



Sachstand

Schadstoffemissionen des Luftverkehrs

Vergleich verschiedener Verkehrsmittel und gesundheitliche Relevanz von Schadstoffen

Schadstoffemissionen des Luftverkehrs

Vergleich verschiedener Verkehrsmittel und gesundheitliche Relevanz von Schadstoffen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 015/22
Abschluss der Arbeit: 6. April 2022
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung
und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Vergleich der Pro-Kopf-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel	4
3.	Anteil des Flugverkehrs an verkehrsbedingten Schadstoffemissionen	11
4.	Gesundheitliche Bedeutung von Schadstoffemissionen	12
5.	Literatur- und Quellenverzeichnis	13

1. Einleitung

Emissionen von Luftschadstoffen infolge menschlicher Tätigkeiten werden üblicherweise verschiedenen Sektoren zugeordnet. Neben dem Sektor Verkehr, setzen auch die Haushalte, die Industrie, die Landwirtschaft und Energieerzeuger (nicht jedoch Windkraft- und PV-Anlagen) unmittelbar Schadstoffe frei. Je nach betrachtetem Schadstoff stellen sich deren Beiträge unterschiedlich dar. Etwa ist der Verkehr für mehr Stickoxidemissionen verantwortlich als die Industrie. Die Beiträge verschiedener Emittenten können allerdings zeitlich und räumlich stark variieren. Beispielhaft sei ein Vergleich der Belastung des ländlichen Raums mit dem städtischen und vorstädtischen Raum mit Feinstaub kleiner 2,5 Mikrometern genannt. Eine Messreihe von November bis Juni ergab, dass die Belastungsspitzen im ländlichen Raum im Januar deutlich höher ausfielen als an den Vergleichsorten in dichter besiedelten Gebieten. Dies konnten die Autoren auf offene Holzfeuerungsanlagen (Kamine) zurückführen (Thieringer et al. 2022).

Betrachtet man die Emissionen aus dem Verkehrssektor eingehend, dann kann zunächst festgestellt werden: Die ökologischen Auswirkungen der Nutzung verschiedener Verkehrsmittel hängen von verschiedenen Rahmenbedingungen ab, nicht zuletzt vom Lebenszyklus und dessen Bilanzrahmen, der zu Grunde gelegt wird. So kann die Herstellung und Entsorgung der Verkehrsmittel einbezogen werden, auch die Produktion und Bereitstellung von Kraftstoff. Während beispielsweise ein Pkw einsatzbereit auf dem Parkplatz oder in der Garage steht, gehen der Nutzung eines Flugzeugs die Wartung und Abfertigung voraus, ehe es starten kann. Auch benötigen unterschiedliche Verkehrsmittel verschiedene Infrastruktur von Schienen samt Stromversorgung bis hin zu Flughäfen.

Während der Nutzung des Verkehrsmittels können schließlich unterschiedliche Umweltwirkungen klassifiziert werden. Dazu zählen die Emissionen bestimmter Schadstoffe wie Stickoxide, Schwefeloxide, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Feinstaub PM 2,5 und PM10 wie auch Ultrafeinstaub, Ozon und flüchtige organische Verbindungen wie VOC, auch Blei, Benzol und andere Schadstoffe ließen sich nennen. Für die Umwelt und Gesundheit relevant sind darüber hinaus Lärmemissionen.

Zu welchem Ergebnis eine Umweltbilanz gelangt, hängt weiterhin ganz entscheidend von der Auslastung des Verkehrsmittels und der zurückzulegenden Wegstrecke ab. Etwa liegt der Kraftstoffverbrauch bei Pkw im Stadtverkehr, besonders im Stop-and-go-Verkehr, deutlich höher als bei Überlandfahrten.

In Modellrechnungen werden meist Annahmen über die genannten Einflussgrößen getroffen. Umweltbilanzen geben vor diesem Hintergrund eine Orientierung, welche Umweltwirkungen eines Verkehrsmittels abhängig vom Bilanzrahmen des Lebenszyklus und der Nutzung dominieren. Die Zahlen selbst variieren im Ergebnis abhängig von den genannten Bedingungen und von der verwendeten Datengrundlage.

2. Vergleich der Pro-Kopf-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel

Verkehrsmittel setzen unterschiedliche Mengen an Schadstoffen frei, deren Zusammensetzung unter anderem von der Antriebsart und vom Kraftstofftyp bzw. Strommix, nicht zuletzt auch vom

Fahrzeugtyp, der Beladung wie auch der Auslastung abhängt. Auch die Wetterlage verändert den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch zu Luft und zu Land. Vergleichbar werden die Schadstoffbilanzen, indem Durchschnittswerte angenommen werden und die Emissionen pro Kopf aufgeteilt werden. Da sich die Schadstoffemissionen mit der Wegstrecke - auch deren Steigungen usw. ändern - wird entweder eine definierte Wegstrecke angenommen oder zwischen Fern- und Nahverkehr klassifiziert. Etwa wird für einen Langstreckenflug genauso wie für einen Kurzstreckenflug ein Start durchgeführt. Da dieser sehr kraftstoffintensiv ist, sollte sich die Schadstoffbilanz vom Kurzstreckenflug hin zum Langstreckenflug verbessern. Im öffentlichen Verkehr entscheidet der Strommix im Betrieb über die Schadstoffzusammensetzung je Kilometer.

