

Globaler Wandel am Beispiel der Luftfahrt Klima, Ressourcen, Globalisierung und Demographie

Kapitel 2 **Atmosphäre und Luftfahrt**

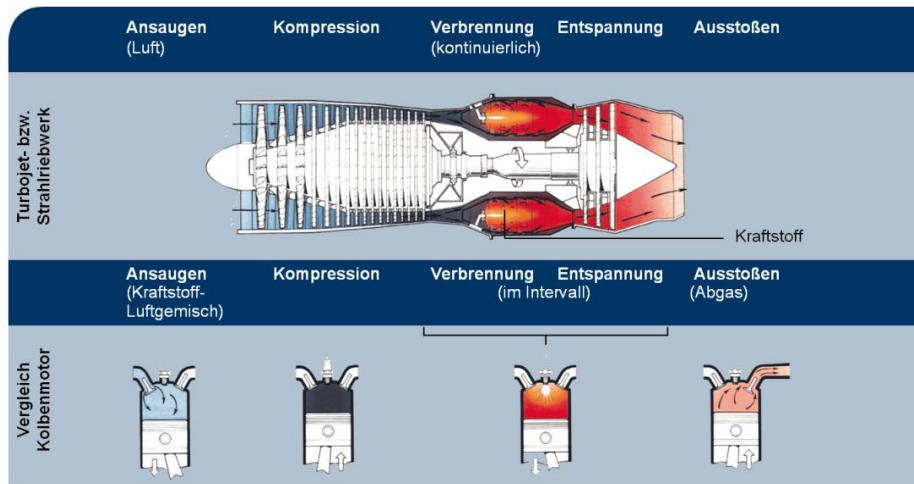
Unterrichtsmaterial
für die Oberstufe am Gymnasium in Bayern
Geographie

Jürgen Patzke
Diplom-Geograph und Studienrat
Lehrer in der Wirtschaft 2012/13

München 2013

2 Atmosphäre und Luftfahrt

2.1 Funktionsweise eines Flugzeugtriebwerks

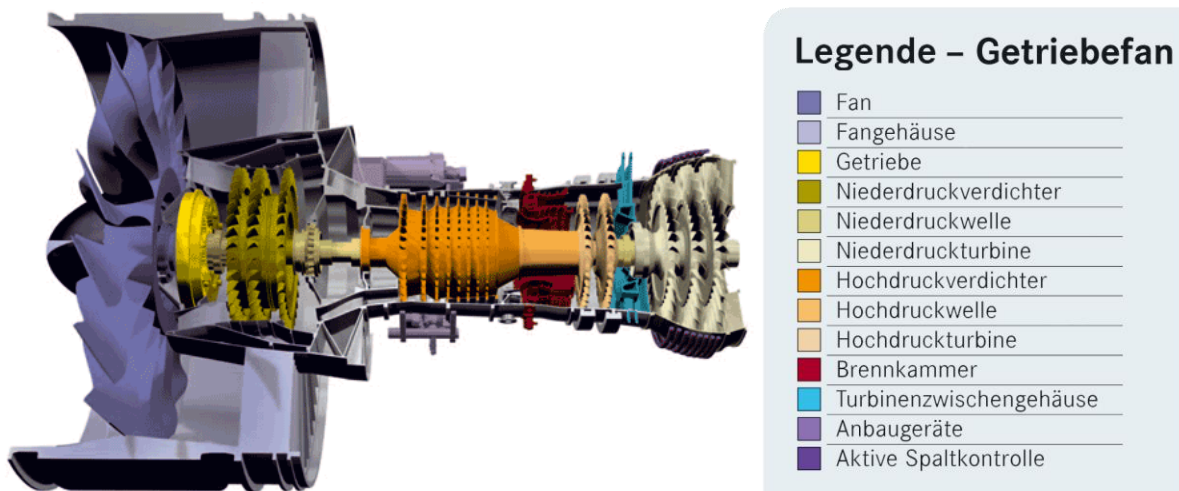


M1: Schnitt und Funktionsweise eines Turbojet-Triebwerks (Quelle: MTU Aero Engines)

Ein Turbojet- bzw. Strahltriebwerk funktioniert nach einem einfachen Prinzip (M1).

Die Luft wird vom Nieder- und Hochdruck-Verdichter angesaugt und komprimiert, sie erhitzt sich dabei und wird schließlich in die Brennkammer geleitet. Durch das Einspritzen von Kerosin entsteht ein Kraftstoff-Luft-Gemisch, das kontinuierlich verbrennt. Die Erhitzung führt zu einer starken Ausdehnung des Gases. Es schießt mit hoher Energie durch die Hoch- und Niederdruck-Turbine und versetzt diese durch das Vorbeiströmen an den Turbinenschaufeln in eine Drehbewegung. Über eine Welle treibt die vom Gasstrom gelieferte Energie die Verdichterstufen an. Solche Einstrom-Triebwerke waren bis in die 1960er Jahre weit verbreitet.

Beim modernen Turbofan-Triebwerk (M2) bilden die Bestandteile des Turbojets den Triebwerkskern. Zusätzlich befindet sich vor den Verdichterstufen ein Fan mit großen Schaufeln. Dieser wird über eine Welle vom Niederdruckverdichter angetrieben. Er beschleunigt wie ein Propeller die vorne einströmende Luft, von der nur etwa 1/10 in das Kerntriebwerk gelangt. Die anderen 9/10 bilden den Nebenstrom, der für den Großteil des Schubs sorgt. Bei Zwei-Strom-Triebwerken wird ein deutlich gesteigerter Wirkungsgrad erreicht. M2 zeigt mit dem PW1000G, an dem die MTU Aero Engines beteiligt ist, eine Weiterentwicklung: das Getriebefan-Triebwerk. Ein Planetengetriebe ermöglicht, dass sich der Fan langsamer dreht als die Niederdruckturbine, was zusätzliche Einsparungen beim Treibstoffverbrauch und der Geräusentwicklung bringt.

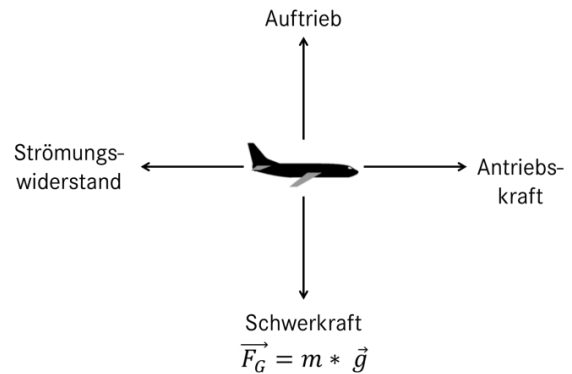


M2: Schnitt eines Turbofan-Triebwerks (PW1000G) mit Untersetzungsgetriebe (Quelle: Pratt&Whitney/MTU Aero Engines)

Animation: www.mtu.de/de/take-off/how_engines_work/index.html

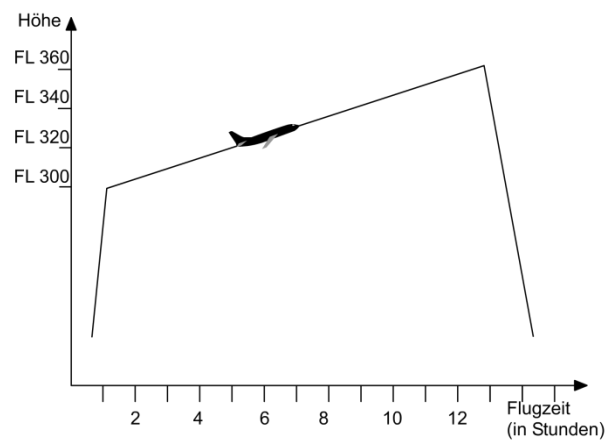
2.2 Einfluss von Temperatur und Luftdruck

Ein Flugzeug befindet sich in der Luft im Gleichgewicht von vier Kräften (M3). Das Triebwerk stellt einerseits die Antriebskraft bereit. Andererseits ist es an der Entstehung des Auftriebs beteiligt. Dieser wird nämlich nicht nur von der Dichte der Luft und der Größe der Tragflächen positiv beeinflusst, sondern hängt auch von der Geschwindigkeit der Anströmung ab. Ohne Triebwerke könnte ein modernes Verkehrsflugzeug also weder den Strömungs- bzw. Luftwiderstand, noch die Schwerkraft überwinden.



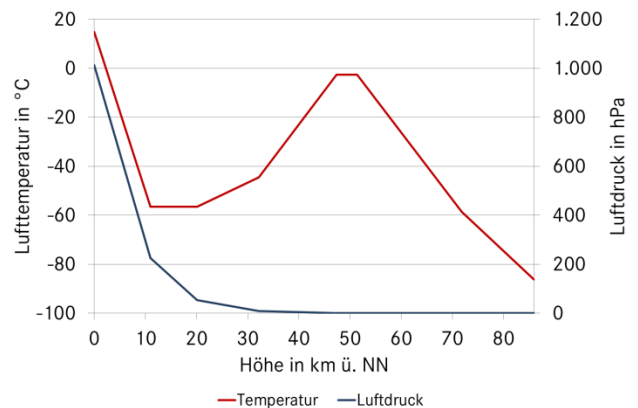
M3: Flugzeug im Kräftegleichgewicht

Die meiste Zeit eines Flugs befindet sich ein Verkehrsflugzeug auf der Reiseflughöhe zwischen 9.000 und 11.000 m Höhe. Also wird unter diesen atmosphärischen Bedingungen auch der Großteil des Treibstoffs verbraucht (M6). Deshalb legen die Entwicklungsingenieure die Triebwerke so aus, dass sie auf der Reiseflughöhe ihren maximalen Wirkungsgrad haben, also möglichst sparsam sind. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass beim Abheben von der Erdoberfläche und für den unmittelbar daran anschließenden Steigflug die maximale Kraftentfaltung gegeben ist. Und für die Landung muss das Triebwerk den Schub stark reduzieren. Entsprechend den drei Flugzuständen Start, Reiseflug und Landung haben die Triebwerke also drei wichtige Auslegungspunkte.



M4: Cruise Climb (Quelle: Wikimedia)

Nach dem Steigflug geht ein Verkehrsflugzeug in den Reiseflug über. Währenddessen gewinnt es weiterhin an Höhe. Am Anfang des Jetzeitalters ging dies in Form eines kontinuierlichen Cruise Climb vonstatten (M4), heutzutage ist auf den meisten Flugrouten nur der Step Climb möglich. Dabei steigt das Flugzeug, nachdem es sich zunächst auf einer unteren Flugfläche befunden hat (z. B. in 9.000 m Höhe: FL 300 = Flight Level 30.000 ft), schrittweise auf die nächsthöheren Flugflächen auf.



Die Leistung eines Triebwerks wird von steigendem Luftdruck positiv beeinflusst, von steigender Temperatur und steigender Eintrittsgeschwindigkeit am Lufteinlass aber negativ (M8). Die atmosphärischen Bedingungen sind im Bereich der Tropopause in 11.000 m Höhe für den Reiseflug am günstigsten (M5). Über den Wolken ist die Luft überdies sehr trocken, was die Fluggäste am Fenster in Form einer herrlichen Fernsicht erleben (M7).

M5: Lufttemperatur und Luftdruck in der Troposphäre und Stratosphäre

- Maximales Startgewicht: 78 t
- Maximale Treibstoffkapazität: 24 t (30.190 l)
- Maximale Flugreichweite: 6.150 km
- Dienstgipfelhöhe: 12.130 m
- Reisegeschwindigkeit: 840 km/h
- Maximale Passagieranzahl: 150-180
- Kraftstoffverbrauch auf Reiseflughöhe: 2.700 l/h

M6: Basisdaten eines Airbus A320 (Quelle: Wikipedia)

Interview mit Dr.-Ing. Thomas Uihlein
(Technologietransfer-Manager)



Der Polarfrontjetstream, der auf der Reise Flughöhe an der Tropopause verläuft, sorgt ja für eine Beschleunigung der Flüge von Nordamerika nach Europa. Wie wirkt sich der Jetstream auf die Triebwerke aus?

Er gibt dem Flugzeug Rückenwind und bewirkt, dass die Reisegeschwindigkeit mit weniger Kraftstoff erreichbar ist. Die Triebwerksfunktionalität selbst beeinflusst er nicht.

Auf der Nordatlantikroute gab es 2010 jedoch ein anderes geowissenschaftliches Phänomen, das großen Einfluss auf Strahltriebwerke hatte: den Ausbruch des Vulkans Eyjafjallajökull auf Island. Die Vulkanasche kann zu Schäden an den Verdichter- und Turbinenschaufeln führen. Auch Sand und Staub setzen Triebwerken zu. Bei der MTU erforschen wir die Zusammenhänge und entwickeln Lösungen in Form von Beschichtungsverfahren.

Dr. Uihlein, Sie haben ihre Doktorarbeit über Korrosion und Oberflächentechnik in Triebwerken geschrieben. Über 100 Patente sind auf Sie angemeldet. Als Honorarprofessor lehren Sie Triebwerkstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Warum engagieren Sie sich in der akademischen Lehre?

Es macht mir Spaß, den Ingenieursnachwuchs zu begleiten. Theorie und Praxis müssen verknüpft werden, zumal sich die Triebwerksentwicklung immer an der Grenze des gerade Machbaren bewegt.

Deshalb nehmen eine ganze Reihe von MTU-Angestellten Lehraufträge wahr. Auch der Chef unserer Triebwerksentwicklung hält am Lehrstuhl für Flugantriebe der Technischen Universität München Vorlesungen.

Mit wem arbeitet die MTU Aero Engines in der Forschung zusammen?

Die Reihe ist lang. In der Region sind es die Technische Universität München, die Universität der Bundeswehr München, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und das Bauhaus Luftfahrt. Außerdem kooperieren wir mit der Universität Stuttgart, der RWTH Aachen, der Leibniz-Universität Hannover und verschiedenen Fraunhofer-Instituten. Wer als Nachwuchsengeieur zur MTU Aero Engines kommen will, dem stehen viele Wege offen.

Der Schub ist das Produkt von Massestrom und Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten, also der Differenz der Geschwindigkeiten der aus- und einströmenden Luft:

$$\text{Schub [N]} = \text{Impulsänderung} = \text{Massenstrom [kg/s]} * \text{Geschwindigkeitsänderung [m/s]}$$

Steht das Flugzeug, so ist die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft am geringsten und ihre Beschleunigung am stärksten. Die Masse der Luft ist abhängig vom Volumen und wird von ihrer Dichte positiv beeinflusst. Die Dichte ist umso höher, je niedriger die Temperatur und je höher der Luftdruck ist. Somit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\text{Schub [N]} = \text{Volumenstrom [l/s]} * \text{Dichte [kg/l]} * (\text{Geschwindigkeit}_{\text{Auslass}} [\text{m/s}] - \text{Geschwindigkeit}_{\text{Einlass}} [\text{m/s}])$$

Bei einem Turbofan-Triebwerk gibt es zwei Massen, die unterschiedlich beschleunigt werden. Der heiße Luftstrom geht durch das Kerntriebwerk, der kalte Luftstrom wird nur vom Fan beschleunigt. Addiert man die Ergebnisse für die beiden Luftströme, so ergibt sich der Gesamtschub.

M7: Physikalische Grundlagen des Triebwerksschubs



M8: Fernsicht über der Antarktis (Quelle: Wikimedia)

Der Einfluss der Luftfeuchte und von Wasser, sei es in Form von Tröpfchen oder Eiskristallen, ist unter Normalbedingungen vernachlässigbar. Im Verdichter herrschen Temperaturen von über 400 °C und in der Brennkammer sind es 1.300 °C bis zu über 2.000 °C , sodass das Wasser umgehend verdampft. Auch das Durchqueren von Wetterfronten spielt für den Schub des Triebwerks keine wesentliche Rolle, da der Betrag des Luftdruckunterschieds in der Regel weit unter 100 hPa ist. Die Sensorik des Flugzeugs misst die Parameter, sodass die Regelungstechnik laufend die Kraftstoffzufuhr optimiert. Die Unterschiede zwischen den Auslegungspunkten beim Start und auf Reiseflughöhe sind viel größer als beim Durchqueren von Druckgebilden in der Atmosphäre.

Die Versorgung des Triebwerks mit Sauerstoff für die Verbrennung des Kraftstoffs ist auch auf der Reiseflughöhe gewährleistet. Der geringe Sauerstoff-Partialdruck in großer Höhe wirkt sich zwar auf Menschen in Form der Höhenkrankheit aus, etwa beim Bergsteigen über 4000 m . Ein Triebwerk hingegen ist auf die Verhältnisse in größeren Höhen ausgelegt. Der Sauerstoff selbst ist in ausreichender Menge vorhanden, denn die Konzentration der Hauptbestandteile der Luft ist innerhalb der Homosphäre, die bis in eine Höhe von 80 bis 120 km reicht, gleich. Auf der Reiseflughöhe bekommt ein Triebwerk aus der Luft also genug Sauerstoff für die Kraftstoffverbrennung, da sein Anteil wie auf Meereshöhe ca. 21% beträgt.

AUFGABEN

A1: Begründen Sie, warum ein Flugzeug während eines längeren Verkehrsflugs an Höhe gewinnt!

A2: Erklären Sie, warum der Anstieg während des Reiseflugs in der Regel als Step Climb und nicht als Cruise Climb durchgeführt wird, obwohl Letzterer kraftstoffsparender wäre!

A3: Zeichnen Sie in M4 einen Step Climb über vier Flugflächen ein!

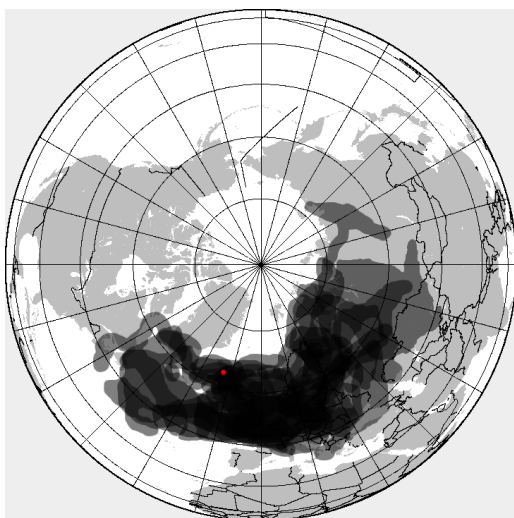
A4: Erläutern Sie, warum die atmosphärischen Bedingungen in 11.000 m Höhe für den Reiseflug am günstigsten sind!

