde war ohne Frage eines der unglaublichsten Flugzeuge aller Zeiten und ihrer Zeit weit voraus. Doch das Prinzip war einfach, Techniken benutzen, die man schon von derzeitigen Kampffjets kannte. Außerdem wurden bei den Großmächten in den 1960ern auch Überschallbomber entwickelt, nicht überraschend, dass die britisch-französische Concorde oder die russische Tu-144 sehr ähnlich gebaut sind, auch die



Entwürfe der USA sahen ähnlich aus, und hatten auch Aspekte ihres Versuchsbombers XB-70 Valkyrie einem Mach-3 Bomber, der seinen Erstflug 1964 hatte. Die Concorde hatte ihren Erstflug dann am 2. März 1969 und war ein französisch-britisches Projekt für ein Überschallpassagierflugzeug wie auch die beiden gescheiterten US-amerikanischen Projekte von Boeing und Lockheed oder die sowjetische Tupolew TU-144. Die Concorde war für Europa ein wichtiges Luftfahrt-Projekt, deswegen wurde viel Zeit und Geld in die Entwicklung und Konstruktion des Prototyps und aller nachfolgenden Maschinen gesteckt. Trotz der schwierigen Zusammenarbeit zweier Nationen war das Concorde-Projekt der britischen BAC und der französischen Aerospatiale erfolgreich, das Projekt einer Boeing 2707 scheiterte und der Hersteller brachte dafür ein riesiges Frachtflugzeug hervor, das genaue Gegenteil des geplanten Mach-2 Passagierjets. 1964 waren die Karten jedoch noch anders gemischt, die Bestellungen tendierten zur Boeing 2707. Auf dieses Verhältnis hin änderte das Concorde-Team ihre Aussage zur Reichweite ihres Flugzeuges noch einmal und vergrößerten ihr gesamtes Flugzeug, die Länge wurde von 52 auf 56 Meter gesteigert die Spannweite von 23,5 auf 25,5 Meter. Dieser Vorgang führte zu einer Steigerung der Flügelfläche um 15% was wiederum die Startmasse um 30 Tonnen vergrößerte. Das Gute daran, die Nutzlast wurde auch um 2,8 Tonnen heraufgesetzt, jedoch immer nicht genug für jeden, wie ein Nebengrund des Absturzes im Juli 2000 bewiesen hat. All diese Vorgänge und überhaupt das ganze Projekt wurde nicht einfach so unternommen, zahlreiche Tests wurden durchgeführt, ja sogar andere Testflugzeuge wie die Bristol 188 oder die Handley Page HP. 115 gebaut, um zum Beispiel die richtigen Materialien zu finden oder neue Flügelformen auszuprobieren.

Abbildung 25: Nachbrenner einer Concorde / Quelle: Eigenes Foto

So also ging die Concorde Geschichte ein und hatte über drei Jahrzehnte stolze Luftherrschaft als schnellstes Zivilflugzeug aller Zeiten. Hoffnung besteht, dass Überschallflugzeuge in der nahen Zukunft lukrativ werden und wir den Atlantik schneller überqueren werden als je zuvor.



Abbildung 26: Eine BAC/Aerospatiale Concorde im Technikmuseum Sinsheim / Quelle: Eigenes Foto

12.2 BOOM Airliner

Boom scheint momentan als einziger Hersteller dabei zu sein ein neues Überschallflugzeug zu entwickeln. Doch dieses Flugzeug, dessen Zukunft momentan noch in den Sternen steht soll schneller, leiser und Umweltfreundlicher sein. Boom verspricht ein Mach 2,2 schnelles Passagierflugzeug, mit Ticketkosten in Höhe eines Business-Class Flugtickets in der Unterschallkategorie. Dabei soll es 55 Sitzplätze, alles Fensterplätze, geben, diese sind vom Platzverhältnis her immer noch Business-Class, also klingt der gegebene Ticketpreis doch sehr verlockend. Die überkopf liegenden Gepäckfächer wurden unter die Sitze verlegt, um mehr Kopffreiheit zu schaffen und ein einfaches Erreichen des Gepäcks zu gewährleisten.

