

# Wieviel tragen „klassische“ Luftschadstoffe zur globalen Erwärmung bei?

„Die Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels“ ist Ziel der Staatengemeinschaft. Im Kyoto-Protokoll haben die Signatarstaaten erste Schritte vereinbart, um Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Reglementiert werden sechs langlebige Gase, worunter Kohlendioxid das für den Verkehr mit Abstand wichtigste Gas ist. Allerdings stören auch andere, kürzerlebige Spurenstoffe das atmosphärische Gleichgewicht. Wie wichtig ist deren Minderung?

**D**ie kürzerlebigen Spurenstoffe, darunter Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Schwefelverbindungen und Ruß, entstehen als unerwünschte Beiprodukte bei den Verbrennungsprozessen in den Motoren der Fahrzeuge. Weil diese Spurenstoffe reaktiv sind, hängt ihr Beitrag zur Erderwärmung wesentlich von den chemischen und meteorologischen Verhältnissen, speziell am Emissionsort ab, anders als beim reaktionsträgen CO<sub>2</sub>. Daher lässt sich die im Titel gestellte Frage auch nicht eindeutig beantworten, sondern hängt vom Betrachtungszeitraum ab.

Die verschiedenen Klimawirkungen des Verkehrs wurden im europäischen Forschungsprojekt QUANTIFY untersucht und mehrere ATTICA-Sachstandsberichte fassen den Wissensstand zusammen. Hier präsentieren wir, welcher Verkehrsträger wie stark die bodennahe Lufttemperatur im globalen Mittel verändert und welche Rolle die klassischen Luftschadstoffe spielen. Die Berechnungen erfolgten für Emissionen des weltweiten Verkehrs aus dem Jahr 2000 (für Details vgl. Berntsen & Fuglestvedt 2008, Borken-Kleefeld et al. 2010, Skeie et al. 2009). Die Betrachtung nur eines Jahres ist nützlich, um die verschiedenen Effekte unterscheiden zu können. Inzwischen sind die Verkehrsmengen in den Regionen mit starkem Wirtschaftswachstum deutlich angestiegen; dadurch stiegen auch der weltweite Kraftstoffverbrauch und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß (vgl. IEA 2009). Die Emissionen der hier diskutierten Luftschadstoffe sind in den Industriestaaten im Straßenverkehr tendenziell rückläufig, in den übrigen Staaten noch im Wachstum begriffen. Im Flug- und Schiffsverkehr überwiegt das starke Mengenwachstum die dortigen fahrzeugseitigen Emissionsminderungen. D. h. in der Summe hat es leichte Verschiebungen gegeben, die aber für die

hier grundsätzlich diskutierten Effekte keine wesentliche Einschränkung bedeuten (vgl. IEA 2009 und Uherek et al. 2010).

## Vergleich auf der Basis von Kohlendioxid

Betrachten wir zunächst die Erwärmung, die allein auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Verkehrsträger zurückzuführen ist. Diese ist im Kyoto-Protokoll erfasst, wobei wir hier aber auch die internationalen Flugverkehre und die Hochseeschifffahrt einbeziehen (vgl. die schwarzen Balken in *Abbildung 1a*).

Der Verkehr aus dem Jahr 2000 führt auch nach 50 Jahren noch zu einer Erwärmung von etwas mehr als 2,5 mK; davon sind etwa 40 % auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Pkw zurückzuführen, ca. 20 % auf die schweren Lkw, 10 % auf die Hochseeschifffahrt, 9 % bzw. 3 % auf den Passagier- bzw. Frachtflugverkehr, etwa 8 % auf die leichten Lkw, 6 % auf den weltweiten Busverkehr und etwa je 2 % auf Personen- und Güterverkehr mit der Eisenbahn sowie schließlich Fahrten mit motorisierten Zwei- und Dreirädern. Zum Vergleich: Alle anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2000 führen nach 50 Jahren zu einer Erwärmung von ca. 15 mK.

Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs werden zu mehr als einem Drittel von den USA bestimmt. Die hohe Fahrleistung mit großen Pkw, SUVs, Vans und Pick-ups treiben den durchschnittlichen Verbrauch, und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen, in die Höhe. Dagegen sind Busse, Zwei- und Dreiräder und in einem geringeren Maße die Eisenbahn die Hauptverkehrsmittel in den meisten Schwellen- und Entwicklungsländern. Die Emissionen des Flugverkehrs werden vor allem durch die Langstreckenflüge (> 3000 km) bestimmt. Deren Anteile für Personen- und Frachtverkehr sind hier entsprechend ihrem Gewicht aufgeteilt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Eisenbahn stammen zum Teil von dieselbe-

triebenen Zügen, zum größeren Teil aber von der Stromerzeugung in Kraftwerken. Der entsprechende Emissionsfaktor hängt stark vom verwendeten Primärenergieträger ab und sinkt in dem Maße, in dem Atomstrom, Wasserkraft oder regenerative Energieträger genutzt werden; er steigt mit dem Anteil an Kohle in der Verstromung.

CO<sub>2</sub>, das einmal emittiert ist, bleibt für Jahrhunderte in der Atmosphäre. Daher klingt die Erwärmung aus dem Jahr 2000 nur langsam ab. Die relativen Anteile der verschiedenen Verkehrsträger bleiben auch zu den anderen dargestellten Zeitschnitten gleich (schwarze Balken in *Abbildung 1b* und *c*). Aufgrund der früheren CO<sub>2</sub>-Emissionen, die ja gleichfalls für Jahrhunderte wirksam sind, und der zukünftigen Emissionen, steigt die Erwärmung immer weiter.

## Vergleich mit allen klimarelevanten Gasen, Aerosolen und Wolkenprozessen

Berücksichtigen wir nun auch die Klimawirkungen der Luftschadstoffe, Aerosole und Wolken (farbige Balken in *Abbildung 1*). Je nach Verkehrsträger ergibt sich nun eine höhere oder auch eine niedrigere Erwärmung. Weil zusätzlich die atmosphärische Lebensdauer der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte kürzer als die von CO<sub>2</sub> ist, hängen Größe und relative Bedeutung noch vom betrachteten Zeithorizont ab. Daher lässt sich auch kein konstanter Multiplikationsfaktor angeben, um die Wirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte relativ zu CO<sub>2</sub> zu erfassen.

Besonders stark sind die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte beim Luftverkehr und bei der Schifffahrt: Die Stickoxid-Emissionen der Flugzeuge in größerer Höhe sind besonders effizient bei der Bildung von Ozon, und Ozon hat in diesen Höhen eine größere Strahlungswirkung als in Bodennähe. Zudem führen durch den Luftverkehr angeregte Wolken (z. B. Kondensstreifen,

Kondensstreifenzirren oder Ruß-Zirren) zu einer zusätzlichen Erwärmung, wie man sie in diesem Maße beim Landverkehr nicht findet. Die Erwärmung, die auf diese Effekte zurückgeht, ist in den ersten fünf Jahren um ein Mehrfaches größer als die Erwärmung aufgrund der CO<sub>2</sub>-Emissionen allein (vgl. *Abbildung 1c*). Damit führt der Luftverkehr kurzfristig zur stärksten Erwärmung aller hier betrachteten Verkehrsträger.

Mit der Zeit werden aber die Sekundärwirkungen von Ozon wirksam, die in der Summe abkühlend wirken. Die Ozonbildung geht mit einem Abbau von Methan einher. Dadurch wird ein starkes Treibhausgas reduziert, was als Kühlung betrachtet werden kann. Da die Lebensdauer von Ozon erheblich kürzer ist als die von Methan, nimmt der erwärmende Ozonbeitrag mit der Zeit schneller ab als der kühlende Methanbeitrag (vgl. *Abbildung 1b*, besonders deutlich bei schweren Lkw und Flugzeugen. Man beachtete die unterschiedlichen Temperaturskalen für verschiedene Zeithorizonte.). Zum Dritten wird auf mittlere Zeitskala zusammen mit dem reduzierten Methan auch Ozon wieder abgebaut, allerdings in geringerem Umfang als anfänglich aufgebaut wurde (vergleiche den Beitrag von Ozon und reduziertem Methan fünf bzw. 20 Jahre nach der Emission in *Abbildung 1*).

Schwefel- und Partikel-Emissionen führen zu einem weiteren wichtigen Effekt, sie tragen nämlich zur Bildung von niedrigen Wolken bei. Diese Wolken kühlen die Erde. Besonders ausgeprägt ist das beim Schiffsverkehr, weil hier helle Wolken, die Sonnenlicht reflektieren über einem dunklen Hintergrund, nämlich den Ozeanen, gebildet bzw. so modifiziert werden, dass sie Sonnenstrahlung noch besser reflektieren. Beim Schiffsverkehr überwiegen diese kühlenden Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte die CO<sub>2</sub>-bedingte Erwärmung noch für Jahrzehnte: Nach fünf Jahren führen die Emissionen der

Hochseeschifffahrt zu einer Abkühlung von 3,5 mK (*Abbildung 1c*). Auch nach 20 Jahren dominiert noch der abkühlende Effekt bei den Schiffen (*Abbildung 1b*). Früher oder später aber verschwinden alle kurzlebigen Gase, Aerosole, Wolken und ihre Temperatureffekte. Auf lange Sicht bleibt schliesslich die Erwärmung durch das zuvor ausgestoßene CO<sub>2</sub> (*Abbildung 1a*), wie bei allen Verkehrsträgern. Beim Straßenverkehr werden die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte durch die Emissionen von Ruß und Schwefel, vor allem aber durch Vorläufersubstanzen von Ozon bestimmt. Dabei sind die Mischungsverhältnisse der Emissionen bei den Lkw, die fast ausschließlich mit Dieselmotoren angetrieben werden, anders als etwa bei den Pkw, die überwiegend mit Otto-Motoren fahren. In der Konsequenz führen die Emissionen der Lkw zu einer wesentlich stärkeren Ozonbildung, aber auch zu einem erhöhten Methanabbau (genau wie oben beschrieben); die Abkühlung durch erhöhte Schwefelemissionen wird in etwa durch eine Erwärmung infolge von Rußemissionen kompensiert. Fünf Jahre nach den Transporten führen diese Effekte zu einer deutlichen Erwärmung (ca. 40 % relativ zum CO<sub>2</sub>-Effekt), nach 20 Jahren führen sie zu einer deutlichen Abkühlung (um etwa zwei Drittel relativ zum CO<sub>2</sub>-Effekt) und noch 50 Jahre später ist eine leichte Abkühlung berechenbar. Bei den Pkw führt vor allem die Ozonbildung kurzfristig zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-bedingten Erwärmung um fast 50 %; nach 20 Jahren ist diese Erhöhung nur noch gering und der Klimateffekt wird ab dann fast ausschließlich durch die Menge CO<sub>2</sub>, also im Wesentlichen durch die Menge an verbrauchten Treibstoff bestimmt. In Europa sind die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Straßenverkehrs wesentlich geringer als im globalen Mittel, weil die Flotte der Kfz mit besseren Abgasreinigungstechniken ausgestattet ist und die Kraftstoffe schwefelarm sind. In dem

Maße, in dem die Emissionsstandards der Fahrzeuge hier und weltweit weiter verschärft werden, gehen auch die Klimawirkungen der klassischen Luftschadstoffe zurück.

Die Berechnung der Klimawirkungen der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte ist deutlich unsicherer als die von CO<sub>2</sub>, weil viel mehr lokale Faktoren einfließen. Das gilt insbesondere für die verschiedenen Wolkeneffekte, die Wirkung der Schwefelemissionen und auch für die Ozon-Methan-Wechselwirkungen. Diese Unsicherheiten sind besonders bedeutsam auf den kürzeren Zeitskalen (siehe *Abbildung 1c*). In der Konsequenz sind die Zahlenwerte und die daraus abgeleiteten Verhältnisse nicht exakt, aber die dargestellten Effekte und die Schlussfolgerungen sind als robust anzusehen.

### Konsequenzen für Politik

Ergeben sich durch die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte neue Möglichkeiten oder Handlungsoptionen für Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr? Wie viel könnte eine verstärkte Minderung dieser kurzlebigen Stoffe zum Klimaschutz beitragen?

Auf kurzen Zeitskalen bestimmen die klassischen Luftschadstoffe und die Wolkeneffekte die Temperaturänderung besonders stark. Werden sie nicht gemindert, tragen sie jedes Jahr von neuem zur Erwärmung bei. Wenn sie gemindert werden *ohne* gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erhöhen, ist das gut für den Klimaschutz. Die Wirkung der Minderungen wäre darüber hinaus schon kurzfristig spürbar. Wenn allerdings derartige Minderungen *nur mit* einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu realisieren sein sollten, hängt der Nutzen der betrachteten Maßnahmen davon ab, wie viel CO<sub>2</sub> zusätzlich emittiert wird und welchen Zeithorizont man betrachtet.

Die langfristige Erwärmung wird durch die Höhe der CO<sub>2</sub>-Emission bestimmt, weil

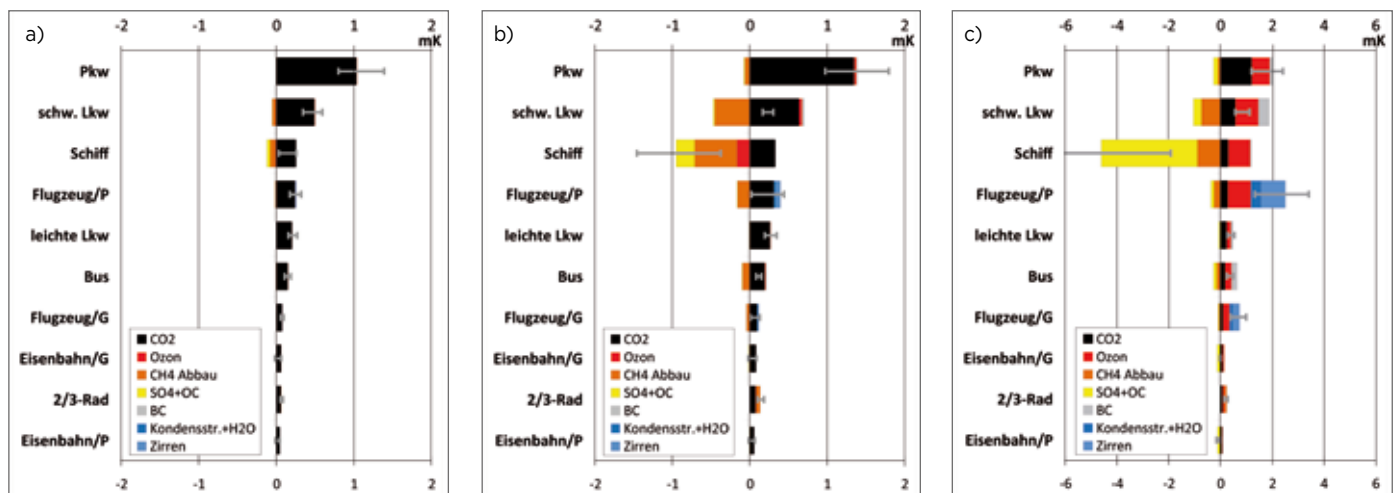


Abb. 1: Temperaturänderung infolge der Emissionen der verschiedenen Verkehrsträger aus dem Jahr 2000, differenziert nach den Effekten der verschiedenen Gase, Aerosole und Wolken. Temperaturänderung in a) 50 Jahren, b) 20 Jahren und c) 5 Jahren nach der Emission. Die Fehlerbalken repräsentieren eine Standardabweichung um den Nettowert. Man beachte die unterschiedlichen Skalen zwischen a) und b) einerseits und c) andererseits. P/G: Personen-/Güterverkehr. Datenquelle: Borken-Kleefeld et al., 2010.

dessen Lebensdauer so lang ist (vgl. Abb. 1a). Wenn also die Klimawirkungen des Verkehrs reduziert werden sollen, dann müssen primär die Emissionen von CO<sub>2</sub> gemindert werden. Je früher das erfolgt, desto geringer die langfristige Erwärmung. Für die einzelnen Verkehrsträger stellt sich das unterschiedlich dar:

Neue Kraftfahrzeuge werden in den Industriestaaten ohnehin nur noch zugelassen, wenn sie bestimmte Emissionsstandards einhalten, die primär zum Schutz von Umwelt und Gesundheit erlassen wurden. Zum Klimaschutz ist es wünschenswert, insbesondere die Emissionen von Ruß und Ozonvorläuferstoffen zu reduzieren. Und weil es die globale Erwärmung verringern hilft, ist es auch in unserem Interesse, dass solche Emissionsstandards weltweit eingeführt bzw. verschärft werden. Für Europa ist konkret eine wirksamere Reduktion der NO<sub>x</sub>- und Partikel-Emissionen von Diesel-Fahrzeugen wünschenswert. Darüber hinaus ist es zum Klimaschutz nötig, den Verbrauch der Fahrzeuge und den Anteil an fossilem CO<sub>2</sub> in den Kraftstoffen zu verringern.

Beim Schiffsverkehr könnte man verführt sein, im kühlenden Effekt der schiffsinduzierten Wolken einen Ausweg zu sehen, quasi ein unfreiwilliges, aber willkommenes Geoengeineering. Diese Wolken sind vor allem eine Folge der Schwefelemissionen der Schifffahrt. Der Schwefel hat jedoch eine Verschlechterung der Luftqualität (Asthma, saurer Regen etc.) zur Folge. Auch hier sollten aus Gründen des Klimaschutzes Verbrauchsminderungen, u. a. durch operative Maßnahmen (z. B. auf Reedezeiten abgestimmte Fahrtenplanung und verringerte Schiffsgeschwindigkeiten) oder technische (z. B. Einsatz von LNG), im Vordergrund stehen.

Der Flugverkehr bildet eine besondere Herausforderung sowohl hinsichtlich einer Verbrauchsreduktion als auch hinsichtlich seiner besonders starken Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte. Wünschenswert sind eine Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen, um die starke Ozonbildung zu reduzieren, sowie eine Unterdrückung der Wolkenbildung. Zum einen sollen technische und operative Maßnahmen (effizientere Flugzeuge und höhere Auslastung), der Einsatz alternativer Treibstoffe aus regenerativen Quellen und eine geänderte Flugführung zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Zum anderen werden zurzeit Verfahren zur klimaoptimierten Flugroutenplanung entwickelt (z. B. im Forschungsprojekt REACT4C). Weil die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte in der Regel kürzerlebig sind, spielen Ort, Höhe, Tages- und Jahreszeit der Emission und meteorologische Bedingungen bei der Emission eine große Rolle. Damit bietet sich ein Hebel, um die Wirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zu reduzieren. Angesichts des hohen prognostizierten Wachstums des Flugverkehrs sind hier besondere Anstrengungen nötig, seinen Klimaeffekt zu begrenzen oder, wenn möglich, zu reduzieren.

**Danksagung**

Dieser Beitrag beruht auf Ergebnissen des Integrierten Forschungsprojektes QUANTIFY, das von der Europäischen Kommission von 2005 bis 2010 gefördert wurde. Wir danken Markus Amann und Fabian Wagner vom IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis (Laxenburg) sowie Jan Fuglestedt und Terje Berntsen von CICERO – Center for International Climate and Environmental Research (Oslo) für hilfreiche Diskussionen. Dieser Beitrag stellt keine Meinungsäußerung von IIASA oder seinen Mitgliedsorganisationen dar. ■

**LITERATUR**

BERNTSEN, T. AND J. FUGLESTVEDT (2008). „Global temperature responses to current emissions from the transport sectors.“ Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 105: 19154-19159.

BORKEN-KLEEFELD, J., T. BERNTSEN, et al. (2010). "Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport." Environmental Science & Technology 44(15): 5700-5706.

EUROPEAN ASSESSMENT OF TRANSPORT IMPACTS ON CLIMATE CHANGE AND OZONE DEPLETION, s. <http://ssa-attica.eu>

FUGLESTVEDT, J.S., K.P. SHINE, T. BERNTSEN, J. COOK, D.S. LEE, A. STENKE, R.B. SKEIE, G.J.M. VELDEERS, I.A. WAITZ (2010). „Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics.“ Atmospheric Environment 44 (37) 4648-4677.

HOUGHTON, J.T., L.G. MEIRA FILHO, B.A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG AND K. MASKELL (EDS.) (1995): "Climate Change 1995 – The Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IEA (2009). World Energy Outlook 2009. Paris/France, International Energy Agency (IEA).

SKEIE, R. B., J. FUGLESTVEDT, ET AL. (2009). „Global temperature change from the transport sectors: His-torical development and future scenarios.“ Atmos. Env. 43(39): 6260-6270.

UHEREK, E., T. HALENKA, ET AL. (2010). „Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Land Transport.“ „Atmospheric Environment 44(37): 4772-4816.

QUANTIFYING THE CLIMATE IMPACT OF GLOBAL AND EUROPEAN TRANSPORT SYSTEMS, s. <http://ip-quantify.eu>

REACT - Reducing Emissions from Aviation by Changing Trajectories for the benefit of Climate, <http://www.react4c.eu>



**Jens Borken-Kleefeld, Dr.**  
Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA), Laxenburg  
Borken@iiasa.ac.at



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