Zahlen zur Höhe der Schadstoffemissionen spiegeln aufgrund der zahlreichen erforderlichen Annahmen und Mittelungen nicht den Einzelfall in der Realität wieder. Sie geben aber eine Orientierung für die Schadstofflast verschiedener Verkehrsmittel im Vergleich zueinander.

Mit der Verbrennung von einem Kilogramm Kerosin werden durchschnittlich und abhängig von der genauen Zusammensetzung des Kraftstoffs 3,15 Kilogramm Kohlendioxid, 1,24 Kilogramm Wasserdampf, 6 bis 20 Gramm Stickoxide, 0,7 bis 2,5 Gramm Kohlenmonoxid, 0,1 bis 0,7 Gramm unverbrannte Kohlenwasserstoffe, 0,02 Gramm Russ und eine niedriger liegende Konzentration an Schwefeloxiden freigesetzt (Radig 2008, Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL 2015). Die umweltrelevanteste Emission des Luftverkehrs stellen mit Blick auf die Kraftstoffverbrennung und die daraus generierten Schadstoffe die Stickoxide dar.

Das Umweltbundesamt veröffentlicht Daten zu den Schadstoffemissionen verschiedener Verkehrsmittel im Vergleich und zieht für das Jahr 2020 folgende Bilanz (Umweltbundesamt 2020):

Das Flugzeug (Inlandsflug) und der Pkw emittieren im Vergleich zu den öffentlichen Verkehrsmitteln Bus, Bahn, Straßen- Stadt- und U-Bahn mehr Schadstoffe je Personenkilometer. Die Kohlenmonoxidemissionen von Pkw werden etwas mehr als doppelt so hoch angegeben wie jene von Flugzeugen (Inlandsflug). Bei den Stickoxidemissionen schneidet der Luftverkehr bezogen auf den Personenkilometer jedoch schlechter ab: Der Ausstoß liegt mehr als drei Mal so hoch wie bei Pkw. Ähnlich stellt sich die Situation bei den Feinstaubemissionen dar, die knapp drei Mal höher liegen als bei Pkw. Vereinfachend lässt sich daraus ableiten, dass im Inland das Flugzeug mit den höchsten Emissionen pro Kopf und Kilometer verbunden ist, gefolgt vom Pkw. Auch mit Blick auf die Treibhausgasemissionen ergibt sich diese Reihenfolge: Ein Inlandsflug ist bei den derzeit genutzten Treibstoffen klimaschädlicher als die Nutzung des Pkw auf derselben Strecke. Der öffentliche Personenverkehr ist deutlich schadstoffärmer als Flugzeug und Pkw. Im Fernverkehr schneiden Bahn und Bus nahezu gleichauf ab. Im Nahverkehr sind Bahnen, auch Straßen- und U-Bahnen mit weniger Schadstoffemissionen je Personenkilometer verbunden als Busse. Nachteilig wirkt sich der Stop-and-go-Verkehr in Ballungsräumen aus.

Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland

Quelle: Umweltbundesamt, TREMOD 6.21 (11/2021)

Bezugsjahr	Verkehrsmittel	g / Pkm	Treibhausgase ¹	Kohlenmonoxid	Flüchtige Kohlenwasserstoffe ⁴	Stickoxide	Partikel ⁵	Auslastung
			2019	Pkw	154	1,00	0,15	0,42
	Flugzeug, Inland	214 ²	0,29	0,10	0,98	0,011	70 %	
	Eisenbahn, Fernverkehr	29 ³	0,02	0,00	0,04	0,001	56 %	
	Linienbus, Fernverkehr	29	0,01	0,01	0,05	0,001	54 %	
	sonstige Reisebusse ⁶	36	0,05	0,01	0,13	0,003	55 %	
	Eisenbahn, Nahverkehr	54	0,04	0,01	0,17	0,004	28 %	
	Linienbus, Nahverkehr	83	0,06	0,03	0,30	0,005	18 %	
	Straßen-, Stadt- und U-Bahn	55	0,03	0,00	0,05	0,002	19 %	
2020	Pkw	152	0,94	0,15	0,38	0,006	1,4 Pers./Pkw	
	Flugzeug, Inland	284 ²	0,43	0,14	1,24	0,015	53 %	
	Eisenbahn, Fernverkehr	50 ³	0,03	0,00	0,06	0,002	31 %	
	Linienbus, Fernverkehr	27	0,01	0,01	0,04	0,001	57 %	
	sonstige Reisebusse ⁶	36	0,04	0,01	0,13	0,003	56 %	
	Eisenbahn, Nahverkehr	85	0,06	0,02	0,29	0,006	17 %	
	Linienbus, Nahverkehr	111	0,07	0,04	0,36	0,006	13 %	
	Straßen-, Stadt- und U-Bahn	75	0,04	0,00	0,07	0,003	13 %	

g/Pkm = Gramm pro Personenkilometer, inkl. der Emissionen aus der Bereitstellung und Umwandlung der Energieträger in Strom, Benzin, Diesel, Flüssig- und Erdgas sowie Kerosin

¹ CO₂, CH₄ und N₂O angegeben in CO₂-Äquivalenten

² inkl. Nicht-CO₂-Effekte

³ Die in der Tabelle ausgewiesenen Emissionsfaktoren für die Bahn basieren auf Angaben zum durchschnittlichen Strom-Mix in Deutschland. Emissionsfaktoren, die auf unternehmens- oder sektorbezogenen

Strombezügen basieren (siehe z. B. den „Umweltmobilcheck“ der Deutschen Bahn AG), weichen daher von den in der Tabelle dargestellten Werten ab.