Viele Aspekte der Concorde wurden natürlich auch beibehalten, wie zum Beispiel die bei Überschallflügen effiziente Deltaflügel oder der lange dünne Rumpf. Es gab jedoch noch weitere aerodynamische Anpassungen beim Rumpf und den Triebwerken. Der Rumpf wird überraschenderweise nach hinten her kleiner, dort fangen nämlich die Flügel an und ganz zum Schluss folgen seitlich am Rumpf noch die Einlässe für das Hecktriebwerk. Punkto Triebwerke wurden während den Jahren enorme Fortschritte gemacht, weswegen die Triebwerke des BOOM Airliners kleiner und effizienter sein werden. Deswegen sind auch nur drei davon vorgesehen, eines unter jedem Flügel und eines hinten im Heck. Die charakteristische, für Überschallpassagierflugzeuge damals essentielle nach unten klappbare Nase wird es in Zukunft nicht mehr geben, die schwere Mechanik wird durch Kamerasysteme ersetzt, die eine gute Sicht des Piloten auf die Landebahn garantieren. 2023 soll es so weit sein und der fertige BOOM Airliner soll seinen Erstflug antreten. Ganz ehrlich ein ziemlich surrealistisches Datum. Im Moment wird bei BOOM ein sogenanntes Baby-BOOM Flugzeug entwickelt, das als Testflugzeug für die Materialien und Aerodynamik dienen soll. Doch auch hier soll es bis zum Erstflug noch dauern, 2023 wäre demnach eine Spitzenzeit, vor allem nach heutigen Standards.



Abbildung 27: BOOM Airliner und BabyBOOM in einer Animation / Quelle: Google

13 Schlussfolgerung

Ich bin, um ehrlich zu sein, sehr enttäuscht wie wenig echten Fortschritt es im Bereich der Überschallfliegerei in den letzten Jahrzehnten gab. Mit der Concorde hatte die Menschheit etwas Revolutionäres erreicht, das wieder einmal zeigte, dass nichts unmöglich ist. Trotzdem wurde das Alles einfach so fallen gelassen und der Rückfall auf die Geschwindigkeiten der Siebziger Jahre einfach so in Kauf genommen. Dennoch habe ich auch gemerkt, dass dies auch bemitleidet wird und dass es Firmen wie BOOM gibt die Überschall zum Standard machen wollen. Die Zukunft ist schnell und kennt keine Grenzen, vor allem in der Luftfahrt.

