



18.8.2021

Kondensstreifen

1. Entstehung und Ausprägungen

Kondensstreifen sind künstliche Wolken, die sich hinter Flugzeugen bilden können. Sie bestehen hauptsächlich aus Wasser in der Form von Eiskristallen. Die Kombination von genügend Luftfeuchtigkeit und tiefen Temperaturen auf Reiseflughöhe führt zur Entstehung von Kondensstreifen. Im Detail hängt ihre Bildung im Wesentlichen von sechs Faktoren ab:

- von der Luftfeuchtigkeit, also der Menge an Wasserdampf¹, den es auf Flughöhe in der Luft hat,
- von der Lufttemperatur auf der entsprechenden Flughöhe,
- von der vom Triebwerk ausgestossenen Menge an Wasser,
- von der vom Triebwerk ausgestossenen Anzahl Russpartikel und der Menge natürlich vorhandener Partikel, welche es auf Flughöhe in der Luft hat,
- von der Temperatur der Abgase, bzw. dem Wirkungsgrad des Triebwerks,
- vom Luftdruck.

Diese sechs Faktoren, insbesondere das Verhältnis von Temperaturen und Luftfeuchtigkeit können zu folgenden Ausprägungen führen:

- keine Kondensstreifen,
- ganz schmale, kurz nach dem Triebwerk wieder verschwindende Streifen,
- schmale Streifen, die über Stunden bestehen bleiben,
- schmale Streifen, die sich mit der Zeit verbreitern,
- Streifen, die sich zu fedrigen oder auch flächigen, milchig trüben Wolken ausbreiten.

Flugzeugtriebwerke produzieren nur einen kleinen Teil des Wassers, welches Kondensstreifen bildet. Sich ausbreitende Kondensstreifen bestehen hauptsächlich aus Wasser, das sich bereits gasförmig in der Luft befindet und durch das vorbeifliegende Flugzeug zur Kondensation gebracht wird. Breiten sich Kondensstreifen aus, lassen sie sich im Allgemeinen nicht von Wolken unterscheiden, welche auf grosser Höhe durch Einmischung von feuchter Luft – aber ohne Einfluss von Flugzeugen – entstehen.

2. Lebensdauer

Wenn die Umgebungsluft geringe Feuchtigkeit hat und nicht allzu kalt ist, lebt ein Kondensstreifen nur kurz: Neu gebildete Eispartikel verdampfen sehr schnell und der Kondensstreifen wird sich nur über eine kurze Distanz hinter dem Flugzeug erstrecken. Wenn die Umgebungsluft hohe Feuchtigkeit aufweist aber gleichzeitig kalt ist, kann ein Kondensstreifen lange leben: Neu geformte Eiskristalle können durch Aufnahme von Wasserdampf aus der Umgebung wachsen. Unter solchen Bedingungen können Kondensstreifen stundenlang am Himmel stehen und sich über mehrere Kilometer mit einer Dicke von einigen hundert Metern ausbreiten. Starke Höhenwinde und Turbulenzen begünstigen deren Ausbreitung. (vgl. Abb. 1).

1 Im Alltag wird oft von Wasserdampf gesprochen, wenn Tröpfchen in der Form von Dampf beispielsweise aus einer kochenden Pfanne aufsteigen. Der physikalische Begriff Wasserdampf bezeichnet den *gasförmigen* Zustand von Wasser. Im gasförmigen Zustand ist Wasser für den Menschen unsichtbar.



Abb 1. Flug über Südwest-England, 1. November 2010, Flughöhe ca. 8 km. Kondensstreifen breiten sich zu Zirruswolken aus (im Hintergrund) © BAZL

3. Spezielle Erscheinungsformen

Auf Flughöhen von 8 bis 12 km sind Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur häufig günstig für die Bildung von Kondensstreifen. Auf diesen am intensivsten genutzten Flughöhen verkehren Flugzeuge nach Instrumentenflugregeln. Die Flugsicherung führt die Flugzeuge auf Flugstrassen und in vertikalen Abständen voneinander getrennt. Aus diesem Grund können Muster entstehen, die vom Boden aus wie geordnete Streifen aussehen.

Ob ein Flugzeug einen Kondensstreifen hinter sich bildet, hängt von den anfangs erwähnten Faktoren ab. Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind in jeder Luftschicht unterschiedlich ausgeprägt. Es ist möglich, dass bei zwei Flugzeugen mit ähnlicher Flughöhe nur bei einem ein Kondensstreifen entsteht, wenn beispielsweise die Luftfeuchtigkeit am Ort des zweiten Flugzeugs geringfügig anders ist. Sogar zwei Flugzeuge auf gleicher Flughöhe und mit gleichen Umgebungsbedingungen bilden nicht zwingend identische Kondensstreifen. Grund dafür sind unterschiedliche Abgastemperaturen, Mischung der Luft hinter den Triebwerken und die triebwerksabhängige Menge von ausgestoßenem Wasser und Russpartikeln. Bei modernen Triebwerken treten häufiger Kondensstreifen auf als bei älteren Konstruktionen: Moderne Triebwerke erzeugen wegen dem geringeren Treibstoffverbrauch kühleren Abgase als ältere Konstruktionen, was häufiger zur Kondensation von Wasserdampf führt

Kondensstreifen entstehen auch an Stellen des Flugzeugs, wo sich gar kein Triebwerk befindet. An stark gewölbten Teilen (wie beispielsweise an Verschaltungen von Klappen am Flügel) wird die vorbeiströmende Luft beschleunigt. Dies bewirkt eine Reduktion des Luftdrucks mit Ausdehnung der Luft. Durch die Ausdehnung wird die Luft abgekühlt. Gibt es genügend Wasserdampf, so führt die Kühlung zur Kondensation des Wasserdampfs, was wiederum zu einem Kondensstreifen führt. Flugpassagiere können diesen Vorgang beispielsweise am Flügel beobachten (Abb. 2).

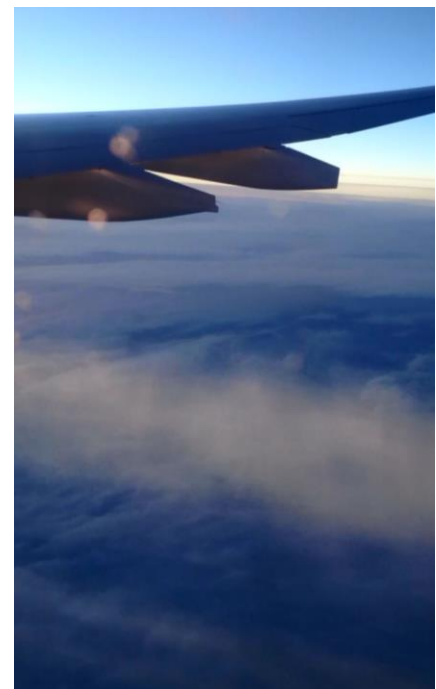


Abb. 2 Flug über dem Jura, 20. März 2014, Flughöhe ca. 11 km. Zweiter Kondensstreifen, erzeugt vom Übergang zwischen Rumpf und Flügel © BAZL

4. Klimawirkung

Nach heutigem Wissen beeinflussen durch Flugzeuge angeregte Schleierwolken insgesamt das Klima. Die Luftfahrtindustrie versucht, diesen Effekt zu reduzieren. Derzeit laufen Forschungsprogramme, um wetterabhängig kurzfristige Anpassungen der Flughöhe vorzunehmen, ohne den Ausstoss von klimawirksamen CO₂ zu steigern. Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt haben gezeigt, dass eine Änderung der Flughöhe von wenigen hundert Metern die Bildung von Schleierwolken verhindern kann. Allerdings ist bei solchen Änderungen die Einhaltung von Mindestabständen zwischen Flugzeugen schwierig. Zudem führt das Verlassen von optimalen Flughöhen zu mehr Treibstoffverbrauch. Aus diesen Gründen werden solche Anpassungen zurzeit nicht vorgenommen.

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL hat sich in den vergangenen Jahren stark für die Entwicklung eines globalen Feinstaubstandards für Flugzeugtriebwerke engagiert, um die Feinstaubemissionen im Flugverkehr insgesamt zu senken. Seit 1. Januar 2020 sind alle grösseren in Produktion befindlichen Flugzeugtriebwerke nach dem neuen Standard zertifiziert. «Sustainable aviation fuels» (SAF Flugtreibstoffe, welche z.B. aus biogenen Abfällen oder direkt synthetisch möglichst CO₂-neutral gewonnen werden) reduzieren die Feinstaubemissionen der Flugzeugflotten ebenfalls, auf Grund ihrer chemisch optimaleren Zusammensetzung. Die reduzierten Feinstaubemissionen helfen mit, die Klimawirkung von Kondensstreifen durch Flugzeuge zu reduzieren, ohne den CO₂-Ausstoss zu steigern.

Die Antwort auf den parlamentarischen Vorstoss von Nationalrat Luc Recordon im Jahr 2007 zeigt eine Übersicht über die Luftfahrzeugemissionen:

<https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20073387>.

5. Die Chemtrail-These

Im Internet finden sich auf einschlägigen Seiten vielfältige Informationen über gezielte Sprüheinsätze mit Flugzeugen. Gemäss Verschwörungstheorien dienten diese so genannten Chemtrails der Wettermanipulation, der gezielten Bevölkerungsreduktionen oder militärischen Zwecken.

Die Entstehung der Chemtrail-Theorie steht unter anderem im Zusammenhang mit dem amerikanischen Patent „Stratospheric Welsbach seeding for reduction of global warming“, in welchem das Ausbringen von Chemikalien zur Kühlung des Klimas beschrieben wird. Im Jahre 2001 hat der UNO-Ausschuss für Klimafragen (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) diese Methode als eine theoretische Möglichkeit erwähnt, die Klimaerwärmung zu beeinflussen. Verfechter und Verfechterinnen der Chemtrail-These nahmen dies als Beweis für die Durchführung von gezielten Flügen zum Versprühen von Chemikalien genommen. Die These wurde dahingehend erweitert, dass nicht primär die Klimaerwärmung bekämpft werden sollte, sondern dass mit den Chemikalien vielmehr die Bevölkerung gefügig gemacht oder sogar vergiftet werden sollte.

Diese Behauptungen sind unhaltbar:

- Die Bildung von Kondensstreifen in den unterschiedlichsten Ausprägungen ist ein natürlicher Vorgang, welcher durch Flugzeuge ausgelöst wird. Dies konnte seit den frühen Tagen der Luftfahrt beobachtet werden, beispielsweise schon während des zweiten Weltkriegs bei hoch fliegenden Bombern. Die gesteigerte Antriebseffizienz heutiger Flugzeuge und die Zunahme grosser Flugzeuge kann die Bildung von Kondensstreifen begünstigen.
- Das riesige Volumen von ausgedehnten Wolken, die sich aus Kondensstreifen bilden können, stammt vom Wasserdampf der Umgebungsluft. Ein Flugzeug wäre gar nicht in der Lage, genügend Substanzen zu transportieren, die so grosse, sichtbare Wolkenvolumen entstehen lassen könnten.
- Die für potenzielle Sprüheinsätze in Frage kommenden Flugzeuge müssten für diesen Einsatz ein technisch aufwändiges Zertifizierungsverfahren durchlaufen, das von den Aufsichtsbehörden umfassend geprüft würde. Dem BAZL ist kein entsprechender Umbau bekannt.

