

APRÈS PARIS: VERKEHR IST WAS BESONDERES

TEIL 9 DER SERIE: DIE KONSEQUENZEN DER KLIMAKONFERENZ VON PARIS

Angesichts des 2°-Ziels von Paris stellt der Verkehr eine besondere Herausforderung dar. Zum einen ist er ein großer Sektor, dessen CO₂-Äquivalent-Emissionen trotz aller Bemühungen zur Reduzierung der Klimaerwärmung noch steigen. Zum anderen gibt es beim Verkehr eine Reihe von Nicht-CO₂-Emissionen, die im Vergleich zu anderen Sektoren in ihrer Wirkung auf das Klima besonders groß sind.

Beitrag des Verkehrs zum CO₂

Während die gesamten anthropogenen CO₂-Äquivalent-Emissionen in der EU-15 im Vergleich zu 1990 um knapp 23 % bis 2014 abnahmen, stiegen im gleichen Zeitraum die Emissionen des Verkehrs um mehr als 17 % an, die des Luftverkehrs verdoppelten sich sogar.¹⁾ Im Zeitraum von 1990 bis 2014 stieg der Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen von 21 auf über 30 %. Falls es nicht gelingt, die Emissionen des Verkehrs in den nächsten Jahren zu reduzieren, während bei anderen Sektoren weiterhin Fortschritte bei der Verringerung des Einsatzes fossiler Brennstoffe gemacht werden, wird der Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen weiter wachsen.

Hier steckt die Politik in einem Dilemma. Einerseits besteht nach wie vor eine große Verkehrsnachfrage, andererseits sind die Möglichkeiten für einen wirklich klimafreundlichen Verkehr begrenzt. Während z.B. Fahrzeuge mit Dieselmotoren besonders effizient hinsichtlich der direkten Emission von Treibhausgasen (primär CO₂) sind, emittieren sie eine Reihe weiterer Spurenstoffe wie Stickoxide (NO_x) und Ruß, die die Luftqualität beeinträchtigen. Fahrzeuge mit Elektroantrieb (BEV²⁾) sind kurzfristig nur vermeintlich ein Ausweg. Sie vermeiden zwar einen Teil der Emissionen mit negativen Auswirkungen auf die Luftqualität, emittieren dennoch in beträchtlichem Umfang Partikel z.B. durch Abrieb von Bremsen und Reifen. Darüber hinaus trifft die Annahme nicht zu, dass Elektrofahrzeuge ihre Energie nur regenerativ beziehen. In Deutschland wird z.B. die gesamte re-

generativ erzeugte Energie bereits durch stationäre Anlagen verbraucht, d.h. die elektrische Energie für Elektrofahrzeuge muss zusätzlich mittels fossiler Brennstoffe, z.B. Erdgas oder Braunkohle, erzeugt werden. Dann liegen für einen Mittelklassewagen die zugehörigen CO₂-Emissionen bei 90 bzw. 200 g/km.³⁾

Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen des Verkehrs

Neben der Emission des Treibhausgases CO₂ beeinflusst der Verkehr das Klima noch durch weitere Effekte, so genannte Nicht-CO₂-Effekte. Obwohl die meisten dieser Effekte im Prinzip auch bei anderen Sektoren auftreten, sind diese beim Verkehr besonders groß. Die Nicht-CO₂-Effekte wirken auf unterschiedlichen Wegen auf das Klima (Bild 1).

(1) Der Verkehr emittiert Treibhausgase, die nicht im Kyoto-Korb der CO₂-Äquivalent-Emissionen erfasst sind. An erster Stelle ist hier der Wasserdampf (H₂O) zu nennen, den Flugzeuge in Reiseflughöhe mit geringer Hintergrundkonzentration freisetzen, zu einem beträchtlichen Teil innerhalb der Stratosphäre. Hier ist die atmosphärische Lebensdauer von H₂O deutlich größer als in Bodennähe. Deshalb kann H₂O aus Flugzeugen sich akkumulieren. Wegen der in Reiseflughöhe herrschenden niedrigen Temperaturen sind dort Treibhausgase besonders klimawirksam.

(2) Als Nebenprodukte der Verbrennung emittiert der Verkehr Stoffe wie NO_x und (flüchtige) Kohlenwasserstoffe (VOC⁴⁾). Über chemische Reaktionen führen diese zur Bildung von (indirekten) Treibhausgasen. An erster Stelle ist hier Ozon (O₃) zu nennen, das sowohl im infraroten (als Treibhausgas) als auch im ultravioletten Bereich strahlungsaktiv ist. Zudem ist O₃ in der Atemluft gesundheitsschädlich. Die Produktionsrate von O₃ hängt nicht-linear von der NO_x-Konzentration ab. Zunächst wächst die Produktionsrate mit zunehmender NO_x-Konzentration, erreicht dann ein Maximum und fällt anschließend bei noch höherer NO_x-Konzentration wieder ab. Je nach Ort und Höhe der NO_x-Emissionen variiert die atmosphärische Lebensdauer des zusätzlichen O₃ zwischen einigen Stunden und etlichen Wochen. Damit wird das verkehrsbedingte O₃ (im Gegensatz zum CO₂) nicht homogen in der Atmosphäre verteilt.

Als Nebenprodukt der verkehrsbedingten O₃-Produktion entsteht OH, das seinerseits dann unter anderem zu einem Abbau von Methan (CH₄) führt, d.h. die Konzentration des Treibhausgases CH₄ wird verringert. Die Lebensdauer von CH₄ liegt bei knapp 10 Jahren, daher wird die verkehrsbedingte Reduktion von CH₄ weitgehend homogen in der Atmosphäre verteilt. In Folge der reduzierten CH₄-Konzentration verringert sich die na-

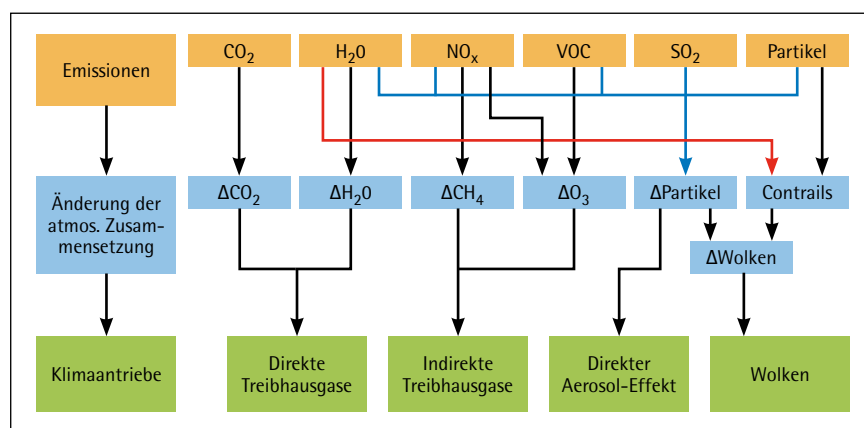


Bild 1: Schematische Darstellung wichtiger Klimawirkungen des Verkehrs.

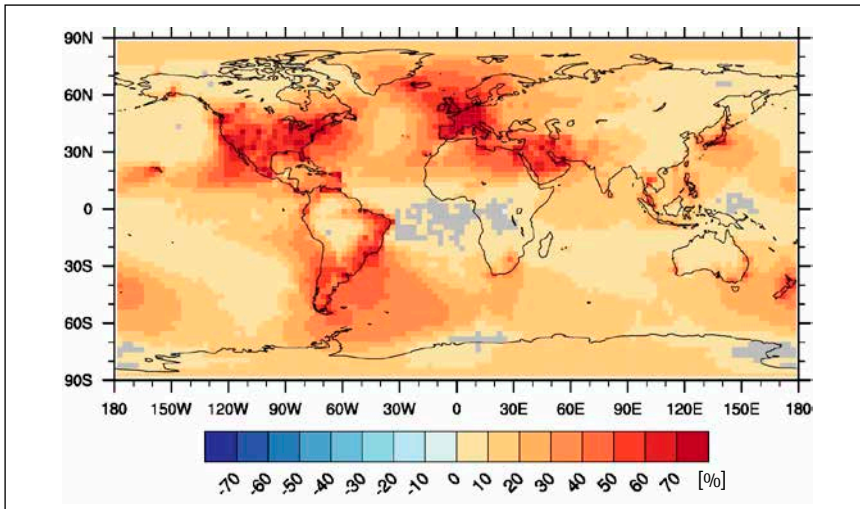


Bild 2: Relativer Beitrag des Rußes aus dem Landverkehr zur gesamten bodennahen Rußkonzentration zum Anfang des Jahrhunderts. Der relative Beitrag in Ostasien ist so gering, weil es dort andere starke Emittenten gibt (z.B. Industrie und Hausbrand)

türliche O_3 -Produktion und damit auch die O_3 -Konzentration (mit der gleichen Lebensdauer wie CH_4).

(3) Der Verkehr emittiert Aerosole und deren Vorläufer. Zu den ersten sind z.B. Ruß (Bild 2 ⁵⁾) oder Reifen- und Bremsabrieb zu zählen; zu den zweiten gehören Schwefelprodukte (z.B. SO_2) als Folge des Schwefels im Treibstoff. Die Aerosole sind zum einen häufig direkt strahlungsaktiv; so führt Ruß zu einer Erwärmung, während aus SO_2 entstehende Schwefelsäure-Wasser-Tröpfchen kühlend wirken. Zum anderen haben die Aerosole eine indirekte Wirkung auf die Bewölkung der Erde. Sehr viele von ihnen sind Wolkenkondensationskerne, d.h. sie triggern die Bildung von Wolken und führen so zu zusätzlichen Wolken und zu Wolken mit kleineren Tröpfchen/Eiskristallen. Damit erfolgt ein Eingriff in den Strahlungshaushalt, der größer ist als der direkte Aerosoleffekt. Je nach Höhe der modifizierten Wolken, nach Helligkeit des Untergrundes, nach Höhe des Sonnenstands und natürlicher Hintergrundbewölkung, kann dieser Effekt kühlend oder erwärmend sein; niedrige Wolken, wie sie z.B. aufgrund der Schwefelemissionen der Schifffahrt entstehen, wirken in der Regel kühlend, während hohe Wolken eher erwärmend wirken.

(4) Schließlich kann der Luftverkehr durch seine Wasserdampfemissionen bei geeigneten atmosphärischen Bedingungen die Bildung von Kondensstreifen (contrails) anregen. In vielen Fällen lösen sich diese rasch wieder auf. Ein beträchtlicher Anteil wächst unter Einbindung des Wasserdampfs aus der Hintergrundatmosphäre zu langlebigen Kondensstreifen, die bereits heute einen beträchtlichen Beitrag zum Strahlungshaushalt liefern. In einigen Fällen entwickeln sich die Kon-

densstreifen weiter zu so genannten Kondensstreifen-Zirren mit einer Lebensdauer von etlichen Stunden, die sich kaum von natürlichen Zirren unterscheiden. Während im Einzelfall Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren sowohl kühlend als auch erwärmend wirken können, führen diese Wolken in ihrer Gesamtheit zu einer Erwärmung des Klimas.

Quantitativer Vergleich verschiedener Beiträge zum Klimawandel

Wie kann man die oben genannten Beiträge des Verkehrs zum Klimawandel quantitativ vergleichen? Dazu muss man mittels einer geeigneten Metrik die unterschiedlichen Beiträge auf eine einheitliche Skala abbilden. Die Wahl der Metrik hängt davon ab, welche spezifische Frage man beantworten möchte.

Zum Vergleich verschiedener Beiträge des bislang eingetretenen Klimawandels ist der Strahlungsantrieb (RF ⁶⁾) eine oft verwendete Metrik. RF ist eine rechnerisch bestimmte Größe: Man startet von einer vorindustriellen Erde im Quasigleichgewicht, d.h. die einfallende solare Strahlung und die von der Erde emittierte langwellige Strahlung sind gleich groß. Nun fügt man ein Treibhausgas (z.B. verkehrsbedingtes Ozon) hinzu. Dadurch verändert sich die Strahlungsbilanz der Erde. Diese Abweichung vom Gleichgewicht bezeichnet man als RF. Aufgrund dieses Ungleichgewichts wird sich die Temperatur der Erde so lange ändern, bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Ist RF positiv, wird die Erde sich erwärmen, im anderen Fall abkühlen. RF ist in erster Ordnung proportional zu der zu erwartenden Änderung der global gemittelten Bodentemperatur. Ein RF von $+1 \text{ W/m}^2$ führt zu einer Erhöhung der global ge-

mittelten Bodentemperatur um 0,8 bis 1,5 K.

Für einige ausgewählte Beiträge des Verkehrs sind die zugehörigen Strahlungsantriebe in Bild 3 ⁷⁾ dargestellt. Beim CO_2 -bedingten RF dominiert erwartungsgemäß der Landverkehr, während Schifffahrt und Luftverkehr ähnlich groß sind. (Der Strahlungsantrieb aufgrund aller anthropogenen CO_2 -Emissionen lag im Jahr 2005 bei ca. $1,7 \text{ W/m}^2$ ⁸⁾, d.h. der Anteil des Landverkehrs betrug 10 %, der Anteil des Gesamtverkehrs summiert sich auf ca. 14 %.) Beim rasch durch Smogreaktionen gebildeten Ozon verschieben sich die Verhältnisse; der Beitrag des Landverkehrs ist nur noch doppelt so hoch wie der aus der Schifffahrt oder der Luftfahrt, weil Schifffahrt und Luftfahrt in Regionen mit geringerer NO_x -Hintergrundkonzentration und damit höherer spezifischer Ozonproduktionsrate emittieren; zudem lebt Ozon aus der Luftfahrt länger und hat einen größeren Strahlungsantrieb pro Ozonmolekül. Noch extremer ist es beim Methanabbau; hier dominiert die Schifffahrt, während Landverkehr und Luftfahrt ähnliche große Strahlungsantriebe haben. Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren gibt es nur bei der Luftfahrt. Man beachte, dass das zugehörige RF größer als das aufgrund der CO_2 -Emissionen ist. Bei den direkten und indirekten Aerosoleffekten ist das RF der Schifffahrt in etwa so groß wie der CO_2 -Beitrag des Landverkehrs, allerdings mit anderem Vorzeichen. Die Ursache liegt zum einen in den vergleichsweise hohen Schwefelemissionen der Schifffahrt, zum anderen daran, dass Wolken über dem Ozean im Vergleich zum Untergrund hell sind.

Der Strahlungsantrieb RF ist eine rückwärts schauende Metrik. Sie bewertet den kumulativen Effekt aller Emissionen eines Stoffes bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (oben 2005). Diese Metrik ist jedoch ungeeignet zum Regulieren von Emissionen oder anderen Beiträgen zum Klimawandel, da man nur zukünftige Emissionen regulieren kann. Für diesen Zweck werden eine Reihe von anderen (vorausschauenden) Metriken diskutiert. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang das Treibhausgaspotential (GWP ⁹⁾) aus dem Kyoto-Protokoll. Hierbei wird die aufgrund einer Emission eines Treibhausgases zu einem Zeitpunkt entstehende Imbalanz im Strahlungshaushalt über etliche Jahre H_0 integriert. So berücksichtigt man implizit, wie lange der Spurenstoff in der Atmosphäre bleibt. Während diese Metrik gut bei langlebigen Treibhausgasen funktioniert, ist sie ungeeignet für kurzlebige Effekte, die beim Verkehr eine wichtige Rolle spie-

len. Einen möglichen Ausweg bietet die so genannte mittlere Temperaturantwort (ATR ¹⁰), welche analog zum GWP die durch einen Klimateffekt hervorgerufene Temperaturänderung über einen Zeitraum H_0 integriert. ¹¹ Diese Metrik berücksichtigt nicht nur das „Gedächtnis“ des Klimasystems aufgrund der atmosphärischen Lebenszeit eines Stoffes, sondern auch das „Gedächtnis“ aufgrund der thermischen Trägheit des Klimasystems (Wärmekapazität).

Handlungsmöglichkeiten

Im Folgenden diskutieren wir einige Beispiele, wie man die Klimawirkung des Verkehrs reduzieren und gleichzeitig möglichst viel der Nachfrage nach Mobilität erfüllen kann.

Beim Straßenverkehr ist eine wichtige Option die Reduzierung der spezifischen Emissionen, d.h. der Emissionen pro Personenkilometer bzw. pro Tonnenkilometer, durch technische und regulative Maßnahmen. Zu letzteren gehören z.B. Geschwindigkeitsbeschränkungen. Bei den technischen Maßnahmen bieten sich alternative regenerative Kraftstoffe und alternative Antriebe an. Beide können hinsichtlich des Klimaschutzes erst dann wirksam werden, wenn praktisch keine fossilen Energieträger mehr zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt werden. Derzeit ist der Einsatz solcher Technologien primär ein Vehikel zur Förderung der Entwicklung der entsprechenden Fahrzeuge und Kraftstoffe. Die alternativen Kraftstoffe, entweder aus der Landwirtschaft oder durch Einsatz elektrischer Energie gewonnen, lassen sich z.B. so designen, dass weniger Ruß erzeugt wird. Im Gegensatz zur elektrischen Energie lassen sie sich leichter speichern und ihre Leistungsdichte ist höher als die von elektrischer Energie in Akkus.

Bei der Schifffahrt lässt sich eine deutliche Energieeinsparung und damit eine Reduktion der CO₂-Emissionen erreichen, wenn die Reisegeschwindigkeit eines Schiffes merkbar niedriger als die maximale Geschwindigkeit in Verdrängerfahrt ist. Bei einer Reihe von Nicht-CO₂-Effekten kann durch Abgasnachbehandlung, die erst in geringem Umfang eingesetzt wird, noch sehr viel erreicht werden. Im Hinblick auf das Klima ist es kontraproduktiv, den Schwefelgehalt der Treibstoffe zu reduzieren, wie es die International Marine Organization zur Verbesserung der Luftqualität und zur Reduzierung der Übersäuerung der Meere 2008 beschlossen hat. Damit reduziert sich der negative Strahlungsantrieb aufgrund des indirekten Aerosoleffekts. ¹²

Beim Luftverkehr werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, sowohl regulative

(z.B. Emissionshandel in der EU) als auch technische (Verbesserung des Fluggeräts) Maßnahmen. Ein besonders effizienter Ansatz zur Reduzierung der Klimawirkung des Luftverkehrs besteht in so genannten ökoefizienten Flugtrajektorien. Die Wirkung der Nicht-CO₂-Effekte jedes einzelnen Fluges hängt vom geographischen Ort und von der Flughöhe der Emissionen sowie vom Sonnenstand (Tageszeit, Jahreszeit) und von der gerade aktuellen Wetterlage ab. Wenn man diese Wirkungen quantifiziert, kann man eine so genannte Klimakostenfunktion berechnen, die jedem Ort, jeder Höhe und jedem Zeitpunkt einen Wert zuweist, der hoch ist, wenn dort freigesetzte Emissionen eine hohe Klimawirkung haben, und niedrig im umgekehrten Fall. Heute werden Flugtrajektorien in der Regel so geplant, dass die Betriebskosten für die Fluggesellschaft minimal werden. Analog kann man auch so optimieren, dass die Klimawirkung (oder eine Summe aus Klimakosten und klassischen Betriebskosten) über die Flugtrajektorien minimal werden. In Pilotuntersuchungen wurde bereits gezeigt, dass man mit solchen Methoden die Klimawirkung, bei nur mäßig ansteigenden Betriebskosten, substantiell reduzieren kann. In Beispielen wird für heutige Flugzeuge bei einem Anstieg der Betriebskosten um 0,5 % eine Reduktion der Klimawirkung um 25 % erzielt. ¹³ Solche Methoden ließen sich bereits mit den heutigen Flugzeugen umsetzen; mit einer an solche Verfahren angepassten Flotte wäre die Wirkung noch größer. Voraussetzung für die Umsetzung solcher Verfahren sind zum einen eine modifizierte Flugführung und zum anderen Anreize für Fluggesellschaften, ihre Flüge ökoefizient planen zu lassen, z.B. durch