⁴ ohne Methan

⁵ ohne Abrieb von Reifen, Straßenbelag, Bremsen, Oberleitungen

⁶ Gruppen- und Tagesfahrten, Rundreisen etc.

[Für Informationen zu den Emissionen aus Infrastruktur- und Fahrzeugbereitstellung siehe UBA-Broschüre "Umweltfreundlich mobil!"](#)

Tabelle 1: Vergleich der gemittelten Schadstoffemissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland (Umweltbundesamt 2020)

Bei Langstreckenflügen sinkt der Anteil an Feinstaub- und NOx-Emissionen anteilig, bleibt jedoch hoch, wie eine weitere Analyse des Umweltbundesamtes darlegt.

2020 veröffentlichte das Umweltbundesamt als Auftraggeber eine umfassende ökologische Bewertung verschiedener Verkehrsarten für den inländischen Güter- und Personenverkehr im Vergleich. Darin wurden neben Schadstoffemissionen, die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energie- und Rohstoffaufwand sowie der Flächenverbrauch berücksichtigt. Auch die Herstellung, Wartung und Entsorgung von Fortbewegungsmitteln wurde einbezogen und damit der Lebenszyklus nicht nur auf die Nutzungsperiode beschränkt (Allekotte et al. 2020). Aus dieser vergleichenden Betrachtung ergibt sich, dass Pkw im Personennahverkehr je Personenkilometer die höchsten Stickoxidemissionen aufweisen, was im Übrigen in der Wissenschaft als unstrittig angesehen wird. An zweiter Stelle folgen Busse im Nahverkehr und schließlich Krafträder und der Schienenverkehr.

Abbildung 12: NO_x-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017

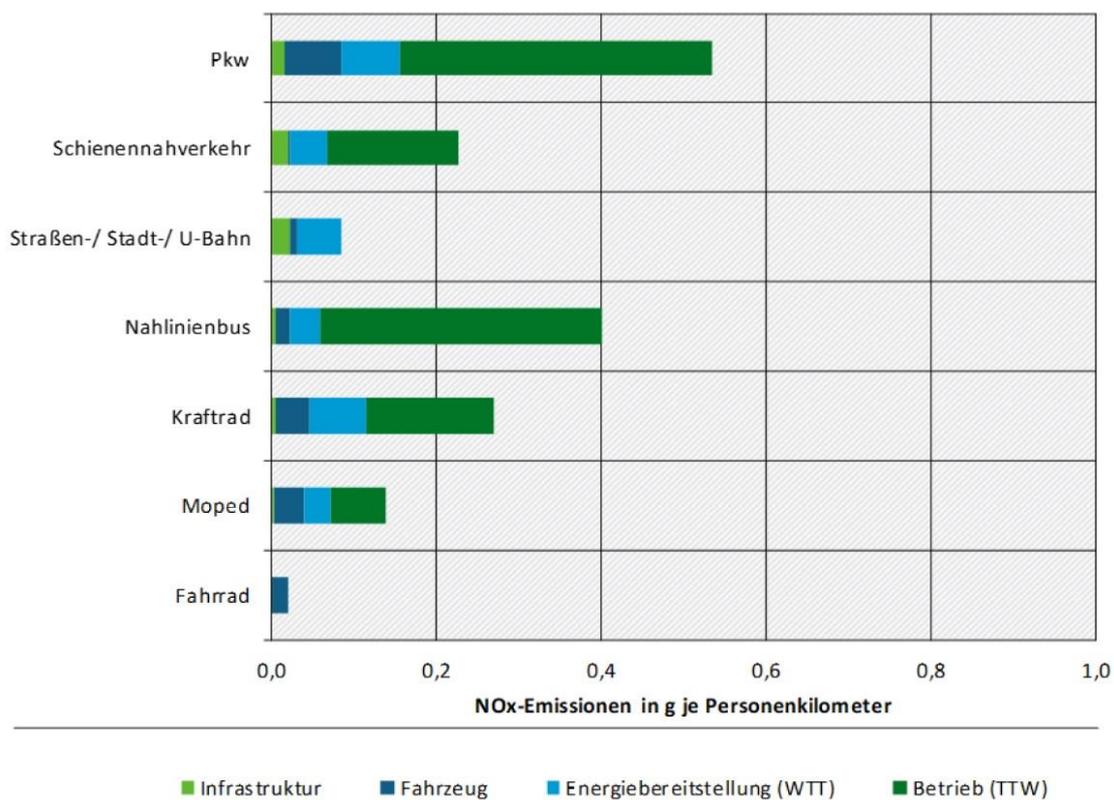


Abbildung 1: Stickoxidemissionen im Personennahverkehr in Deutschland für das Jahr 2017 (Allekotte 2020: 124)

Im Personenfernverkehr stellt sich der Vergleich zwischen Flugzeug, Bahn, Pkw und Bus bezogen Personenkilometer wie folgt dar:

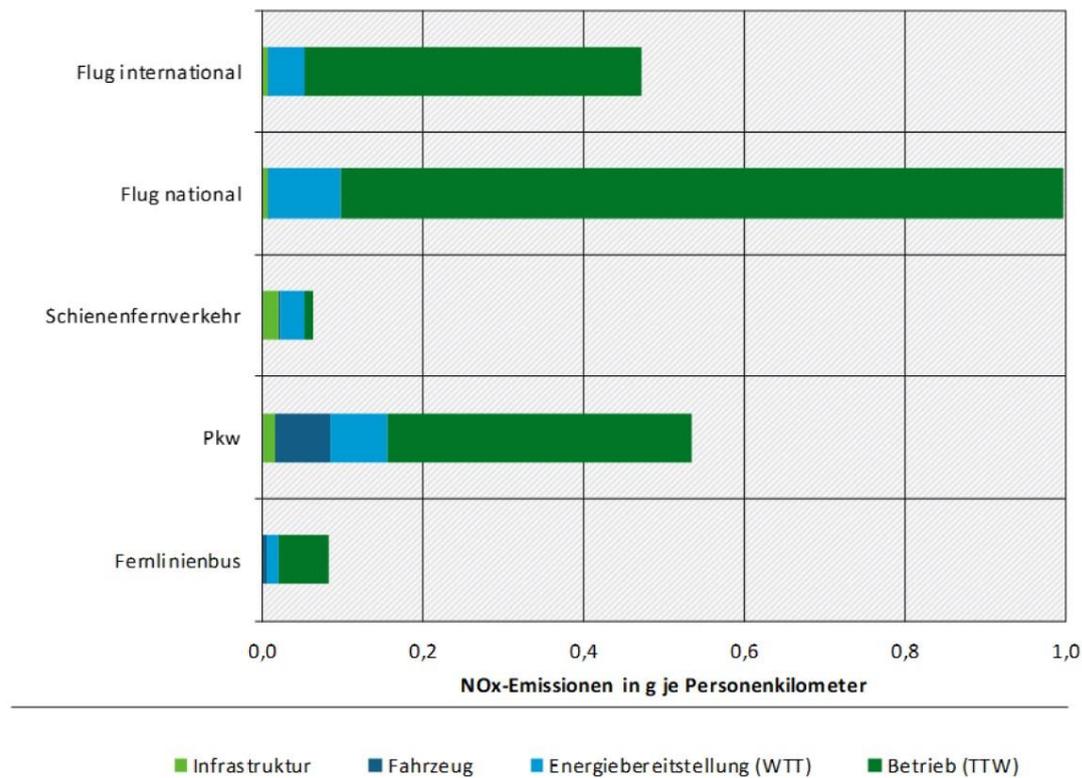
Abbildung 13: NO_x-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017

Abbildung 2: Stickoxidemissionen im Personenfernverkehr in Deutschland für das Jahr 2017 (Allekotte 2020: 125)

Demnach sind Fernreisen im Inland mit dem Zug mit den geringsten Stickoxidemissionen verbunden. Danach folgt der Fernbus. Die deutlich schlechtere ökologische Wahl in Bezug auf die Schadstoffklasse der Stickoxide ist der Pkw und weit abgeschlagen der Inlandsflug. Bei internationalen Fernreisen verbessert sich die Stickoxidbilanz des Fluges und kann dann – je nach Strecke – auch vor dem Pkw liegen.

Bei den Feinstaubemissionen kleiner zehn Mikrometer, PM₁₀ genannt, stellen sich die Beiträge verschiedener Verkehrsmittel im Personennahverkehr über den Lebensweg in anderer Reihung dar:

Abbildung 14: PM₁₀-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017

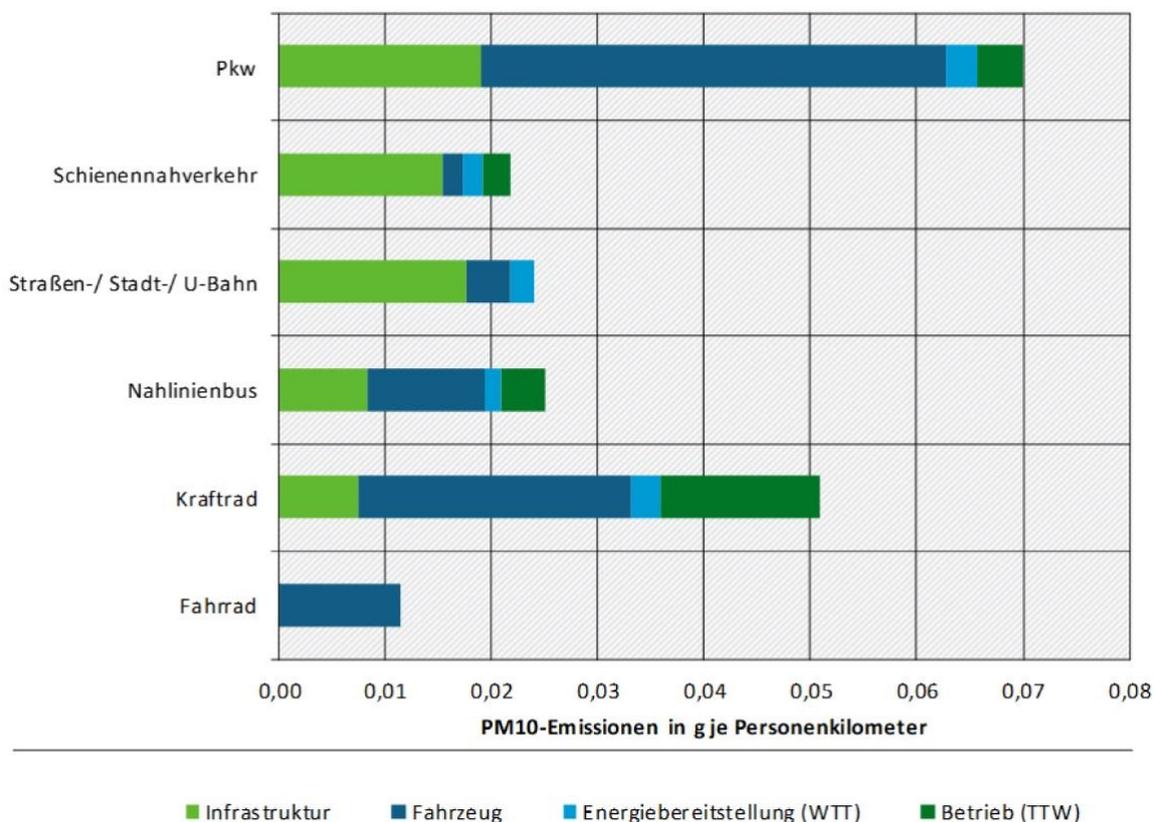


Abbildung 3: PM₁₀-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland für das Jahr 2017 (Allekotte 2020: 126)

Im Betrieb sind hier Krafträder aufgrund fehlender Partikelfilter die größten Emittenten je Personenkilometer. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet schneiden Pkw jedoch schlechter ab. Unter den öffentlichen Verkehrsmitteln ist die Bahn das Verkehrsmittel mit den niedrigsten PM₁₀-Emissionen je Personenkilometer. Die ökologischste Wahl unter den betrachteten Fortbewegungsmitteln ist wie auch bei den Stickoxidemissionen das Fahrrad.

Im Fernverkehr ergibt sich abweichend zu den Stickoxidemissionen eine andere Reihenfolge der Verkehrsmittel. Die höchsten PM₁₀-Emissionen je Personenkilometer verursachen hier die Pkw, nicht das Flugzeug. Die Bahn hat zwar im Betrieb geringere PM₁₀-Emissionen je Personenkilometer als das Flugzeug, doch zeigt die Analyse, dass die Bereitstellung der Infrastruktur insgesamt die PM₁₀-Emissionen gegenüber dem Inlands- und internationalen Flug verschlechtert. Die ökologischste Wahl hinsichtlich der PM₁₀-Emissionen je Personenkilometer ist dieser Analyse zufolge der Fernbus.

Abbildung 15: PM₁₀-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017

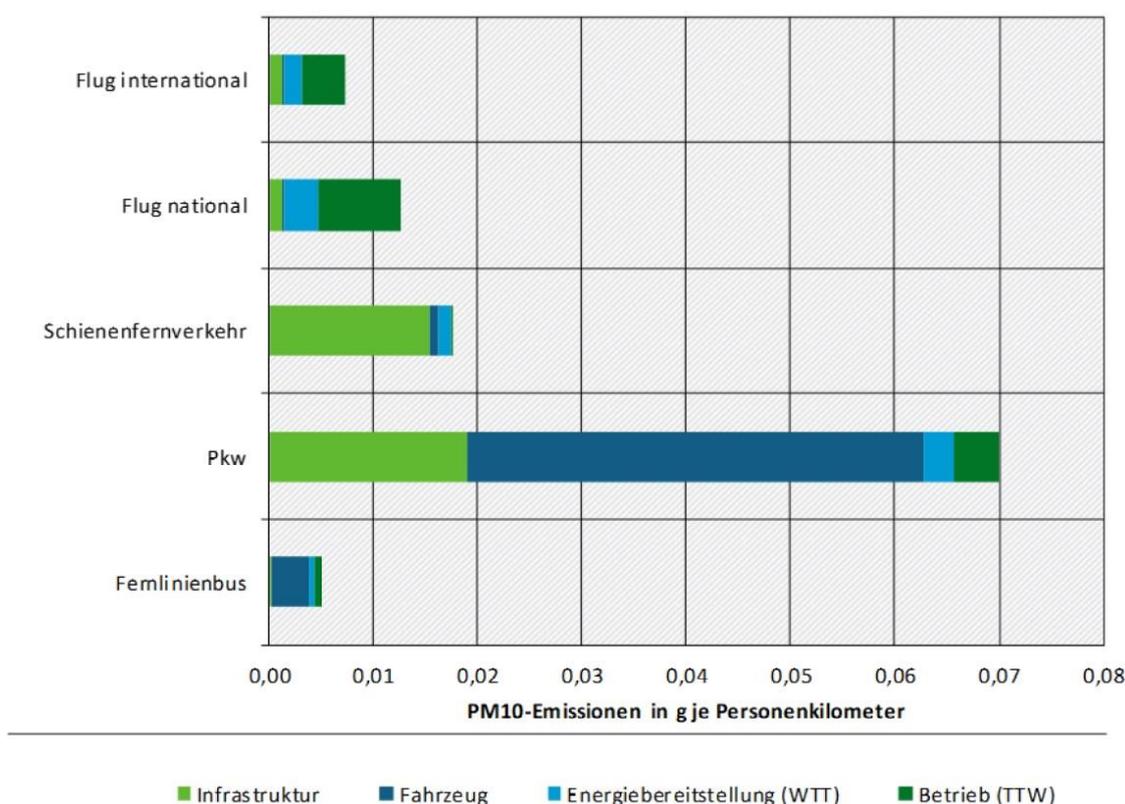


Abbildung 4: PM₁₀-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland für das Jahr 2017 (Allekotte 2020: 127)

Obwohl einige Jahre zurückliegend gibt überdies die Analyse von Schmid et al. von 2001 einen guten Einblick in die Komplexität des ökologischen Vergleichs verschiedener Verkehrsmittel bei definierter Wegstrecke. Im Detail betrachteten die Forschenden die Schadstoffe Partikel¹, Stickoxide, Kohlendioxid, Methan, Benzol, flüchtige organische Verbindungen und Kohlenmonoxid. Aus den Berechnungen wird etwa deutlich, wie entscheidend die Auslastung öffentlicher Verkehrsmittel ist. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass im Ballungsraum Stuttgart uneingeschränkt die elektrisch betriebene Stadtbahn ökologisch vorteilhaft ist. Im Regionalverkehr erwiesen sich ebenfalls die S- und Regionalbahnen als umweltverträglichstes Verkehrsmittel. Fahrten in ländliche Regionen hatten mit dem Bus die geringsten Schadstofflasten, wobei der Pkw im abendlichen Freizeitverkehr besser abschneiden konnte, wenn Busse zu gering ausgelastet waren.

1 Feinstaub, nicht näher definiert

Im Fernverkehr war der ICE in allen Fällen deutlich schadstoffärmer als der mit einer Person besetzte Pkw. Erst bei schwach ausgelastetem ICE konnte ein Pkw mit vier Personen ähnliche Werte erreichen (Schmid et al. 2001: 172-174).

3. Anteil des Flugverkehrs an verkehrsbedingten Schadstoffemissionen

Die Zuweisung von Schadstoffanteilen zu einem bestimmten Verkehrsmittel erfolgt auf Grundlage von Modellrechnungen und Simulationen. Beim Messen der Schadstoffe in der Luft kann nicht auf den Emittenten eines Schadstoffmoleküls zurückgeschlossen werden. Damit ist letztlich nicht quantitativ nachmessbar, welches Verkehrsmittel welche Emissionsbeiträge verursacht hat. Es handelt sich vielmehr um wissenschaftliche Abschätzungen.

Der Straßenverkehr hat aufgrund des insgesamt hohen Aufkommens einen erheblichen Anteil an den verschiedenen Schadstoffemissionen. Exemplarisch sei hier NO_x herausgegriffen. Es ist zudem auch eine besonders relevante Schadstoffklasse aus Flugzeugen; andere Schadstoffe je Personenkilometer gelten bei diesem Verkehrsmittel eher als nachrangig (siehe Kapitel 2). In älteren Literaturquellen wird der Anteil des Flugverkehrs an den Gesamt-NO_x-Emissionen mit zwei Prozent angegeben (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2009). Der Flughafenverband ADV gibt an, dass der Anteil des Luftverkehrs an den NO_x-Emissionen zwei bis drei Prozent betrage.

Dass der Beitrag des Luftverkehrs an den gesamten Schadstoffemissionen des Verkehrs relativ gesehen klein ist, deuten auch Daten aus anderen Ländern, etwa den USA, an. Trotz der starken Zunahme des Flugverkehrs in den letzten Jahren liegt der Beitrag zu den Schwefeldioxid-, Feinstaub-, NO_x-Emissionen sowie dem Ausstoß an flüchtigen organischen Verbindungen um ein Mehrfaches unter denen des Straßenverkehrs. Insgesamt sind die Emissionen des Luftverkehrs der Federal Aviation Agency zufolge sogar noch niedriger als jene des Bahn- und Schiffsverkehrs. Der Bahnverkehr sei der zweitgrößte Schadstoffemittent im Verkehrssektor in den USA. Der Schiffsverkehr folgt auf Platz 3. Das günstige Abschneiden des Luftverkehrs wird auch damit begründet, dass die meisten Schadstoffe in großer Höhe ausgestoßen werden und somit die Konzentration der Schadstoffe in Bodennähe nicht erhöhen (Federal Aviation Administration 2015: 5-6).

Nichtsdestotrotz soll dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass die ökologische Bilanz je Personenkilometer verglichen mit dem öffentlichen Verkehr und auch dem Pkw ungünstig ausfällt (siehe Kapitel 2).

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den Treibhausgasemissionen. Zwar hat das Flugzeug den höchsten Ausstoß an Treibhausgasemissionen pro Kopf und Kilometer. Dennoch ist der Anteil am gesamten Verkehr geringer als der des Straßenverkehrs, da dieser ein erheblich größeres Aufkommen hat. Im Jahr 2016 war der Luftverkehr nach Angaben der European Union Aviation Safety Agency für 3,6 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen der EU-28 und für 13,4 Prozent der Emissionen des Verkehrs verantwortlich (EASA 2019).

In jüngster Zeit wurde der Flugverkehr als wichtige Quelle von Ultrafeinstaub identifiziert. Dabei handelt es sich um flüssige, feste oder gasförmige Partikel kleiner 0,1 Mikrometer (100 Nanometer), die in der Luft schweben. Da Teilchen dieser Größenordnung leichter als größere Partikel Zellmembranen wie auch die Blut-Hirnschranke passieren können, gelten sie aus toxikologischer Sicht als besonders relevant.