- Triebwerke und Treibstoffsysteme sind für genau spezifizierten Treibstoff gebaut und zugelassen. Dem BAZL sind keine Triebwerkszertifizierungen für Beigaben von Aluminium oder ähnlichen Substanzen bekannt. Zudem wurden in der Schweiz in den letzten Jahren im Rahmen von Triebwerktests systematisch Treibstoffproben verschiedener Zulieferer analysiert. Wie bei allen anderen erdölbasierten Treibstoffen und Ölen können Spuren von Aluminium und Barium gefunden werden, weil diese natürlicherweise Bestandteil des Rohstoffs Erdöl sind. Eine aktive Beigabe von Aluminium und Barium in den Flugtreibstoff kann ausgeschlossen werden.
- In der Schweiz beträgt der Anteil von Aluminium im Feinstaub weniger als 0.5 %, jener von Barium weniger als 0.05 % und jener von Strontium weniger als 0.01 %. Auch im Boden kommen diese Stoffe vor, sodass sie nach Aufwirbelung in der Luft oder im Regenwasser mit heutigen, sehr feinen Analysemethoden nachgewiesen werden können. Bei einem grossen Anteil des in der Luft gemessenen Aluminiums handelt es sich deshalb um natürlichen Mineralstaub – Aluminium ist das dritthäufigste Element der Erdkruste. Ungefähr ein Viertel stammt aus dem Strassenverkehr. Seit den 1990er Jahren sind die ermittelten Aluminium- und Bariumkonzentrationen in der Schweiz praktisch konstant geblieben. Diese sind rund 50 Mal tiefer als Richtwerte, welche dem Gesundheitsschutz dienen. Somit besteht in der Schweiz kein Risiko für die Gesundheit der Bevölkerung durch die erwähnten Stoffe in der Umgebungsluft.
- Das Impfen von Wolken bzw. Gewitterwolken durch Hagelraketen beruht darauf, dass sich Eiskristalle verbinden sollen, so dass sie frühzeitig aus einer bestehenden Wolke fallen, dann schmelzen und somit als Regen und nicht als Hagel auf die Erdoberfläche gelangen. Dieser Vorgang kann als eine Art kleinräumige Wettermanipulation bezeichnet werden, hat indessen gar nichts mit Chemtrails zu tun.
- Das systematische Versprühen von Chemikalien durch geheime Flugmissionen ist aufgrund der permanenten Kontrolle des Luftraums praktisch unmöglich. Alle Flugzeuge im europäischen Luftraum müssen einen detaillierten Flugplan einhalten, der durch die Flugsicherung überwacht wird. In der Schweiz reicht der kontrollierte Luftraum bis in eine Höhe von rund 20 km. Ein nicht bewilligter, nicht identifizierbarer Einflug kann einen luftpolizeilichen Einsatz der Schweizer Luftwaffe auslösen.
- In der Schweiz würden Luftraumüberwachung, Gesundheitsschutz- und Umweltschutzbehörden umgehend intervenieren, wenn sie Anhaltspunkte für die praktische Anwendung solcher Methoden hätten.
- Gezielte grossräumige Eingriffe in das Klimasystem, die das Ziel haben, die vom Menschen verursachte globale Erwärmung abzuwenden oder zumindest zu vermindern, wurden in der Vergangenheit unter Geoengineering, Climate Engineering oder ähnlichen Umschreibungen zusammengefasst. Die Stossrichtungen – Negativemissionstechnologien (NET) und das solare Strahlungsmanagement (SRM) – sind aber sehr verschieden, weshalb diese Oberbegriffe missverständlich sind (vgl. [BAFU-Fachseite zu NET](#) und [BAFU-Faktenblatt zu NET](#)).
- NET (auch als Carbon Dioxide Removal CDR bezeichnet) entziehen der Erdatmosphäre dauerhaft das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂). Sie greifen in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein und richten sich direkt gegen die Grundursache des Klimawandels. SRM hingegen zielt darauf ab, die auf der Erdoberfläche eintreffende Sonneneinstrahlung zu verringern, um so die globale Erwärmung zu begrenzen. SRM adressiert entsprechend nur das Symptom der Klimaerwärmung und nicht die Ursache, die erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.
- Eine der möglichen SRM-Vorgehensweisen ist die Einbringung von Partikeln (Aerosolen) in hohe Luftschichten, wo sie über mehrere Jahre hinweg verbleiben. Forschung zu SRM findet statt, auch zu den Gefahren der verschiedenen Ansätze. Derartige Eingriffe würden in der Schweiz nicht genehmigt werden, da sie unter anderem gegen das Umweltschutzgesetz verstossen. Auch international bestehen grosse Bedenken gegenüber dem

Einsatz von SRM; die UN-Biodiversitätskonvention hat ein de-facto Moratorium beschlossen und die Schweiz setzt sich ein, dass die Kontrolle von SRM international verstärkt wird.