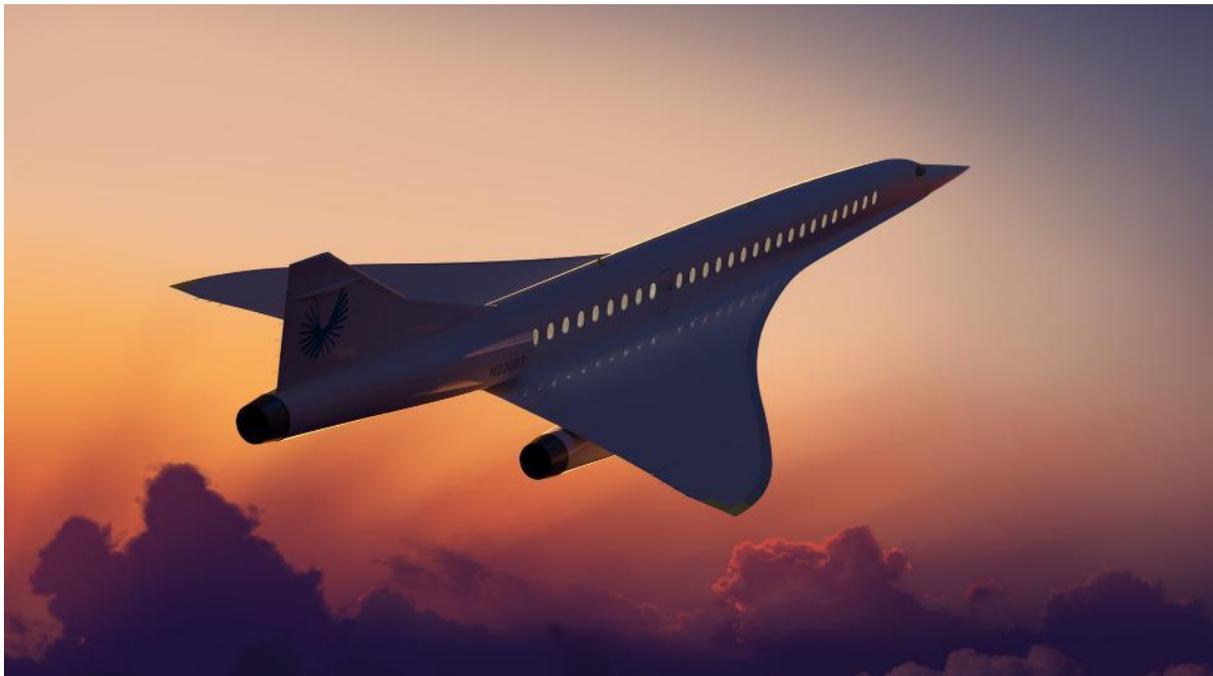


Abbildung 28: BOOM Airliner / Quelle: Google

14 Quellen

14.1 Internetquellen

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Überschallflug>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Bell_X-1
- <http://www.spiegel.de/einestages/chuck-yeager-erster-ueberschallflug-a-947757.html>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Supercruise>
- <https://www.flugrevue.de/militaerluftfahrt/kampfflugzeuge-helikopter/top-10-die-schnellsten-flugzeuge-der-welt/548994>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyperschallgeschwindigkeit>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_X-51_Waverider
- <https://boomsupersonic.com/airliner>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Nachbrenner>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%99scher_Knoten
- https://de.wikipedia.org/wiki/Bell_X-1
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Rakete>
- <https://www.youtube.com/watch?v=V9nUGYenvXo>
- <https://www.bing.com/videos/search?q=concord&&view=detail&mid=BBC89BD45A952D324403BBC89BD45A952D324403&&FORM=VRDGAR>
- https://de.wikipedia.org/wiki/North_American_XB-70
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Concorde>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-22
- https://de.wikipedia.org/wiki/North_American_X-15
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyperschallgeschwindigkeit>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Boeing_X-43
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Raketentriebwerk>
- <https://www.bing.com/videos/search?q=boom+airliner&view=detail&mid=9932754A8A66BC2CA95F9932754A8A66BC2CA95F&FORM=VIRE>
- https://de.wikipedia.org/wiki/North_American_XB-70
- https://de.wikipedia.org/wiki/Lockheed_SR-71
-

14.2 Bücher- und Zeitungsquellen

- Die schnellsten Flugzeuge der Welt *seit 1945* von Horst W. Laumanns/
Motorbuchverlag 1. Auflage 2018
-

14.3 Bildquellen/Abbildungen

1. https://www.google.be/search?q=fighter+jet&hl=de&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwisvoCcpJvhAhUMU1AKHQ7tC1YQ_AUIDigB&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=LF70m9QbW-VWOM:
2. https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&id=3257432D6A8469790DE7D8AEDB4F7A0DA62FF04A&thid=OIP.hCcbwNeZtBHQd30bG03aggHaFD&mediaurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2Fthumb%2F%2F23%2FP-51-361.jpg%2F1200px-P-51-361.jpg&exph=818&expw=1200&q=p+51&selectedindex=0&ajaxhist=0&vt=0&eim=1_6