Einbeziehung der CO₂-Emissionen und der Nicht-CO₂-Effekte in einen Emissionshandel. Dann erhielte z.B. eine Fluggesellschaft eine Erstattung, wenn sie einen kühlenden Kondensstreifen erzeugt, während sie für einen erwärmenden zahlen müsste. Nicht erreichen ließe sich das, wenn man, wie manchmal diskutiert, die Nicht-CO₂-Effekte durch einen konstanten Faktor dem CO₂ zuschläge.

Fußnoten

- 1) <http://di.unfccc.int/TimeSeries.aspx>
- 2) BEV = Battery Electric Vehicle
- 3) Simone Ehrenberger, DLR, pers. Mitteilung
- 4) VOC = Volatile Organic Compounds
- 5) Righi u.a., 2013: Atmos. Chem. Phys. 13, 9939-9970
- 6) RF = Radiative Forcing
- 7) Status Report 2008 – 2015, DLR-Institut für Physik der Atmosphäre
- 8) Fünfter Sachstandsbericht des IPCC (AR5), www.de-ipcc.de/de/128.php
- 9) GWP = Global Warming Potential
- 10) ATR = Average Temperature Response
- 11) Grewe und Dahlmann, 2012. In: Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends Research Topics in Aerospace. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- 12) Fuglestad u.a., 2009, Environ. Sci. Technol. 43, 9057-9062
- 13) Grewe u.a., 2014, Atmos. Env. 94, 616-625

ZUM AUTOR:

► Prof. Dr. Robert Sausen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen
robert.sausen@dlr.de

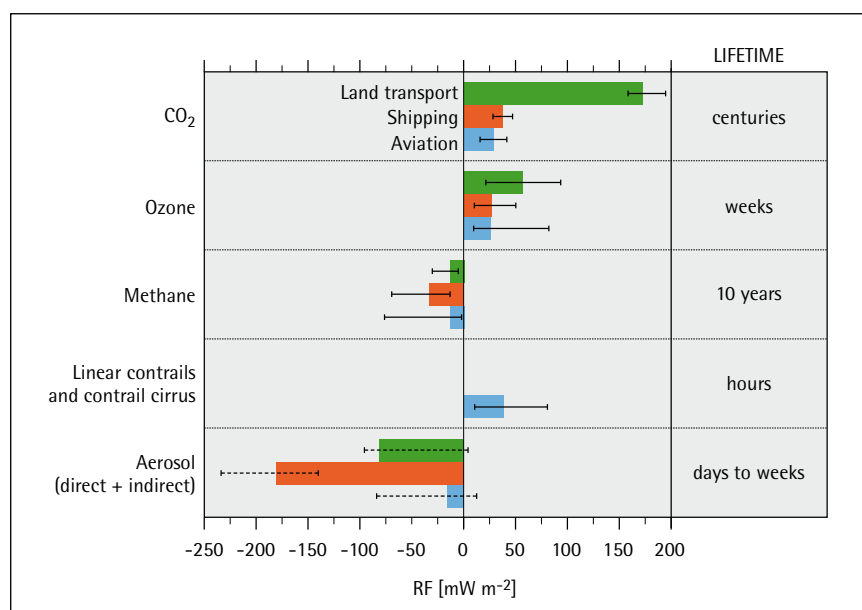


Bild 3: Ausgewählte Beiträge des Verkehrs zum Strahlungsantrieb