In einem 2020 abgeschlossenen Forschungsprojekt, das seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit finanziert und vom Umweltbundesamt betreut wurde, wurde der Einfluss des Flughafens Frankfurt/Main auf die Ultrafeinstaubbelastung an Ruß, Stickoxiden, PM10 und PM2,5 untersucht. Hierzu wurden Modellrechnungen vorgenommen. Demnach nimmt die Zahl an Ultrafeinstaubpartikeln, die vom Betrieb des Flughafens stammen, mit zunehmender Entfernung und abhängig von der Hauptwindrichtung ab. Die Modellierung ergab beispielsweise, dass der durch den Flughafen im Jahresmittel verursachte Anteil nördlich des Flughafens in ca. ein Kilometer Entfernung bei ca. 25 Prozent der Gesamtbelastung und in 2,5 Kilometern Abstand bei unter 10 Prozent lag (Lorentz et al. 2021: 24).

Dieses Forschungsvorhaben sei nur exemplarisch genannt, da es verdeutlicht, dass auch bei den Ultrafeinstaubemissionen der Flugverkehr zwar eine wichtige Quelle ist, aber bezogen auf die Luftqualität in Deutschland insgesamt eher eine untergeordnete Rolle spielt. Da an Verkehrsstellen erheblich höhere Anzahlkonzentrationen an Ultrafeinstaub gemessen werden als im Gebirge, wird davon ausgegangen, dass auch bei diesem Schadstoff der Straßenverkehr einen deutlichen Beitrag liefert. Modellierungen, die den verschiedenen Verkehrsträgern oder Emittenten, Anteile zuschreiben, sind gleichwohl nicht bekannt. Es liegen deutlich weniger Messdaten vor verglichen mit der Erfassung von Feinstaub und anderen Schadstoffen.

Insgesamt gilt nach wie vor, dass der Anteil des Flugverkehrs an verkehrsbedingten Luftschadstoffemissionen in Summe geringer ist als der des Pkw-Verkehrs. Dieser Anteil steigt jedoch mit zunehmendem Flugverkehrsaufkommen (vgl. Radig 2008).

4. Gesundheitliche Bedeutung von Schadstoffemissionen

Wissenschaftlich gut belegt sind Kurzzeiteffekte von Stickstoffdioxid auf Atemwegserkrankungen. Hierzu gibt es sowohl experimentelle als Beobachtungsstudien. Diese zeigen konsistent, dass die kurzzeitige Belastung mit NO₂ über die eingeatmete Luft dazu führt, dass sich ein bestehendes Asthma verschlechtert und insbesondere bei Kindern mit Asthma Atemwegsbeschwerden zunehmen. Stickstoffdioxid ist ein Reizgas, womit sich auch ein weiterer Effekt erklärt: Die Atemwege werden auch bei kurzzeitiger Belastung nachweislich empfindlicher, allergische Reaktionen nehmen zu und die Lungenfunktion verschlechtert sich. Diese Effekte treten bereits bei Konzentrationen auf, wie sie als Spitzenkonzentrationen in der Außenluft gemessen werden (vgl. Wichmann et al. 2018).

In Bezug auf die Frage der Langzeitwirkungen von Stickoxiden werden in der Regel epidemiologische Studien herangezogen. Hier ergibt sich jedoch das unausweichliche Problem, dass Stickoxide vergesellschaftet mit anderen Schadstoffen auftreten, da diese gemeinsame Quellen wie den Straßenverkehr und Hausfeuerungsanlagen haben. Insbesondere Feinstaub wird also gemeinsam mit Stickoxiden emittiert.

Es gibt Hinweise, dass eine steigende Stickstoffdioxidbelastung der Außenluft langfristig mit einer höheren Sterblichkeit einhergeht. Das Umweltbundesamt berechnete gemäß einer von der Weltgesundheitsorganisation anerkannten Methode in seiner Studie „Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid – Exposition in Deutschland“ für das Jahr 2014 rund 6.000 vorzeitige Todesfälle aufgrund von Herz-Kreislaufkrankungen, die auf die Langzeitbelastung mit Stickstoffdioxid zurückgeführt werden können (Umweltbundesamt 2018). Einige Forschende geben aber zu bedenken, dass auch Feinstäube die Sterblichkeit nachweislich erhöhen und der Effekt auf diese oder auf den Mix an Schadstoffen zurückzuführen sein könnte (vgl. Wichmann et al 2018). Grundsätzlich stellen vorzeitige Todesfälle eine fiktive Kenngröße der Epidemiologie dar, die es ermöglicht, verschiedene Risikofaktoren und deren Wirkungen auf das Überleben miteinander zu vergleichen.