3. https://www.google.com/search?q=schallmauer&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiwrurMwZvhAhVGYVAKHWO1CkEQ_AUIDigB&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=h_KiqvPst0Vg8M:
4. https://www.google.com/search?q=schallmauer&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiwrurMwZvhAhVGYVAKHWO1CkEQ_AUIDigB&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=3XSyGgdPrnTHVM:
5. https://www.google.com/search?tbn=isch&q=d%C3%BCsentriebwerk&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwuiu_Y6OxpvhAhXQ3KQKHWLWCZIQBQg7KAA&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=EBKKNvs8mSytM:
6. https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbn=isch&sa=1&ei=Od-XXMfhHYLawAKDIKXYCQ&q=mantelstromtriebwerk&oq=mantelstrom+&gs_l=img.1.0.0i10i24i2.607712.612342..614036...1.0..0.78.843.13.....1....1..gws-wiz-img.....0j0i30j0i5i30j0i24.mndSy4NWP-M#imgrc=fbK9e4UCx-2DJM:
7. Eigenes Bild (Speicher Michel)
8. https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbn=isch&sa=1&ei=6eOXXNTlBl6ma8CzklAG&q=f+22+raptor+supercruise&oq=f+22+raptor+supercruise&gs_l=img.3...62411.71457..71784...1.0..0.74.861.13.....1....1..gws-wiz-img.....0j0i67j0i30j0i19j0i5i30i19j0i30i19j0i8i30i19.9a5XtM9NWPU#imgrc=qxEgqan4_qr76M:
9. https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbn=isch&sa=1&ei=MeSXXN_6Ko_Qajblo7gL&q=raketentriebwerk&oq=raketentriebwerk&gs_l=img.3..0l7j0i30j0i5i30j0i24.324475.328592..329073...0.0..0.77.1079.16.....1....1..gws-wiz-img.....0i67.cS7UXU6miSk#imgrc=ekSNJuSrlyox4M:
10. https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbn=isch&sa=1&ei=e-WXXK6AHsnosAeejbGIAQ&q=staustahltriebwerk&oq=staustahl&gs_l=img.1.0.0l2j0i24i3.285781.289795..291250...0.0..0.79.644.10.....1....1..gws-wiz-img.....35i39j0i10i24.7tt4Uaf0se8#imgrc=EvIbXj1ONq8DTM:
11. https://www.google.com/search?q=bell+x-1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjCn7uc1J3hAhWEaVAKHf1gBIYQ_AUIDigB&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=nC8TqiszM5aWIM:
12. https://www.google.com/search?q=bell+x-1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjCn7uc1J3hAhWEaVAKHf1gBIYQ_AUIDigB&biw=1440&bih=850&dpr=1.5#imgrc=t5CxrHjq7zOQ5M:

13. [https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=dvqYXNOCDuzvsAeRyaPoBg&q=f22&oq=f22&gs_l=img.3..0l2j0i10j0l7.427023.427572..428100...0.0..0.74.219.3.....1....1..gws-wiz-
img.....0i67.tA2kMvt2vng#imgrc=bNn9mqvzcrVJBM:](https://www.google.com/search?biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=dvqYXNOCDuzvsAeRyaPoBg&q=f22&oq=f22&gs_l=img.3..0l2j0i10j0l7.427023.427572..428100...0.0..0.74.219.3.....1....1..gws-wiz-
img.....0i67.tA2kMvt2vng#imgrc=bNn9mqvzcrVJBM:)
14. [https://www.google.com/search?q=sr71&hl=de-
LU&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiJ7au0153hAhUJbVAKHZQ0CGYQ
AUIDigB&biw=1440&bih=850#imgrc=AClCgkD4LzQyZM:](https://www.google.com/search?q=sr71&hl=de-
LU&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiJ7au0153hAhUJbVAKHZQ0CGYQ
AUIDigB&biw=1440&bih=850#imgrc=AClCgkD4LzQyZM:)
15. [https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=zP2YXNeelujjsAeRqrN4&q=a12+oxcart
&oq=a1&gs_l=img.1.0.35i39j0i67j0l4j0i67j0l3.38165.41003..42346...3.0..0.94.225.3..
...1....1..gws-wiz-img.....0i10i67.TtbeoRo5Yvk#imgrc=A5ewBiX4RivRQM:](https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=zP2YXNeelujjsAeRqrN4&q=a12+oxcart
&oq=a1&gs_l=img.1.0.35i39j0i67j0l4j0i67j0l3.38165.41003..42346...3.0..0.94.225.3..
...1....1..gws-wiz-img.....0i10i67.TtbeoRo5Yvk#imgrc=A5ewBiX4RivRQM:)
16. [https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=uv-YXNzBE8a2kwWS5biQAg&q=xb-
70&oq=xb-
70&gs_l=img.3..0l4j0i30l6.265411.269281..269697...0.0..0.86.368.5.....1....1..gws-
wiz-img.5fVtFJB V k#imgrc=zEE7K-MYljuDSM:](https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=uv-YXNzBE8a2kwWS5biQAg&q=xb-
70&oq=xb-
70&gs_l=img.3..0l4j0i30l6.265411.269281..269697...0.0..0.86.368.5.....1....1..gws-
wiz-img.5fVtFJB V k#imgrc=zEE7K-MYljuDSM:)
17. [https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=uv-YXNzBE8a2kwWS5biQAg&q=xb-
70&oq=xb-
70&gs_l=img.3..0l4j0i30l6.265411.269281..269697...0.0..0.86.368.5.....1....1..gws-
wiz-img.5fVtFJB V k#imgrc=Deawu_gZPg6QM:](https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=1440&bih=850&tbm=isch&sa=1&ei=uv-YXNzBE8a2kwWS5biQAg&q=xb-
70&oq=xb-
70&gs_l=img.3..0l4j0i30l6.265411.269281..269697...0.0..0.86.368.5.....1....1..gws-
wiz-img.5fVtFJB V k#imgrc=Deawu_gZPg6QM:)
18. [https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=yACZXiXIJK6afijslgB&q=hyperschall&oq=
=hyperschall&gs_l=img.3..0l10.1302888.1305055..1305912...0.0..0.88.780.11.....1....
1..gws-wiz-
img.....0i67j0i10.KHqc GdxzbM#imgdii=3v20sAXORSEroM:&imgrc=OCCF19sZYSQGY
M:](https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=yACZXiXIJK6afijslgB&q=hyperschall&oq=
=hyperschall&gs_l=img.3..0l10.1302888.1305055..1305912...0.0..0.88.780.11.....1....
1..gws-wiz-
img.....0i67j0i10.KHqc GdxzbM#imgdii=3v20sAXORSEroM:&imgrc=OCCF19sZYSQGY
M:)
19. [https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=4wWZXP7IDMWEaajmvJAE&q=x-
15&oq=x-
15&gs_l=img.3..0l3j0i30l7.204658.206975..207584...0.0..0.93.301.4.....1....1..gws-
wiz-
img.....35i39.tJf2JaJ5pEE#imgdii=hMN4hDGCaWylqM:&imgrc=SPcp9XuaZPZ bM:](https://www.google.com/search?hl=de-
LU&biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=4wWZXP7IDMWEaajmvJAE&q=x-
15&oq=x-
15&gs_l=img.3..0l3j0i30l7.204658.206975..207584...0.0..0.93.301.4.....1....1..gws-
wiz-
img.....35i39.tJf2JaJ5pEE#imgdii=hMN4hDGCaWylqM:&imgrc=SPcp9XuaZPZ bM:)
20. [https://www.google.com/search?q=x43&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUK
EwiZsvvS4Z3hAhXKy6QKHe7eCP8Q AUIDigB&biw=960&bih=566&dpr=2.25#imgrc=3
gzPzOd1fJmLLM:](https://www.google.com/search?q=x43&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUK
EwiZsvvS4Z3hAhXKy6QKHe7eCP8Q AUIDigB&biw=960&bih=566&dpr=2.25#imgrc=3
gzPzOd1fJmLLM:)
21. [https://www.google.com/search?q=concord&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0a
hUKEwjmPPz4p3hAhVCKuwKHW6lAPcQ AUIDigB&biw=960&bih=566#imgrc=bTM4
wOXZfpDPuM:](https://www.google.com/search?q=concord&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0a
hUKEwjmPPz4p3hAhVCKuwKHW6lAPcQ AUIDigB&biw=960&bih=566#imgrc=bTM4
wOXZfpDPuM:)
22. [https://www.google.com/search?q=concord&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0a
hUKEwjmPPz4p3hAhVCKuwKHW6lAPcQ AUIDigB&biw=960&bih=566#imgrc=S5f39
bDPQOZNSM:](https://www.google.com/search?q=concord&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0a
hUKEwjmPPz4p3hAhVCKuwKHW6lAPcQ AUIDigB&biw=960&bih=566#imgrc=S5f39
bDPQOZNSM:)
23. Eigenes Foto (Speicher Michel)
24. Eigenes Foto (Speicher Michel)

25. Eigenes Foto (Speicher Michel)
26. Eigenes Foto (Speicher Michel)
27. https://www.google.com/search?biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=sg-ZXljaB8jsaY-BrMgC&q=boom+airliner&oq=boom+airliner&gs_l=img.3..0i19j0i8i30i19.1636.7503..8120...1.0..0.83.678.10.....1....1..gws-wiz-img.....0i67j0i30i5i30.5Wyvwf7CPS8#imgsrc=AejuUS0AUDmTgM:
28. https://www.google.com/search?biw=960&bih=566&tbm=isch&sa=1&ei=sg-ZXljaB8jsaY-BrMgC&q=boom+airliner&oq=boom+airliner&gs_l=img.3..0i19j0i8i30i19.1636.7503..8120...1.0..0.83.678.10.....1....1..gws-wiz-img.....0i67j0i30i5i30.5Wyvwf7CPS8#imgsrc=olxDwyocMTn7uM: