



**FRIEDRICH NAUMANN
STIFTUNG** Für die Freiheit.

GANZHEITLICHE ÖKOLOGISCHE BILANZIERUNG VON VERKEHRS- SYSTEMEN

**Eine Studie erstellt im Auftrag der
Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit**

durch die KRBE GmbH unter Mitwirkung des Instituts für Mobilität
an der Universität St. Gallen

Impressum


Herausgeberin

Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit
Truman-Haus
Karl-Marx-Straße 2
14482 Potsdam-Babelsberg

/freiheit.org

/FriedrichNaumannStiftungFreiheit

/FNFreiheit

/stiftungfuerdiefreiheit

Autoren

Dr. Klaus Radermacher (KRBE GmbH)
Prof. Dr. Andreas Hermann (Universität St. Gallen, Schweiz)

Redaktion

Liberales Institut der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit

Kontakt

Telefon +49 30 220126-34
Telefax +49 30 690881-02
E-Mail service@freiheit.org

Stand

April 2021

Hinweis zur Nutzung dieser Publikation

Diese Publikation ist ein Informationsangebot der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit. Die Publikation ist kostenlos erhältlich und nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf nicht von Parteien oder von Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden (Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie Wahlen zum Europäischen Parlament).

Lizenz

Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ISBN

978-3-948950-14-9

Inhalt

EXECUTIVE SUMMARY.....	5
1. EINLEITUNG UND METHODIK.....	6
1.1 Methodik.....	7
1.2 Materialien und deren CO ₂ -Bilanz	8
2. CO₂-EMISSIONEN BEI PRODUKTION DER VERKEHRSMITTEL.....	9
3. CO₂-EMISSIONEN DER INFRASTRUKTUR.....	11
3.1 Wege-Infrastruktur.....	11
3.2 Knotenpunkt-Infrastruktur	13
3.3 Steuerungs-Infrastruktur.....	15
4. MECHANISCHE BEWEGUNGSEFFIZIENZ UND ENERGIEVERSORGUNG	16
4.1 Beschleunigung.....	17
4.2 Geschwindigkeit und Luftwiderstand	18
4.3 Hubarbeit.....	18
4.4 Kraftstoff und Elektrifizierung.....	19
4.5 CO ₂ -Belastung durch die Antriebsenergie	20
4.6 Luftlinie oder landgebundene Entfernung	21
5. TABELLARISCHE ÜBERSICHT	22
6. WEITERE ÖKOLOGISCHE ASPEKTE VON VERKEHRSSYSTEMEN	24
7. BEWERTUNG DES STATUS QUO, POTENZIALE UND POLITISCHE STEUERUNG.....	25
7.1 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Schiene.....	25
7.2 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Straße	25
7.3 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Luftfahrt	27
7.4 Politische Steuerung: Emissionshandel und andere Maßnahmen.....	27
8. FAZIT	28
9. ANHANG.....	30
9.1 Physikalische Berechnungen	30
9.1.1 Beschleunigungsenergie pro Passagier	30
9.1.2 Energie für Hubarbeit pro Passagier.....	31
9.1.3 Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro PKM.....	32
9.2 Energetische Berechnungen und CO ₂ -Ausstoß für Bahnfahrten.....	33
10. LITERATUR UND REFERENZEN	34

Executive Summary

Die klimarelevanten Auswirkungen verschiedener Verkehrsmittel wurden in der Vergangenheit primär im Zusammenhang mit den aus der Antriebsenergie entstehenden Belastungen, hier vor allem CO₂, untersucht. Die Tatsache, dass zur Erbringung einer Verkehrsleistung jedweder Art immer auch Infrastrukturen notwendig sind, wurde weitgehend ignoriert. Diese Studie betrachtet Verkehrssysteme und deren CO₂-Fußabdruck erstmals ganzheitlich, d.h. inkl. der jeweils notwendigen Wege-Infrastruktur (Straßen, Schienen), Knotenpunkt-Infrastruktur (Bahnhöfe, Flughäfen, Parkraum), Steuerungs-Infrastruktur (Stellwerke, Weichen, Signalanlagen, Flugsicherungssysteme, Ampeln, Verkehrszeichen), und es wird auch der Bau der Verkehrsmittel berücksichtigt. Zudem werden physikalische Zusammenhänge betrachtet, die aufgrund der den verschiedenen Verkehrssystemen inhärenten Bewegungsabläufe erheblichen Einfluss auf die Effizienz der Systeme haben.

Da die in dieser Studie angewandte ganzheitliche Betrachtungsweise neu und bisher nicht weit verbreitet ist, liegen längst nicht alle notwendigen Zahlen, Daten und Fakten vor, um einen umfassenden und vollständigen Vergleich der Kohlenstoffdioxidemissionen der Verkehrssysteme durchzuführen. Aber bereits die verfügbaren Daten lassen Rückschlüsse auf die wahren CO₂-Belastungen pro Personenkilometer (PKM) zu, die erheblich von derzeit weit verbreiteten Vorstellungen abweichen. Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Fokussierung auf die Antriebsenergie bei der Bewertung der Klimawirkung von Verkehrssystemen ist unzureichend und unzulässig; insbesondere die benötigte Wege-Infrastruktur verursacht bei Bau und Wartung zuweilen CO₂-Emissionen, die die aus dem Antrieb resultierenden Emissionen signifikant übersteigen. Auch Knotenpunkt-Infrastruktur kann ein erheblicher CO₂-Ermittent sein, der die Gesamtbilanz eines Systems negativ belastet.
- Zur vollständigen Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Verkehrssystems ist die ganzheitliche Betrachtung inkl. aller notwendigen Infrastrukturkomponenten zwingend erforderlich. Zudem spielt die von einem Verkehrssystem insgesamt erbrachte Verkehrsleistung in Personenkilometer (PKM) bzw. Tonnenkilometer (TKM) eine wesentliche Rolle bei der Bewertung.
- Das Verkehrssystem Schiene stellt sich aufgrund der immensen CO₂-Belastungen für Wege- und Knotenpunkt-Infrastruktur als deutlich weniger umweltfreundlich heraus als gemeinhin angenommen wird. Ursache hierfür sind die immensen Mengen an Stahl, Beton (Zement) sowie Kupfer, die für die Infrastruktur benötigt werden. Weiterhin spielt eine Rolle, dass das Verkehrssystem Schiene mit großem Abstand die ungünstigsten

Eigenschaften bzgl. der mechanischen Bewegungseffizienz aufweist und in diesem Zusammenhang auch nur ein geringes Optimierungspotenzial hat.

- Hauptursache für die hohen CO₂-Belastungen des Verkehrssektors insgesamt ist weniger der steigende Mobilitätsbedarf der Gesellschaft, sondern vielmehr die Ineffizienz der Nutzung der Verkehrssysteme, deren Inkompatibilität sowie das Ignorieren physikalischer Sachverhalte.
- Der größte Hebel zur Verringerung von CO₂ im Zusammenhang mit Mobilität liegt in der effizienteren Nutzung auf der Basis heute bereits existierender Infrastruktur. Für den „Mobilen Individualverkehr“ (MIV), der derzeit bei der Verwendung der Verkehrsmittel auf eine Nutzungsquote von lediglich 1,25 % kommt, liegt der Schlüssel für eine zukünftig intelligentere Nutzung in „Mobility as a Service“-Konzepten, für die die dafür benötigten Technologien bereits heute weitestgehend verfügbar sind.
- Die Subventionierung von Elektro-Mobilität in der jetzigen Form hat einen deutlich geringeren Effekt auf die CO₂-Emissionen als gemeinhin angenommen. Gleiches gilt weitgehend für den Ausbau/Neubau von Bahninfrastruktur. Eine sehr viel deutlichere Reduzierung von CO₂ ließe sich hingegen durch signifikante strukturelle Veränderungen von Mobilität und Transport erreichen.
- Politisch gewollte, finanzielle Anreize zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehrswesen können nur Wirkung entfalten, wenn sie einerseits alle relevanten CO₂-Emissionen einschließen und darüber hinaus international und global ausgerichtet sind. CO₂-Moleküle, die bei der Stahlherstellung in Indien oder China oder bei der Zementproduktion in Indonesien entstehen, haben genau die gleiche Klimawirkung wie CO₂-Moleküle, die bei der Verbrennung von Benzin und Kerosin oder bei der Erzeugung von Strom entstehen.
- Im Verkehrssektor lassen sich allein in Deutschland jährlich zig Mio. Tonnen CO₂ einsparen, ohne dass dies Einschränkungen der Mobilität zur Folge haben muss. Politische Entscheidungen zur Verkehrspolitik müssen dazu allerdings ideologiefrei, unvoreingenommen und konsequent am erwarteten Mobilitäts- und Transportbedarf, an naturwissenschaftlichen Fakten und am ingenieurtechnisch Machbaren ausgerichtet werden.

N.B. Alle in der Studie verwendeten Zahlen bzgl. von den Verkehrssystemen erbrachten Transportleistungen in PKM und durchschnittliche Auslastungszahlen beziehen sich auf die Zeit vor der Corona-Pandemie, also auf die Jahre 2019 und früher.

1. Einleitung und Methodik

Kaum ein Thema wird derzeit so intensiv und emotional diskutiert, wie der „ökologische Fußabdruck“ verschiedener Verkehrssysteme, meist reduziert auf mehr oder weniger korrekte Zahlen zum CO₂- und NO_x-Ausstoß. Das Resultat solcher Diskussionen sind stark vereinfachte Aussagen wie „Bahnfahren ist umweltfreundlich“, „Autofahren ist umweltschädlich“ und „Fliegen ist noch viel umweltschädlicher“.

Dass die Sachverhalte in Wirklichkeit sehr viel komplexer sind und es nicht ausreicht, nur die Abgase am Auspuff zu messen, um dem Umweltaspekt angemessene Rechnung zu tragen, soll nachfolgend dargestellt werden. Bisherige Ansätze, THG-Emissionen in einem weiter gefassten Kontext zu bewerten und zu vergleichen, zielten vor allem darauf ab, neben kurzfristigen Emissionen auch deren langfristige Klimawirkung einzubeziehen (1), (2). Der Ansatz, der in dieser Studie erstmalig verfolgt wird, zielt darauf ab, dass die Emissionen des Verkehrssektors ganzheitlich, d.h. inklusive aller notwendigen Infrastrukturkomponenten, betrachtet werden. Emissionen, die in der bisher gängigen Betrachtungsweise „der Industrie“ oder „dem Bausektor“ zugeschrieben wurden, werden hier dem Verkehrssystem zugerechnet und der im jeweiligen System erbrachten Verkehrsleistung zugeordnet, solange sie in unmittelbarem Zusammenhang zur Erbringung der Verkehrsleistung stehen. Dies gilt für die industrielle Produktion von Autos, Zügen und Flugzeugen genauso wie für den Bau von Straßen, Schienen, Flughäfen, Bahnhöfen und allen weiteren Infrastrukturkomponenten. Stahl und Aluminium werden beim Bau von Zügen, Autos oder Flugzeugen, Beton und Stahl beim Bau von Straßen, Brücken, Tunneln, Start- und Landebahnen benötigt. Berücksichtigt man die Ursache-Wirkungs-Beziehung, dann müssen Energieverbrauch und entstehende Schadstoffe für Beton und Stahl für Autobahnbrücken der Energie- und Schadstoffbilanz des Verkehrsträgers Straße zugerechnet werden; handelt es sich bei den Bauwerken um Bahnbrücken oder Tunnel, sind sie entsprechend dem Schienenverkehr zuzuordnen, der Beton für Startbahnen auf Flughäfen der Bilanz des Verkehrssystems Luftfahrt. Dieser Ansatz ist sehr komplex, aber bereits einige Beispiele machen deutlich, dass es nicht ausreicht, nur die Abgase am Auspuff zu messen, um dem Umweltaspekt angemessene Rechnung zu tragen.

Grundlage der Untersuchung sind die Prinzipien ganzheitlicher Excellence, wie sie beispielsweise in verschiedenen Modellen zur kontinuierlichen Verbesserung von Organisationen, Unternehmen, Prozessen, etc. angewendet werden. Ganzheitliche Excellence hat sehr viele Facetten, deren ausführliche Beschreibung Rahmen und Zielsetzung dieser Ausführungen sprengen würde. Die in diesem Kontext relevantesten Punkte sind:

- Die Komplexität von Sachverhalten muss vollständig verstanden sein; existierende Ursache-Wirkungs-Mechanismen müssen systematisch analysiert und berücksichtigt werden;
- Entscheidungen sind auf der Basis von Zahlen, Daten und Fakten zu treffen; diese müssen methodisch sauber ermittelt, also vorurteils- und ideologiefrei gemessen bzw. empirisch nachweisbar sein.

Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge können weit über das hinausgehen, was offensichtlich ist. Das Thema Mobilität betreffend dreht sich die gesamte öffentliche und politische Diskussion fast ausschließlich um die Abgase der Verkehrsmittel, ohne die Komplexität des Systems zu berücksichtigen.

Nachfolgend wird zunächst die Methodik vorgestellt, anhand derer eine ganzheitliche Bewertung unter Excellence-Gesichtspunkten vorgenommen wird. Im Anschluss daran wird exemplarisch, also anhand von Beispielen, dargelegt, welche Klimawirkung die verschiedenen, zur Erbringung einer Verkehrsleistung erforderlichen Komponenten haben. Im Anschluss daran werden einige grundlegende physikalische Aspekte, die für Verkehrssysteme relevant sind, adressiert. Diese Studie befasst sich schwerpunktmäßig mit den Treibhausgasen (THG) bei der Nutzung unterschiedlicher Verkehrssysteme und fokussiert dabei auf den Aspekt der CO₂-Emissionen; die Studie folgt damit der aktuellen gesellschaftlichen und politischen Diskussion, wohlwissend, dass es weitere, zum Teil intensiver wirkende THG gibt, die in die Gesamtbilanz einfließen.

1.1 Methodik

Für die vier großen Verkehrssysteme Straße, Schiene, Luft und Wasser ist in der folgenden Tabelle dargestellt, welche Komponenten die jeweiligen Systeme benötigen, um eine Transportleistung erbringen zu können. Jedes dieser Systeme benötigt die eigentlichen Verkehrsmittel, also Autos, Züge, Flugzeuge bzw. Schiffe. Ebenso benötigen alle Systeme ihre eigene spezifische Infrastruktur, die sich unterteilen lässt in eine „Knotenpunkt“-Infrastruktur (Bahnhöfe, Flughäfen, Häfen, Parkplätze, etc.), eine „Wege“-Infrastruktur (Straßennetz, Schienennetz, Wasserstraßen, etc.) und eine „Steuerungs“-Infrastruktur (Stellwerke, Signalanlagen, Ampeln, Verkehrszeichen, Flugsicherungssysteme, Leuchttürme, Bojen, etc.). Weiterhin sind in der Tabelle die Energieträger für den Antrieb der Verkehrsmittel aufgeführt.

Um zu einer korrekten ökologischen Bewertung der jeweiligen Systeme zu kommen, müssen immer alle für das jeweilige Verkehrssystem notwendigen Komponenten betrachtet werden. Ganzheitliche Ursache-Wirkungs-Mechanismen zu betrachten heißt also, dass sämtliche klimarelevanten Emissionen aus der Fahrzeugproduktion, dem Straßenbau und der Wartung und Pflege der Straßeninfrastruktur, der Produktion sämtlicher Verkehrszeichen und Ampeln inkl. des Aufstellens und des Betriebs (Strom, Wartung, etc.) ermittelt und in die Gesamtbilanz einzubeziehen sind. Analog ist im Schienenverkehr nicht nur der Strom zu betrachten, mit dem die Züge angetrieben werden, sondern auch der Bau und die Wartung der Züge und des Schienennetzes, der Bau, Betrieb und die Pflege der Bahnhöfe, sowie Bau und Betrieb aller Stellwerke, Signalanlagen, Weichen, etc., die zwingend erforderlich sind, um einen geregelten und sicheren Schienenverkehr zu er-

Tabelle 1: Die vier grundlegenden Verkehrssysteme und ihre jeweils notwendigen Komponenten

Notwendige Systemkomponenten	Schienerverkehr	Straßenverkehr	Luftfahrt	Schifffahrt
Verkehrsmittel	Zug	KFZ	Flugzeug	Schiff
Knotenpunkt-Infrastruktur	Bahnhöfe	Parkraum	Flughäfen	Häfen
Wege-Infrastruktur	Schienennetz, ggf. Infrastruktur für Elektrifizierung	Straßennetz, Tankstelleninfrastruktur, ggf. Infrastruktur zur Stromversorgung	Luft	Ozeane, Fahrrinnen in Küstennähe in der Hochseeschifffahrt, Flüsse und Kanäle im Binnenverkehr
Steuerungs-Infrastruktur	Stellwerke, Signalanlagen, Weichen, etc.	Ampeln, Verkehrszeichen, etc.	Flugsicherung inkl. Anlagen (Radar, Funkfeuer, etc.)	Leuchttürme, Funkfeuer, etc., Lotsen in bestimmten Gewässern
Direkte Energie zur Fortbewegung des Verkehrsmittels	Strom, Diesel	Benzin, Diesel, vereinzelt Strom und Gas	Kerosin, Flugbenzin	Schweröl, Schiffsdiesel, vereinzelt LNG ¹

möglichen. In der Luftfahrt sind dementsprechend Bau und Wartung der Flugzeuge sowie der Flughäfen und deren Betrieb zu berücksichtigen, ebenso alles, was mit der Flugsicherung zu tun hat.

Um es gleich vorwegzunehmen: Nicht alle Zahlen, die notwendig wären, um beispielsweise den CO₂-Footprint des gesamten Schienen- oder Autobahnnetzes korrekt zu bestimmen, der bereits beim Bau der jeweiligen Infrastruktur angefallen ist, sind bekannt oder gar verfügbar. Hierfür wären exakte Zahlen über die verwendeten Materialien sowie die Durchführung der Bauprojekte notwendig; in der Vergangenheit hat man sich darüber schlicht keine Gedanken gemacht. CO₂ galt bis vor wenigen Jahrzehnten als natürlich vorkommendes, ungiftiges, unsichtbares und geruchloses Gas, dem man keine wirkliche Relevanz beimessen musste. Die Treibhausgaswirkung von CO₂ ist erst vor rund 20 Jahren erstmals ins Bewusstsein gerückt worden. Diese wichtige und richtige Veränderung in der Wahrnehmung und Bewertung muss allerdings bei heutigen und zukünftigen Entscheidungen zu Mobilität und Verkehrssystemen angemessen berücksichtigt werden.

Zur Darlegung der Relevanz von Infrastruktur im Zusammenhang mit der ökologischen Gesamtbetrachtung von Verkehrssystemen werden in dieser Studie exemplarische Beispiele verwendet, für die Zahlen, Daten und Fakten aus allgemein zugänglichen Quellen recherchiert werden konnten. Dies sind beispielsweise die Hochgeschwindigkeitsstrecke der Bahn zwischen Köln und Frankfurt, der Gotthard-Basistunnel in der Schweiz oder das Projekt „Stuttgart 21“, die Verlegung des Stuttgarter Hauptbahnhofs in den Untergrund. Für den Straßenverkehr schauen wir auf die durchgängig mindestens sechsspurige Autobahn A3 zwischen Köln und Frankfurt. Für den direkten Vergleich der Verkehrssysteme betrachten wir die Strecke Hamburg – München.

Ein weiterer wichtiger Punkt, die Effizienz der verschiedenen Verkehrssysteme betreffend, ist die Art und Weise, wie der Bewegungsvorgang aus physikalischer Sicht abläuft. Die Bewegungsverläufe sowie die physikalischen Größen, die die notwendigen Energiemengen beeinflussen, spielen hier eine wesentliche Rolle und werden in dieser Studie in einem eigenen Kapitel untersucht und bewertet.

¹ LNG: Liquid Natural Gas

1.2 Materialien und deren CO₂-Bilanz

Im industriellen Umfeld gehören die Stahlindustrie, die Aluminiumproduktion und die Zement- und Betonindustrie zu den Industrien mit dem größten Energieverbrauch und den höchsten CO₂-Emissionen (3), (4).

Um eine Tonne (1.000 kg) Stahl im Hochofen zu produzieren, werden rund 20 GigaJoule (GJ) Energie benötigt, das entspricht etwa 5.600 MWh (Megawattstunden). Da die Energie für die Stahlproduktion primär aus (fossilem) Koks stammt, fallen für die Produktion von 1 t Rohstahl etwa 2 t CO₂ an (3), (5), (6). Dies ist nur die Energie- und Schadstoffbilanz aus dem Hochofen- und Kokerei-Prozess, alles was im Walzwerk oder bei einer weiteren Veredlung des Rohstoffs Stahl noch anfällt, muss jeweils noch hinzugerechnet werden. Für Aluminium ist die Klimabilanz noch deutlich negativer als bei Stahl; um eine Tonne reines Aluminium zu produzieren, fallen je nach verwendeter Primärenergie zwischen acht und 12 Tonnen CO₂ an (7). Auch die Betonproduktion ist, nicht zuletzt wegen der Verwendung von Zement, für den in der Herstellung schon rund eine Tonne CO₂ pro Tonne Zement entsteht, ein ökologisch problematischer Werkstoff. Trotz Fortschritten bei der Energieeffizienz muss man pro m³ Beton auch heute noch von mindestens 300 kg CO₂ ausgehen, die freigesetzt werden, lange bevor der Beton im Bauwerk anfangen kann auszuhärten, in Abhängigkeit des Zementanteils können es auch mehr als 400 kg sein. Am Rande sei angemerkt, dass die

weltweite Zement- und Betonproduktion je nach Schätzung zwischen sechs und acht Prozent der gesamten jährlichen CO₂ Emissionen verursacht, das ist das Drei- bis Vierfache dessen, was der gesamte weltweite Luftverkehr in seiner CO₂-Bilanz stehen hat (8), (9), (10), (11). Zwar wird intensiv daran geforscht, die Zement- und Betonproduktion emissionsärmer zu machen, der große Durchbruch lässt aber seit Jahren auf sich warten (12). Aus klimatischer Sicht ist es dabei irrelevant, ob CO₂ und andere Emissionen bei der Stahl- oder Zementproduktion in China, in Indien, in Indonesien oder in Deutschland entstehen. Die Emissionen, die das globale Klima beeinflussen, sind zunächst einmal da; Atmosphärenphysiker sind sich heute weitgehend einig, dass der Erwärmungseffekt von CO₂ in der Atmosphäre nach etwa 10 Jahren eintritt und die Klimawirkung von CO₂-Molekülen aufgrund der Verweildauer in der Atmosphäre bei rund 100 Jahren liegt (13). Regionale oder gar lokale Unterschiede bzgl. der klimatischen Wirkung von CO₂ aufgrund des Standortes von CO₂-Emittenten sind daher ausgeschlossen.

Sind die relevanten Zahlen für den CO₂-Ausstoß der notwendigen Komponenten eines Verkehrssystems oder eines Teils davon (z.B. eine bestimmte Strecke) ermittelt, müssen diese ins Verhältnis zum erbrachten „Verkehrsaufwand“ (Verkehrsleistung in Personenkilometer (PKM), bei Fracht Tonnenkilometer (TKM)) gesetzt werden. Folgende Zahlen liegen hierzu vor (14), (15), (16):

Tabelle 2: Jährliche Verkehrsleistung der Verkehrssysteme Straße, Schiene und Luftfahrt 2018

Verkehrssystem	Verkehrsaufwand in Milliarden PKM
Straße, Motorisierter Individualverkehr (MIV)	965,5
Schiene	95,8
→ davon Fernverkehr	39,4
→ davon Nahverkehr	56,5 *)
	<small>*) rund 41 Mrd. PKM von DB Regio, rund 15 Mrd. PKM von anderen Unternehmen</small>
Luftfahrt (abgehend und ankommend von/auf allen deutschen Flughäfen)	486,2
→ davon innerdeutsch	10,3
→ davon abgehend ins Ausland	237,6
→ davon ankommend aus dem Ausland	238,3

Bei den weiteren Überlegungen fokussieren wir uns auf den Personenverkehr innerhalb der Verkehrssysteme Schiene, Straße und Luftfahrt; die kommerzielle Schifffahrt (von Kreuzfahrten und Fährverbindungen abgesehen) erbringt nur Frachttransportleistung. Zudem betrachten wir schwerpunktmäßig den Fernverkehr, da es in der Luftfahrt keinen Nahverkehr im klassischen Sinne gibt. Bei den Systemen Straße und Schiene haben viele der untersuchten Aspekte grundlegende Gültigkeit, unabhängig davon, ob wir Nah- oder Fernverkehr betrachten. Einige Aspekte unterscheiden sich jedoch stärker,

so dass es methodisch unsauber wäre, alle Ergebnisse aus den Betrachtungen zum Fernverkehr in den Nahverkehr zu übertragen. Beispielsweise werden Fernstraßen überwiegend oder im Falle von Autobahnen sogar ausschließlich für KFZ gebaut, während bei kommunalen Straßen zu berücksichtigen ist, dass hier eine gemeinsame Nutzung von Fußgängern, Radfahrern und KFZ erfolgt. Diese Straßen dürften also in ihrer Schadstoffbilanz nur in Teilen dem MIV zugeordnet werden. An den Stellen, an denen Überlegungen auch für den Nahverkehr gemacht werden, wird dies explizit angegeben.

2. CO₂-Emissionen bei Produktion (und fachgerechter Entsorgung) der Verkehrsmittel

Welche Ressourcen und welche Energie sind jeweils notwendig, um einen Zug, ein Auto oder ein Flugzeug zu bauen? Welche ökologischen Auswirkungen entstehen dabei? Steht das Verkehrsmittel dann einsatzbereit „vor der Tür“, ist ein weiteres Kriterium, welche Transportleistung damit während der gesamten Lebensdauer erbracht wird. Da alle technischen Systeme im Laufe ihres Einsatzes auch gewartet werden müssen, sind auch diese Kosten zu berücksichtigen, inkl. der Kosten für Reparaturen, Ersatzteile, etc.

Bei der Herstellung eines Produkts kann in der Regel in groben Zügen angegeben werden, zu wie viel Prozent das Produkt aus Stahl, Aluminium, CFK-Komponenten², Kunststoffen und sonstigen Wertstoffen und Materialien besteht und es ist auch bekannt, wie eine grobe Ökobilanz der jeweiligen Materialien aussieht. Verteilt man anschließend noch die Energie, die in der Produktion selbst verwendet wird, auf den Output, so hat man einen groben Überblick über die Energiekosten und umweltbelastenden Faktoren des jeweiligen Verkehrsmittels.

Wie komplex die Sachverhalte jedoch zuweilen sind, soll folgendes Beispiel verdeutlichen: Ein deutscher Automobilhersteller produziert ein Fahrzeug, bei dem die Karosserie nicht mehr primär aus Stahl und Aluminium, sondern aus CFK besteht. Die Ausgangsfaser hierfür kommt aus Japan, wird von dort an die amerikanische Westküste transportiert, wo ein erster Veredlungsschritt vorgenommen wird. Von dort geht es dann nach Wackersdorf, wo die Fasern zu entsprechenden Matten zusammengefügt werden, die dann im Automobilwerk in Sachsen mit Kunstharz getränkt und in die jeweiligen Formen gepresst werden. Im gesamten Produktionsprozess wird nach Aussage des Unternehmens penibel darauf geachtet, dass er so energieeffizient wie möglich erfolgt, wo immer regenerative Energien eingesetzt werden können, wird dies auch getan. Um aber die kompletten CO₂-Emissionen für die Produktion, der im Fahrzeug letztendlich verwendeten CFK-Komponenten bestimmen zu können, müssten die entsprechenden Zahlen, Daten und Fakten aller vier, auf der ganzen Welt verteilten Produktionsstandorte für diese GFK-Komponenten inkl. des Transports zwischen den Standorten berücksichtigt werden. Derzeit sind realistische Zahlen für derart komplexe Prozesse und Abläufe schlicht nicht verfügbar.

Trotz der zuvor beschriebenen Komplexität gibt es erste überschlägige Untersuchungen für diesen Themenkomplex. Sie wurden vom Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg gemeinsam mit dem ADAC durchgeführt; für einen Wagen der oberen Mittelklasse wurde ausgerechnet, dass bei der Produktion und beim ordnungsgemäßen Recycling in Summe etwa 8 t CO₂ anfallen (17).

Bei Elektro-Fahrzeugen muss in eine solche Rechnung beispielsweise auch die Ökobilanz der Batterieproduktion einfließen. Gerade die hat in den vergangenen Jahren zu erheblichen Diskussionen unter Befürwortenden sowie Skeptikerinnen und Skeptikern der Elektromobilität geführt. Das schwedische Umweltforschungsinstitut IVL hat 2017 eine erste Studie über die CO₂-Belastung aus der Produktion von Batterien für Elektrofahrzeuge veröffentlicht. Dabei wurde ein Wert von 150 bis 200 kg CO₂ pro kWh Batterieleistung ermittelt. Eine Batterie mit 50 kWh Kapazität kam danach auf eine CO₂-Belastung von 7,5 bis 10 Tonnen, für größere Batterien mit 100 kWh, die bei großen Elektro-SUVs oder in Fahrzeugen des amerikanischen Marktführers für E-Mobilität verwendet werden, schlug demzufolge allein die Batterieproduktion bereits mit 15 bis 20 Tonnen CO₂ zu Buche. 2019 ist eine überarbeitete Fassung dieser Studie von IVL veröffentlicht worden (18), in der für die meisten Batterietypen ein Wert zwischen 61 und 106 kg CO₂/kWh Batteriekapazität angegeben wurde³. Die Verbesserungen sind zum einen auf Innovationen in der Fertigung zurückzuführen, zum anderen darauf, dass der Strom für die Batteriefertigung an manchen Standorten zu fast 100 % ohne fossile Energieträger produziert wurde, was für die weitere Zukunft diesbezüglich dann keine weiteren Verbesserungen erwarten lässt. Darüber hinaus sind in der neueren Fassung der Studie bereits Annahmen bzgl. des Recyclings bzw. Weiterverwendung der Batterien berücksichtigt, wenn diese für den Einsatz im E-Auto nicht mehr tauglich sind. Das insgesamt bei der Produktion eines KFZ emittierte CO₂ ist aber derzeit für ein E-Auto aufgrund der hohen CO₂-Belastungen bei der Batterieproduktion höher als bei einem in der Größe vergleichbaren PKW mit Verbrennungsmotor.

² CFK: Carbonfaserverstärkter Kunststoff

³ Die auf die Veröffentlichung der ersten Studie folgende hochemotionale Diskussion hat nicht dazu beigetragen, den ideologisch geprägten Streit unterschiedlicher Gruppen in irgendeiner Form zu versachlichen.

10 2. CO₂-EMISSIONEN BEI PRODUKTION DER VERKEHRSMITTEL

Für unsere folgenden Überlegungen bleiben wir bei den von ADAC und IFEU exemplarisch bestimmten Wert von 8 t CO₂. Statistisch gesehen fährt dieses Fahrzeug im Laufe seines Lebens in Deutschland 160.000 km, sodass die in der Produktion angefallenen CO₂-Kosten mit 50 g für jeden gefahrenen Fahrzeugkilometer zu Buche schlagen. Da Autos in Deutschland durchschnittlich nur mit 1,5 Personen besetzt sind (16), ergibt dies eine vergleichsweise geringe Transportleistung von 240.000 PKM; wir haben aus der reinen Fahrzeugproduktion somit 33 Gramm CO₂ für jeden geleisteten Personenkilometer, der in der Gesamtbilanz des MIV zu berücksichtigen ist.

Auch für die Verkehrsträger Schiene und Luftfahrt müssen für Züge und Flugzeuge entsprechende Analysen und Berechnungen durchgeführt werden. Trotz intensiver Recherche lassen sich hierfür keine verlässlichen Zahlen zusammentragen, weshalb wir uns mit einer Abschätzung begnügen müssen. Eine Plausibilitätsüberlegung lässt den Schluss zu, dass die Gesamtmenge an benötigtem Material eine wichtige Größe darstellt und das Leergewicht des Transportmittels einen ersten Anhaltspunkt liefert.

In jedem Fall werden die CO₂-Mengen beim Bau eines Zuges oder Flugzeuges ungleich größer sein als bei einem PKW, und sie werden sich definitiv im drei-, vier-, möglicherweise fünfstelligen Tonnenbereich bewegen. Wir reden hier aber auch über Transportleistungen von Hunderten Millionen bzw. Milliarden PKM. Ein ICE ist auf eine Lebensdauer von 25 Jahren ausgelegt und legt pro Jahr rund 500.000 km zurück, was dann zu einer Gesamtfahrleistung von 12,5 Mio. km führt (19). Berücksichtigt man die Anzahl der Plätze und die durchschnittliche Auslastung (20) (21), so ergibt dies etwas mehr als 3,1 Mrd. PKM, auf die die CO₂-Mengen aus Produktion, Wartung und fachgerechter Entsorgung letztendlich umgelegt werden müssen. Der ICE 3, der fortan als Beispielzug verwendet wird, hat ein Leergewicht von 408 t und wiegt damit etwa so viel wie 270 Mittelklassewagen, wie drei moderne Langstreckenjets oder acht Mittelstreckenflugzeuge. Der fast 13.000-fach höheren Verkehrsleistung des ICE gegenüber einem einzelnen PKW steht die lediglich 270-fache Masse gegenüber, die als plausible Größenordnung für die THG-Emissionen herhalten soll. Auch ohne konkrete Zahlen ist deshalb die Schlussfolgerung zulässig, dass der CO₂-Anteil aus der Fertigung eines ICE pro PKM signifikant unter den 33 g/PKM beim PKW liegen muss.

Ein Passagierflugzeug kann im Laufe eines Monats bis zu 375.000 km zurücklegen (22). Unter Berücksichtigung der Anzahl der Sitzplätze und durchschnittlicher Auslastung ergibt dies mehr als 111 Millionen PKM im Monat. Unterstellt man, dass das Flugzeug etwa 11 Monate im Jahr fliegen kann (ein Monat wird für Wartungsarbeiten veranschlagt) und gehen wir von einer Lebensdauer von 25 Jahren aus, so kommt in dieser Zeit eine Größe im Bereich zweistelliger Milliarden, in einem konkret gerechneten Einzelfall sogar mehr als 30 Mrd. PKM zusammen (22). Auch aus dem Flugzeugbau liegen keine verlässlichen Zahlen für die bei der Produktion entstehenden CO₂-Mengen vor. Ein typisches Mittelstreckenflugzeug, etwa der Airbus A321, hat ein Leergewicht von 47,5 t (23), (24), (25), das entspricht in etwa dem Gewicht von 32 DurchschnittspKW. Die Verkehrsleistung bewegt sich im Laufe des Flugzeuglebens aber im Bereich von vielen Mrd. PKM, sodass die auf jeden PKM anzurechnenden CO₂-Emissionen aus dem Bau des Flugzeugs signifikant geringer sein werden als im Straßen- oder Schienenverkehr.

Zwischenfazit: Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es für die Effizienz eines Verkehrssystems offensichtlich vorteilhaft ist, wenn die durch ein einzelnes Verkehrsmittel erbrachte Verkehrsleistung im Laufe der Nutzungszeit möglichst hoch ist, um die anzurechnenden Energie- und Schadstoffkosten aus der Produktion und der Wartung des Verkehrsmittels auf möglichst viele Personenkilometer zu verteilen. Alle hier betrachteten Verkehrssysteme haben gemein, dass die Verkehrsmittel während der Lebenszeit regelmäßig gewartet werden müssen. Die hierfür notwendigen Aufwände, die auch CO₂-Emissionen verursachen, sind in den bisherigen Überlegungen nicht berücksichtigt. Der Sachverhalt, dass PKW aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Verkehrsleistung im Vergleich zu Bahn und vor allem Flugzeug den größten CO₂-Footprint haben, wird sich dadurch nicht ändern; der Wert von 33 g/PKM wird vielmehr noch größer werden.

3. CO₂-Emissionen der Infrastruktur

3.1 Wege-Infrastruktur

Alle Züge fahren auf Schienen aus Hochleistungsstahl, eine Schiene wiegt 60 kg pro Meter (26). Für einen Kilometer Schiene sind das dann schon 60 t Stahl, für ein Gleis (aus zwei Schienen) ergibt dies 120 t und damit 240 t CO₂, die allein bei der Stahlproduktion angefallen sind. Als Beispiel dient nachfolgend die zweigleisige Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln–Frankfurt (rund 700 km Schienen), für die sich allein aus der Produktion des Schienenstahls 84.000 t CO₂ errechnen.

Um aus den Schienen eine Hochgeschwindigkeitsstrecke zu machen, bedarf es einer Trasse, die zunächst einmal gerodet und planiert werden muss, und die im Fall der Strecke Köln–Frankfurt durch etliche Tunnel und über sehr viele Brücken führt. Wurden Gleise früher auf Betonschwellen fixiert (je 265–560 kg im Abstand von 65 cm), die in Tausenden Tonnen verdichtetem Schotter lagen, wird in Tunneln und auf neueren, insbesondere Hochgeschwindigkeitsstrecken, heute eine „feste Fahrbahn“ verwendet, bei denen die Schienen auf einem mehrschichtigen, durchgängigen Betonbett liegen (27). Feste Fahrbahnen benötigen jedoch deutlich mehr Beton im Vergleich zu Schwellen in einem Schotterbett. Für die genannte Beispielstrecke wurden rund 550.000 m³ Beton allein für die feste Fahrbahn verbaut. Für die Tunnel sind in jahrelanger Arbeit Millionen m³ Gestein aus dem Berg gebohrt oder gesprengt worden, mussten abtransportiert, anderweitig verwertet bzw. deponiert werden, und während des Tunnelvortriebs musste eine Stahlbetonröhre gebaut werden, um den Einsturz des darüberliegenden Bergs zu verhindern. So wurden allein im 2.069 m langen Idsteintunnel der Beispielstrecke 75.000 m³ Beton und 9.500 t Stahl verbaut; insgesamt fielen 600.000 m³ Erdaushub und 55.000 m³ Tunnelausbruch an (28). Allein bei der Produktion des Betons und Stahls für dieses eine Tunnelbauwerk fielen also mindestens 37.750 t CO₂ an. Rechnet man diese Zahlen auf sämtliche Tunnel zwischen Köln und Frankfurt (rund 47 km in 30 Tunneln) hoch, so liegt der CO₂-Ausstoß ausschließlich für die Stahl- und Betonproduktion nur der Tunnelbauwerke bei mehr als 850.000 t. Brückenbauwerke sowie die ebenerdigen Strecken oder auch die zuvor erwähnte „feste Fahrbahn“ sind hier noch nicht mit eingerechnet. Einer anderen Quelle zufolge sind allein in den Tunnelbauwerken dieser Strecke rund 3 Millionen m³ Beton verbaut worden und es fielen 7,5 Millionen m³ zusätzlicher Tunnelausbruch an (29). Für die gesamten Erdarbeiten gibt diese Quelle die Bewegung von 30 Millionen m³ Material zzgl. elf Millionen m³ Tunnelausbruch an.

Sehr genau wurden die beim Tunnelbau entstehenden THG-Emissionen auch für das Projekt Stuttgart 21 untersucht (30). Dort wurden unter Berücksichtigung der exakten baulichen Gegebenheiten mehr als 27.000 t CO₂ für jeden Kilometer Tunnelröhre errechnet, wobei entsprechend der Planungen von eingleisigen Tunnelröhren ausgegangen wurde. Unter Zugrundlegung dieser Zahlen müssten für die Tunnel unserer

Beispielbahnstrecke mindestens 1,3 Mio. t CO₂ veranschlagt werden.

Unabhängig davon, welche Quellen als Grundlage herangezogen werden, ist davon auszugehen, dass nur für die Stahl- und Betonproduktion dieser 170 km langen Strecke weit mehr als eine Million Tonnen CO₂ angefallen sind. Wie gesagt, dies ist nur der CO₂-Ausstoß für die Produktion der genannten Materialien, energie- und damit schadstoffintensiv ist natürlich auch der Transport der Materialien bis zur Baustelle, der sich je nach Produktions- und Verwendungsort über Hunderte oder gar Tausende Kilometer erstrecken kann. Zudem mussten sämtliche Materialien noch verbaut werden. Die übliche Energieversorgung auf Baustellen ist, mangels Alternative, Dieselkraftstoff für Baufahrzeuge, Maschinen und Stromgeneratoren; angesichts der zuvor genannten Mengen an zu bewegendem Material und vor dem Hintergrund, dass über eine Bauzeit von sieben Jahren bis zu 15.000 Menschen gleichzeitig am Bau der Strecke beteiligt waren, dabei Hunderte, wenn nicht Tausende großer Baumaschinen eingesetzt wurden, reden wir hier über Hunderttausende Maschinentage und dementsprechend über zig Millionen Liter Diesel-Kraftstoff. Zudem musste für den Bau der Bahnstrecke die benachbarte Autobahn A3 an mehreren Stellen über insgesamt 15 km vorübergehend verlegt werden, über mehr als 8 km war eine dauerhafte Neutrassierung notwendig (31); auch die hierfür notwendigen Baumaßnahmen und die damit verbundenen Umweltbelastungen wurden durch den Bau der Bahnstrecke verursacht und sind daher der Ökobilanz dieser Bahnstrecke zuzurechnen.

In Summe sind zwischen 1995 und 2002 für die Fertigstellung dieser Bahnstrecke mehrere Millionen Tonnen CO₂ als klimawirksamer Fußabdruck angefallen, noch bevor überhaupt der erste Zug gefahren ist. Auch wenn es sich bei dieser Strecke um eine der am stärksten frequentierten Bahnstrecken in Deutschland handelt, auf der in den ersten 15 Jahren des Betriebs rund 220 Millionen Fahrgäste unterwegs gewesen sind, bleiben pro Person und Fahrt CO₂-Belastungen im zweistelligen Kilogramm Bereich, die bereits Jahre oder Jahrzehnte zuvor beim Bau der Strecke angefallen sind. Selbst wenn nach 35 Jahren einmal 500 Millionen Fahrgäste auf der Strecke gefahren sein sollten, werden die CO₂-Belastungen „pro Kopf und Fahrt“ dann bestenfalls im größeren einstelligen Kilogramm Bereich pro Person und Fahrt liegen, insbesondere, weil auch Wartungsarbeiten an der Strecke (Schienen schleifen, Tunnelanierungsarbeiten, etc.) mit immer neuen Belastungen hinzugerechnet werden müssen.

Nach Angaben der Bahn sind voraussichtlich nach etwa 30 Jahren die Schienen komplett auszutauschen, womit erneut 84.000 t CO₂ auf der Rechnung stehen werden. Bei Gleisbetten aus Schotter und Schwellen geht man heute von 30 bis 40 Jahren Haltbarkeit aus, für die „feste Fahrbahn“ gibt es derzeit noch keine wirklichen Erfahrungswerte bzgl. der Haltbarkeit;

von 10–20 Jahre länger bis hin zu 10 Jahre kürzer verglichen mit dem „klassischen Schotterbett“ liegen hier die Erwartungen weit auseinander. In jedem Fall wiederholen sich aber die Aufwände inkl. der sich aus der Materialproduktion und dem Bau resultierenden Öko- und Schadstoffbilanzen im Laufe der Zeit. Die ICE-Strecken, auf denen Ende der 80er-Jahre des vorigen Jahrhunderts die ersten ICE-Züge unterwegs waren, werden bereits nach weniger als 30 Jahren derzeit von der Bahn faktisch neu gebaut (Schiene, Gleisbett, Oberleitungsmasten, Elektrifizierung und Steuerungstechnik) (32), (33).

Die kompletten CO₂-Emissionen der gesamten Wege-Infrastruktur für die Bahn lassen sich im Nachhinein ohne exakte Kenntnis der beim Bau verwendeten Materialien nicht wirklich bestimmen. Auf Basis der Recherchen für einzelne Strecken ist aber davon auszugehen, dass für jeden Streckenkilometer CO₂-Emissionen von mehreren hundert Tonnen (nicht elektrifizierte Strecke ohne Brücken und Tunnelbauwerke) bis hin zu zehntausenden Tonnen (Hochgeschwindigkeitsstrecken auf Brücken und in Tunnelbauwerken) anfallen. Auch auf Strecken mit sehr hoher Auslastung kommen hier CO₂-Belastungen im mittleren bis oberen zweistelligen Grammbereich für jeden PKM auf die Rechnung (Annahme: 3–4 Mio. t CO₂ bei Baumaßnahme Köln–Frankfurt entspricht rund 80–106 g/PKM bei 220 Mio. Fahrgästen und 35–47 g/PKM bei 500 Mio. Fahrgästen). Notwendige Wartungsarbeiten und Reparaturen sowie Komplettsanierung nach entsprechender Nutzung sind dabei noch unberücksichtigt.

Als weiteres Beispiel für Wege-Infrastruktur der Bahn betrachten wir den Gotthard-Basistunnel. Im Bauwerk wurden laut AlpTransit für die etwa 57 km lange Strecke insgesamt 152 km Tunnelröhren gebaut, 4 Mio. m³ Beton und 1,4 Mio. t Zement stecken ebenso in der Tunnelschale wie 125.000 t Stahlbögen, 16.000 t Bewehrungsstahl und 3 Mio. m² Stahlnetze (34). Vier Tunnelbohrmaschinen mit einem Gewicht von jeweils mehreren Tausend Tonnen und einer Leistung von 3.500 kW waren 6 Jahre lang 320 Tage im Jahr 18 Std. am Tag im Einsatz. Im Tunnel liegen 290 km Schienen und 30 Weichen auf 131.000 m³ Beton für die feste Fahrbahn und zusätzlich 380.000 Betonschwellen auf Schotterfahrbahn. Es wird auch hier sofort offensichtlich, dass schon aufgrund der verwendeten Materialien in Summe mehrere Mio. t CO₂ emittiert wurden, bevor der erste Zug durch den Gotthard-Tunnel fahren konnte. Die Plausibilität dieser Aussage kann erneut mit den detailliert gerechneten Zahlen von Stuttgart 21 überprüft werden; bei 27.000 t CO₂ pro Tunnelkilometer ergeben sich für dieses Bauwerk 4,1 Mio. t CO₂. Bei einer vollständigen Betrachtung, in die beispielsweise auch die CO₂-Emissionen aus dem Bau der Tunnelbohrmaschinen und deren Transport/Abtransport berücksichtigt werden müssen, die An- und Abfahrt von Tausenden Arbeitern zur Baustelle und noch vieles mehr einfließen muss, zeigt sich, dass 4 Mio. t CO₂ eher eine untere Grenze darstellen.

Für den Verkehrsträger Straße sind ähnliche Ergebnisse wie bei der Schiene zu erwarten, wobei die bereits angesprochene Unterscheidung in Fernstraßen und kommunale Straßen vorgenommen werden muss.

Die Wege-Infrastruktur zwischen Köln und Frankfurt auf der Straße sind u.a. 174 km der Autobahn A3, die auf dieser Strecke durchgehend mind. 6-spurig ausgebaut ist. Das entspricht einer befestigten Fläche von 29 m im Querschnitt (35), über die gesamte Strecke also gut 5 Millionen m². Unterstellt man eine Betondeckschicht von 30 cm, für stark befahrene Autobahnen nicht unüblich (36), so fallen nur für diese Deckschicht bereits mehr als 1,5 Mio. m³ Beton an, für die bei der Produktion mehr als 375.000 t CO₂ freigesetzt worden sind. Erstellung der Trasse, Streckenunterbau, Auf- und Abfahrten, Park- und Rastplätze, und auch sämtliche Brückenbauwerke (aus Stahlbeton) sind noch separat zu berücksichtigen, und natürlich auch, so wie bei den Bahntrassen, die jahrelangen Bauarbeiten. Auch für die in Deutschland an Autobahnen üblichen Schutzplanken (Leitplanken) ergeben sich beeindruckende Zahlen: 4 m Leitplanke stehen inkl. Pfosten je nach Profil mit 55 bis 60 kg Stahl auf der Rechnung (37), für einen Kilometer sind das dann zwischen 14 und 15 Tonnen pro Schutzplanke, für eine komplette Autobahn also bis zu 60 t pro km, da jede Fahrtrichtung häufig auf beiden Seiten entsprechend gesichert ist. Für die 174 km der A3 ergibt dies rund 10.000 t Stahl nur für die Schutzplanken, für die allein im Hochofen- und Kokerei-Prozess 20.000 t CO₂ angefallen sein dürften.

Für den Fall, dass Straßen durch Tunnel geführt werden, gelten für die Tunnelbauten sehr ähnliche CO₂-Emissionswerte wie für Bahntunnel, da die Materialien Stahl und Beton die gleichen sind. Letztendlich entscheidend sind die Mengen, die u.a. durch geologische und topographische Fakten bestimmt werden, sowie der Aufwand beim Bohren der Tunnelröhren. Beim Vergleich Schiene und Straße ist zu berücksichtigen, dass Züge im Vergleich mit KFZ nur deutlich geringere Steigungen bewältigen können. In sehr hügeliger oder gar bergiger Topografie benötigen Bahnstrecken deshalb sehr viel mehr und längere Tunnel als Autobahnen. Die A3 auf der Strecke Köln–Frankfurt kommt beispielsweise komplett ohne Tunnel aus, die parallel verlaufende Bahnstrecke kommt auf rund 47 Tunnelkilometer. Aus dem gleichen Grund sind Täler-überspannende Brücken für Bahntrassen meist erheblich länger als die Talbrücken parallel verlaufender Autobahnen. Ein Vergleich der Strecke Zürich–Mailand macht dies deutlich: Neben dem Gotthard-Basistunnel fahren die Züge durch zwei weitere Tunnel von rund 15,5 km (Ceneri) und gut 7 km (Olimpino) Länge, hinzu kommen eine Vielzahl kleinerer und mittlerer Tunnel, sodass insgesamt eine Tunnelstrecke von mehr als 90 km Länge durchfahren wird. Auf der Straße beläuft sich die gesamte Tunnelstrecke auf weniger als 50 km, wobei die Gesamtlänge der Brücken auf der Straße, die der auf der Bahnlinie um knapp 8 km übersteigt.

Die kompletten THG-Emissionen der gesamten Wege-Infrastruktur für Straßen lassen sich wie auch für die Schiene im Nachhinein bestenfalls grob abschätzen. Aufgrund der eingesetzten Materialien (Beton, Asphalt, Stahl, etc.) und in Abhängigkeit der Anzahl der Fahrspuren fallen für jeden Streckenkilometer CO₂-Emissionen von mehreren Hundert Tonnen bis hin zu zehntausenden Tonnen (große Talbrücken und in Tunnelbauwerken) an. Je nach Streckenführung, Ausbaustufe der Straße und in Abhängigkeit der Auslastung werden die

CO₂-Belastungen auch im zweistelligen Grammbereich pro PKM liegen. Notwendige Wartungsarbeiten und Reparaturen sowie Komplettanierung nach entsprechender Nutzung kommen wie im Schienenverkehr auch noch hinzu. Vor dem Hintergrund der insgesamt 10-fachen Verkehrsleistung des Straßenverkehrs gegenüber dem Schienenverkehr, der im Verhältnis deutlich geringeren Anzahl von Tunneln und der fehlenden Elektrifizierung (siehe Abs. 4.4), ist davon auszugehen, dass die CO₂-Belastung durch die Wege-Infrastruktur der Fernstraßen pro PKM im Durchschnitt geringer ausfällt als beim System Schiene.

Um die THG-Emissionen für den Bau und Erhalt der Wege-Infrastruktur zwischen Straße und Schiene wirklich vergleichen zu können, empfiehlt es sich, die Berechnungen strecken-spezifisch durchzuführen. Nur dadurch lässt sich verhindern, dass beispielsweise Bahnstrecken mitberücksichtigt werden, die ausschließlich dem Güterverkehr vorbehalten sind, oder dass Fernstraßen in die Berechnung einfließen, für die alternative Bahnstrecken gar nicht existieren.

Im Zusammenhang mit der zuletzt intensiv geführten Diskussion zur Elektromobilität muss bei der Betrachtung der Wege-Infrastruktur zwingend auch berücksichtigt werden, welche CO₂-Mengen anfallen, um zunächst einmal ein ausreichendes Netz an Ladesäulen aufzubauen. Hier sind zum einen die Produktion dieser Ladesäulen und deren Einrichtung zu betrachten; ebenso wichtig ist es aber, die Stromversorgung hierfür bereitzustellen. In bewohnten Gegenden kann in Deutschland unterstellt werden, dass sich die nächste Stromleitung nicht weit entfernt vom Standort der Ladesäulen befindet, so dass lediglich zu prüfen ist, ob mittels der bereits existierenden Strom-Infrastruktur die zusätzlich benötigten Strommengen verfügbar gemacht werden können. Trotz dieser grundsätzlich noch guten Voraussetzungen in Städten zeigt das Beispiel von Tübingen, dass die notwendige Lade-Infrastruktur für Elektro-Mobilität nicht immer und in jedem Fall einfach bereitzustellen ist (38). In ländlichen Gegenden, durch die Fernstraßen auch häufig führen, wird in vielen Fällen zunächst einmal auch diese Infrastruktur komplett neu errichtet werden müssen. Einfache Rastplätze an Autobahnen und Bundesstraßen verfügen, auch wenn Licht für Toilettenanlagen vorhanden ist, nicht automatisch über die notwendige Elektro-Infrastruktur, um ggf. zwei oder drei Elektro-PKW gleichzeitig mittels Schnellladung aufzuladen.

Für das Verkehrssystem Luftfahrt sind die Überlegungen zur Wege-Infrastruktur schnell abgeschlossen: sie wird nicht benötigt, die Luft ist einfach da, sie muss weder gebaut noch gewartet werden. Dies ist ein systeminhärentes Vorteil der Luftfahrt, der bei einer ganzheitlichen Betrachtung eine wichtige Rolle spielt.

Zwischenfazit: Die Wege-Infrastruktur der Verkehrssysteme Straße und Schiene verursacht CO₂-Emissionen, die viel zu groß sind, um sie zu ignorieren. Die Nicht-Berücksichtigung der durch Bau und Wartung dieser Infrastruktur verursachten CO₂-Mengen führt zu einem verzerrten Bild bei der ökologischen Bewertung.

3.2 Knotenpunkt-Infrastruktur

Auch für diese Infrastruktur-Komponenten gilt, dass sämtliche (Energie- und Schadstoff-) Kosten, die mit dem Bau, dem Erhalt und dem Betrieb (Heizung, Klimatisierung, Beleuchtung, Reinigung, etc.) von Einrichtungen zusammenhängen, an denen Reisende ihre Fahrt beginnen und beenden oder in ein anderes Verkehrssystem wechseln, berücksichtigt werden müssen.

Für die zuvor bereits erwähnten jährlichen 966 Mrd. Personenkilometer (PKM) im motorisierten Individualverkehr (MIV) sind in Deutschland rund 47 Millionen PKW und Kleintransporter unterwegs. Unterstellen wir eine Fläche von 12,5 m², die ein abgestelltes Fahrzeug durchschnittlich benötigt, summiert sich der insgesamt notwendige Parkraum auf weit mehr als 500 km², die deutschlandweit benötigt würden, wenn alle Fahrzeuge gleichzeitig abgestellt wären. Zur Einordnung: Das komplette Stadtgebiet von Köln umfasst etwas mehr als 400 km², das von Frankfurt nur knapp 250 km² (39). Auch wenn ein erheblicher Teil dieser benötigten Parkfläche auf privaten Grundstücken vorgehalten wird, ist Parkraum in Ballungszentren inzwischen ein knappes Gut.

Mehrstöckige Parkhäuser werden heutzutage oft in Stahlskelettbauweise erstellt, ältere Parkhäuser und insbesondere Tiefgaragen bestehen in der Regel aus Stahlbeton. Aufgrund der bereits beschriebenen CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung dieser Materialien anfallen, haben wir es hier mit CO₂-Mengen im einstelligen Tonnenbereich pro Stellplatz zu tun.

In die ökologische Gesamtbetrachtung der Knotenpunkt-Infrastruktur für den Straßenverkehr muss auch einfließen, welche zusätzliche Schadstoffbelastung entsteht, während die Fahrer auf der Suche nach einer Parkmöglichkeit für ihr Fahrzeug sind. Aus Großstädten wird immer häufiger berichtet, dass insbesondere Anwohner ohne eigenen festen Parkplatz minutenlang unterwegs sind und dabei mehrere Hundert Meter zurücklegen, um einen Abstellplatz zu finden. Da es sich bei der Parkplatzsuche um einen Fahrweg handelt, der nicht Teil der gewollt zurückzulegenden Strecke vom Ausgangspunkt zum Ziel ist, ist es sinnvoll sich ins Gedächtnis zu rufen, dass auch eine „Parkplatz-Suchfahrt“ von 1 km Länge rein rechnerisch mit 118 g CO₂ (33 g aus der Fahrzeugproduktion, 85 g aus der Antriebsenergie, wie in Abs. 4.5 dargestellt) zu Buche schlägt. Eine Veröffentlichung der DEKRA aus 2016 gibt an, dass die durchschnittliche Parkplatzsuche 10 Minuten dauert und in dieser Zeit durchschnittlich 4,5 km zurückgelegt werden (40). Das Thema „Parken“ wurde auch bereits von Prognos im Auftrag des VDA (Verband der Automobilindustrie) und FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.) ausführlich behandelt (41).

Im Schienenverkehr gehören zur Knotenpunkt-Infrastruktur in Deutschland die rund 5.600 Bahnhöfe (42) und in der Luftfahrt sind es analog alle Flughäfen. Es müssen hier jeweils sowohl der Bau als auch die im laufenden Betrieb anfallenden Energieverbräuche berücksichtigt werden. Welche CO₂-Mengen sind beim Bau der Bahnhofsgebäude, der Tausenden, für ICE-Bahnhöfe mehr als 400 m langen Bahnsteige aus Beton

und Stein, der Unterführungen unter den Gleisen, der Rolltreppen und Fahrstühle, etc. angefallen? Allgemein gültige Antworten auf diese Fragen lassen sich im Nachhinein für die ab den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts gebauten Bahnhöfe nicht mehr treffen, weswegen nachfolgend auf Beispiele aus der Gegenwart verwiesen wird.

Für das „Vergraben“ des Stuttgarter Hauptbahnhofs werden die CO₂-Emissionen, die sich nur aus der Beton- und Stahlproduktion ergeben, auf rund 1,9 Mio. Tonnen geschätzt (43). Andere Quellen beziffern den CO₂-Ausstoß für dieses Projekt insgesamt sogar deutlich höher. Unabhängig davon, ob es sich um rund 2 oder 3,5 Millionen Tonnen CO₂ handelt, es geht hier um CO₂-Mengen, die sich erheblich auf die Gesamt-Ökobilanz des Verkehrsträgers Schiene auswirken, gleichgültig wie viele Personen in den nächsten Jahrzehnten diesen Bahnhof als Ausgangs-, Umsteige- oder Endpunkt ihrer Bahnreise nutzen werden. Natürlich sind die 1,9 Mio. t CO₂ für Beton und Stahl bei Stuttgart 21 nicht verallgemeinerungsfähig, denn das komplette Verlegen eines großen Bahnhofs in den Untergrund ist eine nicht alltägliche Maßnahme. Sie zeigen aber deutlich die in Einzelfällen zu berücksichtigenden Größenordnungen von CO₂-Emissionen, die bei der Planung der Vorhaben bisher schlicht nicht berücksichtigt wurden. Wenn der Bahnhof auch in Zukunft regelmäßig von 225.000 Fahrgästen täglich genutzt wird, stehen nach mehr als 20 Jahren immer noch 1 kg CO₂ pro Bahnstufennutzer nur aus der Bauphase auf der Rechnung, ohne irgendwelche Instandsetzungs- oder Wartungsmaßnahmen zu berücksichtigen und natürlich auch, ohne dass irgendeine Transportleistung erbracht wurde.