A5: Führen Sie weitere Vorteile der Reiseflughöhe von 9.000 bis 11.000 m gegenüber einer geringeren Höhe von beispielsweise 2.000 bis 5.000 m an!

2.3 Einfluss von Vulkanasche

Triebwerke saugen mit der einströmenden Luft auch Teilchen an, die in der Luft schweben. Vulkanasche in der Atmosphäre kann zu Schäden an den Verdichter- und Turbinenschaufeln führen. Als im Frühjahr 2010 beim Ausbruch des Vulkan Eyjafjallajökull auf Island große Mengen von Vulkanasche in die Atmosphäre befördert wurden, erinnerte man sich an den KLM-Flug 867, bei dem schon früher die Gefahr für den Luftverkehr deutlich geworden war (M1).

Von 14.04. bis Mitte Juni 2010 transportierten die Eruptionen des Eyjafjallajökull in mehreren Phasen etwa 140 Millionen m³ Vulkanasche in die Atmosphäre (M2). Die Aschewolke erreichte Höhen von 8.000 m, in der Spitze auch 9.000 m. Von 15. bis 20.04. wurde in weiten Teilen Europas der Luftraum gesperrt, zumal die Asche bereits nach zwei Tagen über Polen angelangt war und sich weiter verteilte (M3). Man befürchtete Schäden wie beim KLM-Flug 867 von 1989. Ende April normalisierte sich der Luftverkehr wieder. Bis dahin bezifferte die Luftfahrtbranche ihre Umsatzauffälle auf ca. 2 Milliarden Euro, wobei 10 Millionen Passagiere mit 100.000 annullierten Flügen betroffen waren. Um künftig einheitliche Regelungen anwenden zu können, führte am 04.05.2010 die europäische Flugsicherung Eurocontrol das Drei-Zonen-Modell (M4) ein. Da dauernde Messungen im gesamten Luftraum unmöglich sind, wird die Ausbreitung der Aschewolke mit meteorologischen Modellen berechnet. Die Vorhersagen sind wegen örtlicher, nicht aufgelöster Turbulenzballen aber mit Unsicherheiten bis zum Faktor 20 behaftet. Daher lautet die grundsätzliche Empfehlung, keine sichtbaren Aschewolken zu durchfliegen. Um die Sicherheit des Luftverkehrs zu gewährleisten und unnötige Beschränkungen zu verhindern – der Grenzwert für ein Flugverbot wurde in Mitteleuropa weder vor noch nach dem 04.05. erreicht – müssen die Methoden zur Erkennung gefährlicher Aschekonzentrationen in der Atmosphäre also deutlich verbessert werden.



M3: Von der Aschewolke betroffene Gebiete vom 14. bis 25.04.2010 (Quelle: Wikimedia)

Eine Boeing 747-400 der KLM befand sich am 15.12.1989 mit 245 Menschen an Bord auf dem Weg von Amsterdam nach Tokio. Im Landeanflug auf den Zwischenstopp Anchorage in Alaska gelangte die 747 in 8.500 m Höhe in eine scheinbare Regenwolke. Es handelte sich aber um Asche des Mount Redoubt, der eine Stunde zuvor ausgebrochen war. Da Partikel und Schwefelgeruch ins Cockpit gelangten, versuchte der Pilot,



aus der Wolke zu entkommen. Beim Steigflug fielen binnen einer Minute alle vier CF6-80-Triebwerke aus. Die Asche hatte in den Verdichtern die Luftströmung gestört, wodurch es in den Brennkammern zum Flammabriss kam. Alle Messinstrumente fielen aus und es setzte ein Segelflug ein, bei dem die Boeing zwölf Minuten lang an Höhe verlor. Erst auf ca. 4.000 m Höhe konnten die beiden linken Triebwerke wieder gestartet werden, nach weiteren 15 Minuten auf ca. 2.000 m Höhe auch die beiden rechten. Die vorderen Scheiben waren mittlerweile durch die Ascheteilchen so zerkratzt, dass die Crew nur noch durch die Seitenscheiben sehen konnte. Nach der Landung in Anchorage wurde die Boeing 747 genau untersucht. In den vier Triebwerken befanden sich jeweils 80 kg Vulkanasche. Der Gesamtschaden am Flugzeug belief sich auf 80 Millionen US-Dollar.

M1: KLM-Flug 867 (Bildquelle: Wikimedia)



M2: Aschewolke des Eyjafjallajökull am 17.04.2010 (Quelle: Wikimedia)

Vulkanische Asche besteht aus kleinen Partikeln. Der Begriff „Asche“ hat sich wegen der feinen Struktur des Materials eingebürgert, obwohl es sich nicht um Verbrennungsrückstände handelt. Die Partikel entstehen, wenn bei der Eruption Lava oder bereits festes Gestein zerrissen wird. Die meisten Stratovulkane des zirkumpazifischen Feuerrings brechen auf diese Art aus. Beispiele sind die mächtigen Eruptionen des Mount St. Helens 1980 und des Pinatubo 1991.

Beim Eyjafjallajökull kamen sowohl 14.000.000 m³ flüssige Lava an die Oberfläche, als auch Vulkanasche. Diese bildete sich, weil das aufsteigende magmatische Material mit dem auflagernden Gletschereis in Berührung kam. Durch den starken Temperaturunterschied explodierte das Gestein in einer phreatomagmatischen Eruption.

Die Partikel können ein Triebwerk in mehrerlei Hinsicht beeinträchtigen. Die Verdichterschaufeln werden erodiert, wodurch sich die Form und die Oberflächenrauheit ändern (ähnlich wie bei M6). Die nun ungünstigere Aerodynamik führt zu höheren Treibstoffverbräuchen und CO₂-Emissionen. In der Turbine wird die Vulkanasche, deren Schmelzpunkt in der Regel deutlich unter 1.000 °C liegt, zähflüssig. Dadurch kann sie an der Oberfläche der Schaufeln haften bleiben (M5). Falls die Schmelze in entsprechend großen Mengen auftritt, droht sie den Gasstrom zu blockieren und die Turbine ausfallen zu lassen. Die Wahrscheinlichkeit eines Triebwerksstillstands erhöht sich noch, wenn die Turbinenschaufeln Kühlluftbohrungen haben. Werden diese von der Ascheschmelze verstopft, kommt es zur Überhitzung und letztlich zur Zerstörung der Schaufeln.

AUFGABEN

A1: Begründen Sie anhand mehrerer Aspekte, warum ein generelles Flugverbot wegen der Aschewolke ausgesprochen wurde, auch wenn diese nicht bis in die Reiseflughöhe von 9.000 bis 11.000 m vorgedrungen ist!

A2: Führen Sie ein Rollenspiel durch, bei dem Vertreter der Flugsicherung und der Fluggesellschaften in den ersten Tagen der Aschewolkenausbreitung über das Flugverbot diskutieren!

A3: Schätzen Sie mit Quellen zur historischen und aktuellen Vulkanaktivität und M12 ab, auf welchen Flugrouten die Gefährdung durch Vulkanasche (Tephra) am größten ist!

Links: earthquakes.volcanodiscovery.com;
www.volcano.si.edu/weekly_report.cfm

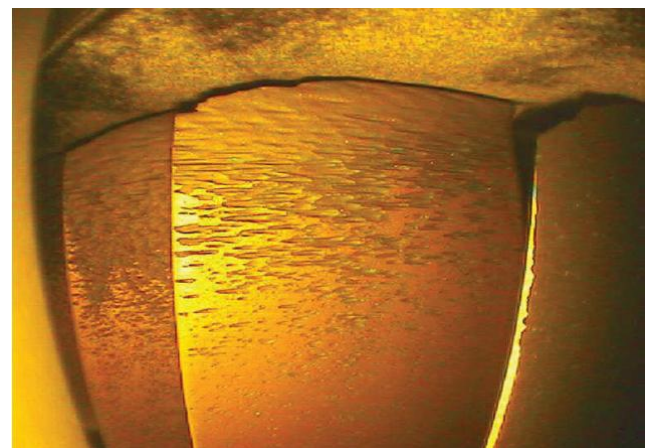
A4: Vollziehen Sie die Route des KLM-Flugs 867 (M1) und die Non-Stop-Verbindung von Amsterdam nach Tokio auf einer geeigneten Atlaskarte nach. Begründen Sie, warum die direkte Route ohne Zwischenstopp erst seit Anfang der 1990er Jahre genutzt wird!

Zone	Asche-konzentration	Regelung
3	>2 mg/m ³	Flugverbot im 110-km-Umkreis
2	0,2-2 mg/m ³	erhöhte Wartungsintervalle
1	<0,2 mg/m ³	keine Einschränkungen

M4: Drei-Zonen-Modell von Eurocontrol
(Quelle: Wikipedia)



M5: Turbinenschaufeln mit Krusten von Vulkanascheschmelze (Quelle: MTU Aero Engines)



M6: Durch Flugsand erodierte Laufschaufel nach Einsatz im Mittleren Osten (Quelle: MTU Aero Engines)

2.4 Einfluss von Flugsand

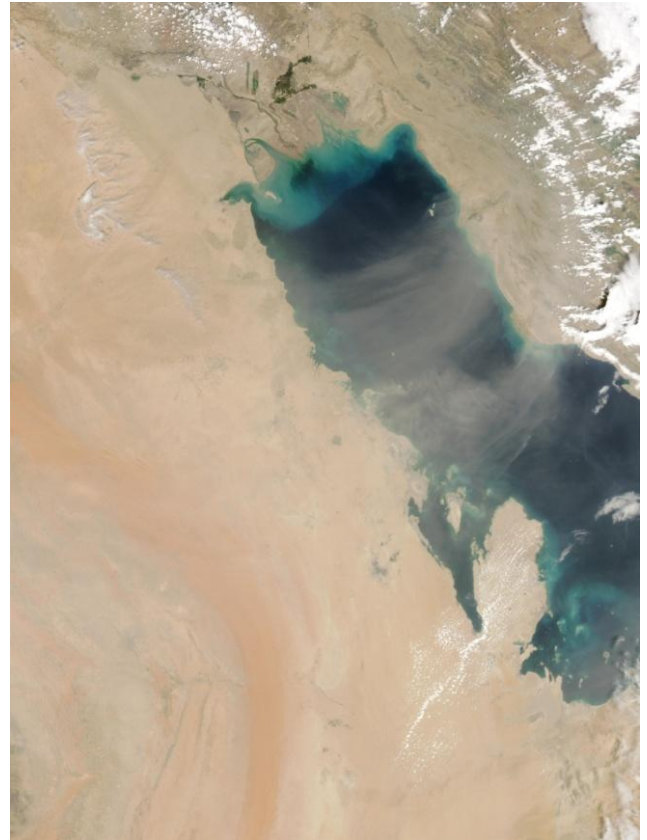
Auch Flugsand setzt Triebwerken zu. Er wird in den vegetationsarmen ariden Gebieten der niederen und mittleren Breiten, die sich im Zuge der Desertifikation weiter ausbreiten, auch in größeren Höhen vom Wind verfrachtet (M7). Flugsand bildet wegen seines hohen Schmelzpunkts keine Ablagerungen in der Turbine, doch das Ansaugen in den Verdichter hat wie bei der Vulkanasche eine erodierende Wirkung, die mit dem Sandstrahlen vergleichbar ist (M6).

Beim Flugbetrieb unter solchen Bedingungen führt der Metallabtrag an den Verdichterschaufeln dazu, dass Wartungs- und Reparaturarbeiten dreimal häufiger durchgeführt werden müssen als beim Einsatz über Mitteleuropa. Statt nach 10.000 h Laufzeit ist der Werkstattbesuch (Shop Visit), welcher bei einem Großtriebwerk mit bis zu 1 Million US-Dollar zu Buche schlägt, dann nach ca. 3.000 h fällig. Dabei verdreifacht sich auch der logistische Aufwand, denn das Triebwerk muss zur Wartung geflogen werden, z. B. von Dubai zur MTU Maintenance nach Hannover, und die Fluggesellschaft benötigt ein Ersatztriebwerk.

Wird das Austauschen erodierter Schaufeln unterlassen, so steigen mit dem Treibstoffverbrauch auch der CO₂-Ausstoß und die Belastung der Turbine, während die Leistung sinkt. Bei zivilen Anwendungen bedeutet dies eine Verlängerung der Reisezeiten, bei militärischen Fluggeräten ist durch den Leistungsverlust der Handlungsspielraum im Einsatz eingeschränkt. Dies ist umso kritischer, wenn nur unpräparierte Pisten zur Verfügung stehen (M8). Egal ob ein Triebwerk zivil oder militärisch genutzt ist, das fortgesetzte Einwirken des Sandes kann die Festigkeit der Schaufeln so weit mindern, dass sie brechen und das Triebwerk ausfällt.

Bei der MTU hat ein Forscherteam um Dr. Thomas Uihlein den Einfluss von Sand und Vulkanasche auf die Verdichtwerkstoffe vergleichend untersucht. Die Materialproben wurden kurz nach der Eruption am Eyjafjallajökull (M10) und auf einem Flughafengelände im Mittleren Osten (M11) gesammelt.

Die Testläufe auf dem Prüfstand haben ergeben, dass die Abtragungsraten an den Verdichterschaufeln von den Grundwerkstoffen, den Betriebsbedingungen (Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur, Auftreffwinkel) und von der Morphologie der Partikel abhängen. Dabei wirkt Vulkanasche in der Regel stärker abrasiv als Flugsand. Zum Schutz vor Partikelarten aller Art und vor hohen Temperaturen hat die MTU Aero Engines das Beschichtungsverfahren ERCoat^{nt} entwickelt (M9). Auch wenn die MTU an der Wartung und Reparatur von Triebwerken verdient, ist sie am Verhindern von Schäden am Triebwerk interessiert. Dr. Thomas Uihlein: „Mit der Beschichtung erhöhen wir die Lebensdauer der Schaufeln und Blinks um den Faktor 2 bis 3. Das spart wertvolle Ressourcen und schafft einen echten Mehrwert für unsere Kunden.“



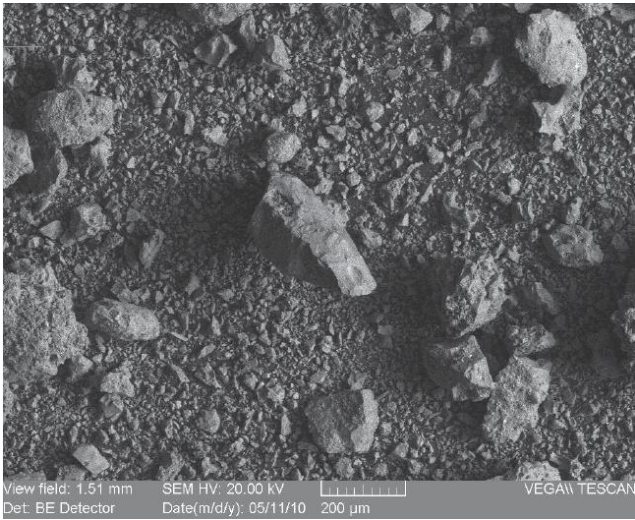
M7: Sandsturm am Persischen Golf (Quelle: NASA)



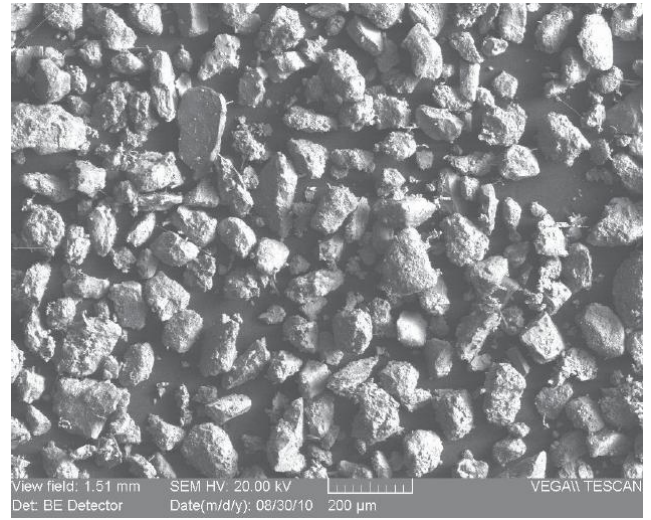
M8: A400M auf einer Sandpiste (Quelle: Airbus Military)



M9: Blinks mit Beschichtung ERCoat^{nt} (Quelle: MTU Aero Engines)



M10: Vulkanasche vom Eyjafjallajökull im Rasterelektronenmikroskop (Quelle: MTU Aero Engines)



M11: Flugsand aus dem Mittleren Osten im Rasterelektronenmikroskop (Quelle: MTU Aero Engines)



M12: Luftverkehr nach Flugplan im Juni 2009 (Quelle: Wikimedia)

AUFGABEN

- A1: Verorten Sie das Satellitenbild M7. Gliedern Sie den dargestellten Landschaftsausschnitt in physisch-geographischer Hinsicht mit einer Skizze und ordnen Sie das Aufnahmedatum mit Hilfe geeigneter Atlaskarten jahreszeitlich ein!
- A2: Beschreiben Sie vergleichend die Vulkanasche (M10) und den Flugsand (M11) nach Form und Partikelgrößen. Begründen Sie Ihre Befunde, indem Sie auf die jeweiligen Entstehungsbedingungen eingehen! Begründen Sie anschließend die stärkere abrasive Wirkung der Vulkanasche im Vergleich zum Flugsand!
- A3: Beurteilen Sie mit Hilfe geeigneter Atlaskarten und M12, welche Regionen und zivilen Flugrouten durch Flugsand am meisten beeinträchtigt sind! Berücksichtigen Sie dabei auch, wo das zukünftige Wachstum im Luftverkehr erwartet wird!
- A4: Recherchieren Sie, wo die deutschen bzw. die US-amerikanischen Streitkräfte mit Truppen und Fluggeräten in Auslands- bzw. Kampfeinsätzen präsent sind. Geben Sie eine vergleichende Einschätzung zur Bedeutung der Erosion durch Flugsand!
- A5: Fassen Sie überblicksartig zusammen, wie Vulkanasche und Flugsand auf Triebwerke einwirken und beurteilen Sie, welche der beiden Partikelarten im Alltag das größere Problem darstellt!