Noch umfangreichere Daten liegen zur toxikologischen Wirkung von Feinstaub vor. Diese sind tendenziell umso relevanter, je kleiner sie sind, da Partikel dann leichter biologische Barrieren wie die Zellmembran oder die Blut-Hirnschranke überwinden können. Gut belegt ist, dass die Belastung mit Feinstäuben das Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen erhöht und diese, falls sie schon bestehen, verschlimmert. Konkret zu nennen sind die koronare Herzkrankheit, der Herzinfarkt, die Herzschwäche, der Schlaganfall, der Bluthochdruck und auch Diabetes. Die Belastung mit Feinstäuben erhöht langfristig auch das Risiko einer Lungenkrebserkrankung und begünstigt ein niedrigeres Geburtsgewicht bei Neugeborenen. Bezüglich der Wirkung von Feinstäuben steht anders als bei Stickoxiden außer Frage, dass sie die Sterblichkeit erhöhen. Effekte auf die Gesundheit werden bereits unterhalb der derzeit in der EU geltenden Grenzwerte beschrieben (Ritz et al. 2019: 881-886). Die Zusammenhänge lassen sich mechanistisch erklären: Feinstaubpartikel können in das Blut wie auch, wenn sie entsprechend klein sind, ins Gehirn gelangen. Sie werden teils in die Blutgefäße aufgenommen und stimulieren die Produktion reaktiver Sauerstoffspezies, die Gewebeschädigungen und entzündliche Prozesse nach sich ziehen (Münzel et al. 2021: 120-128).

Die jüngsten Hochrechnungen ergaben, dass die Luftverschmutzung in Summe in Europa für knapp 800.000 vorzeitige Todesfälle verantwortlich ist. In Relation zur Kenngröße der vorzeitigen Todesfälle bei Stickoxiden lässt sich ableiten, dass Feinstaub in Bezug auf die Lebenszeitverkürzung der bedeutsamere Risikofaktor ist. Sie verkürzt die Lebenserwartung um durchschnittlich drei Jahre (Rauchen 2,2 Jahre) und ist als wichtige Belastung der öffentlichen Gesundheit anzusehen (Münzel et al. 2021: 120-128).

5. Literatur- und Quellenverzeichnis

Allekotte, Michel et al. 2020: Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. In: Umweltbundesamt Texte 156/2020, August 2020, online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-bewertung-von-verkehrsarten> (Stand: 16.03.2022).

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2009: Verursacher von Stickoxidemissionen in Bayern, Daten Landesamt für Umwelt 2009, online abrufbar unter: https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/stickstoffoxide/emissionen.htm?include_matomo=true (Stand: 23.03.2022).

Bundesamt für Zivilluftfahrt (2015). Was bei Triebwerken hinten herauskommt. Online abrufbar unter: file:///P:/unverschlusselt/Eigene%20Dateien/015_21Luftverkehrund-Feinstaub/was_beitriebwerkenhintenherauskommt.pdf (Stand: 23.03.2022).

European Union Aviation Safety Agency- EASA 2019: Europäischer Luftfahrt-Umweltbericht. Online abrufbar unter: https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EAER_EXECUTIVE_SUMMARY_DE.pdf (Stand: 16.02.2022).

Federal Aviation Administration (2015). Aviation Emissions, Impacts and Mitigation: A Primer. Online abrufbar unter: https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/primer_jan2015.pdf (Stand: 23.03.2022).

Lorentz, Helmut et al. 2021: Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluft-konzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potenzielle Belastung in der Nähe zu beschreiben – unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe (Ruß, Stickoxide und Feinstaub (PM_{1,5} und PM₁₀)). Umweltbundesamt Texte 14/2021, März 2021, online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-eines-grossflughafens-auf-zeitliche> (Stand: 16.03.2022).

Münzel, Thomas et al. 2021. Luftverschmutzung und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. In: Herz, 46, 120–128, online abrufbar unter: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7812988/pdf/59_2020_Article_5016.pdf (Stand: 22.03.2022).

Radig, Andres 2008. Luftschadstoffe durch Flugverkehr und Flughafenbetrieb. 14.05.2008, online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/radig.pdf> (Stand: 16.03.2022).

Ritz, Beate et al. (2019). Auswirkungen von Feinstaub, Ozon und Stickstoffdioxid auf die Gesundheit. In: Deutsches Ärzteblatt, 116, Heft 51–52, 23. Dezember 2019, online abrufbar unter: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/211419/Auswirkungen-von-Feinstaub-Ozon-und-Stickstoffdioxid-auf-die-Gesundheit> (Stand: 23.03.2022).

Schmid, Volker et al. (2001). Systematischer Vergleich konkreter Fahrten im Personenverkehr im Hinblick auf umwelt- und klimarelevante Wirkungen verschiedener Verkehrsmittel. Stuttgart, Februar 2001, online abrufbar unter: http://icara.de/pdf/end_re.pdf (Stand: 23.03.2022).

Thieringer, Julia et al. (2022). Impact of Residential Real-World Wood Stove Operation on Air Quality concerning PM_{2.5} Immission. In: Processes, 10, 545, online abrufbar unter: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/3/545> (Stand: 30.03.2022).

Umweltbundesamt (2018). Wie sehr beeinträchtigt Stickstoffdioxid (NO₂) die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland? Ergebnisse der Studie zur Krankheitslast von NO₂ in der Außenluft, 8. März 2018, online abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_factsheet_krankheitslasten_no2.pdf (Stand: 23.03.2022).

Umweltbundesamt 2020. Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> (Stand: 21.03.2022).

Wichmann, Erich (2018). Wird die gesundheitliche Bedeutung von NO₂ in der öffentlichen Diskussion richtig eingeschätzt? In: Umwelt – Hygiene – Arbeitsmedizin, 23, 2, S.53 – 55, online abrufbar unter: https://www.dgaum.de/fileadmin/pdf/Artikel/UHA_Editorial_2018_NO2_Wichmann_Drexler_Herr_Rabe.pdf (Stand: 22.03.2022).

* * *