Den Betrieb der Bahnhöfe betreffend wird der jährliche Strombedarf von der Bahn für 2019 mit 331 GWh (44) angegeben, die rund 189.000 t CO₂ zu Folge haben; umgerechnet auf die in einem Jahr geleisteten PKM dies ergibt etwa 2,3 Gramm CO₂ für jeden geleisteten PKM. Bei jeder Bahnfahrt von 500 km Länge müssen somit 1,15 kg CO₂ auf der Gesamtrechnung berücksichtigt werden, die nur aus der Stromversorgung für den Betrieb der Bahnhöfe resultieren.

Für Flughäfen gibt es zu diesem Thema auch keine validen Zahlen und Daten, die seriöse Berechnungen erlauben. Dass insbesondere der fast 10 Jahre verzögerte Bau (und Umbau vor Fertigstellung) des neuen Flughafens Berlin-Brandenburg große Mengen an CO₂ verursacht haben wird, bevor er in Betrieb ging, ist offensichtlich. Für die an allen Flughäfen vorhandenen Start- und Landebahnen gelten dabei folgende Überlegungen und Abschätzungen: In Abhängigkeit der Größe der anfliegenden Flugzeuge sind die längeren Bahnen in der Regel 45 m oder 60 m breit, sind mehrere Bahnen vorhanden, gibt es zuweilen auch kürze Bahnen mit 30 m Breite.

Die Länge beläuft sich in der Regel auf 3.000 m bis 4.000 m. Eine 4.000 m lange und 60 m breite Bahn hat eine Fläche von 240.000 m²; unterstellt man eine Betondecke von 0,5 m, ergibt dies 120.000 m³ Beton, der in der Produktion etwa 42.000 t CO₂ verursacht hätte. Die riesigen Vorfeldflächen lassen sich überschlägig analog abschätzen.

Auch der Energiebedarf für den Betrieb von Flughäfen ist erheblich. Da es, anders als bei den Bahnhöfen, keinen einheitlichen Betreiber gibt, liegen keine Zahlen über den Gesamtenergieverbrauch und die dadurch hervorgerufenen Emissionen aller deutschen Flughäfen vor. Für den größten Deutschen Flughafen, Frankfurt Rhein-Main, gibt der Betreiber Fraport die gesamten CO₂-Emissionen für 2018 mit 188.600 t an (45)⁴. In dieser Zahl enthalten sind jedoch auch CO₂-Emissionen, die dem Stromverbrauch, der Heizung und Klimatisierung einer Vielzahl von Verwaltungsgebäuden und Büros, die am Flughafen angesiedelt sind, zuzurechnen sind. Den CO₂-Emissionen von Fraport am Standort Frankfurt stehen rund 220 Mrd. PKM gegenüber, die 2018 in Frankfurt kumuliert (an- und abfliegend) gezählt wurden. Da jeder Flug zwei Flughäfen als Knotenpunkt-Infrastruktur benötigt, sind die Emissionen in Relation zur Hälfte der gesamten PKM zu setzen; es ergeben sich überschlagsmäßig 1,7 g CO₂/PKM aus dem Betrieb der Knotenpunkt-Infrastruktur am Flughafen Frankfurt.

Bei großen Bahnhöfen und Flughäfen ist grundsätzlich darauf zu achten, dass die zur Erbringung der Verkehrsleistung notwendige Infrastruktur von der dort häufig auch angesiedelten „Shopping-Mall- und Konferenz-Infrastruktur“ getrennt wird. Es wäre methodisch unsauber, die Bauten und den Betrieb von Hunderten Geschäften, Restaurants, sowie zum Teil großen Konferenzzentren ökologisch der Verkehrsleistung zuzurechnen, auch wenn diese aus logistisch nachvollziehbaren Praktikabilitätsgründen gezielt und unmittelbar dort angesiedelt sind.

Zwischen-Fazit: Überlegungen und Berechnungen zum CO₂-Ausstoß für Bau und Betrieb jeglicher Infrastrukturbauwerke waren bisher nicht üblich und wurden nicht durchgeführt. Für eine ganzheitliche Betrachtung sind sie aber notwendig, denn gerade Bau und Erstellung von Knotenpunkt-Infrastruktur kann sehr große Emissionsmengen zur Folge haben. Die CO₂-Emissionen aus dem Betrieb der Knotenpunkt-Infrastruktur sind in Summe durchaus erheblich, machen umgelegt auf PKM aber nur einen kleinen Teil des CO₂-Footprint für Mobilität aus.

⁴ Fraport berichtet diese und weitere Zahlen auf der Basis des international anerkannten Scope 3 Standards des Greenhouse Gas Protocols (GHG-Scope 3) (85), das vom World Resources Institute (WRI) und dem World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) entwickelt wurde (86), (87).

3.3 Steuerungs-Infrastruktur

Auch für die von der Steuerungs-Infrastruktur verursachten CO₂-Emissionen sind nur sehr wenig Zahlen verfügbar.

Im Schienenverkehr handelt es sich dabei um den Bau und Betrieb der Stellwerke sowie um alle Systeme, die im Zusammenhang mit der Steuerung von Weichen und Signalen auf der Strecke benötigt werden. Der Energiebedarf der Bahn für Stellwerke, Weichensteuerung und Signalanlagen beläuft sich auf 196 GWh im Jahr 2019, für die witterungsabhängige Weichenheizung kamen 131,5 GWh hinzu (46). Legt man die daraus resultierenden 170.000 t CO₂ auf die im Fern- bzw. Nahverkehr geleisteten PKM analog zur Energieverteilung dieser Verkehre um, kommt man auf 1,1 g/PKM im Fern- und 2,0 g/PKM im Nah- und Regionalverkehr.

In der Luftfahrt sind sämtliche Systeme, mit denen der Flugbetrieb am Boden auf den Flughäfen und in der Luft koordiniert und gesteuert werden, zu berücksichtigen: RADAR- und Funk-einrichtungen, ILS (Instrumentenlandesysteme) und alle Systeme, die von Pilotinnen und Piloten sowie Fluglotsinnen und -lotsen hierfür genutzt werden. Die Deutsche Flugsicherung (DFS) liefert folgende Zahlen zu ihrem jährlichen Energieverbrauch (47): 23 GWh Strom werden in einem gasbetriebenen Blockheizkraftwerk generiert, zusätzlich werden rund 47 GWh Strom eingekauft. Unterstellt man den deutschen Strommix für den eingekauften Strom (0,518 kg CO₂/kWh in 2019) sowie den CO₂-Wert für Energiegewinnung in Blockheizkraftwerken (0,202 kg CO₂/kWh), errechnet sich eine CO₂-Menge von rund 29.000 Tonnen jährlich für den gesamten bei der DFS benötigten Strom. Hierin enthalten ist auch bereits der Strom für sämtliche Liegenschaften der DFS, für die vier Kontrollzentralen, die Kontrolltürme der Flughäfen sowie für alle Radar-, Navigations- und Kommunikationsanlagen. Da das DFS-eigene BHKW eine KWKK-Anlage (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) ist, werden dort zudem aus 22 GWh Erdgas (4.444 t CO₂) Warm- und Kaltwasser für Klimatisierung, Heizung und Fernwärme generiert, sodass der jährlich CO₂-Footprint der DFS mit rund 33.500 Tonnen veranschlagt werden kann. Dieser, absolut betrachtet, großen Schadstoffmenge stehen aber nicht nur die 10,3 Mrd. PKM im innerdeutschen Flugverkehr gegenüber, sondern anteilig auch die rund 475 Mrd. PKM international ankommender und abgehender Verkehr auf und von deutschen Flughäfen. Weiterhin wird seitens der DFS in Teilen auch der internationale Flugverkehr gesteuert, der im deutschen (und teilweise europäischen) Luftraum unterwegs ist, ohne deutsche Flughäfen zu tangieren. Welcher Anteil dieser Verkehrsmengen der Steuerungsleistung der DFS zuzuordnen ist, lässt sich aufgrund fehlender Daten nicht seriös bestimmen. Unterstellt man jedoch, dass neben dem innerdeutschen Verkehr rund 10 % der an- und abfliegenden internationalen Verkehrsleistung deutscher Flughäfen steuerungsstechnisch der DFS zuzuordnen wären, entspräche dies rund 47,5 Mrd. PKM. Nehmen wir weiterhin an, dass die gleiche Verkehrsleistung bei internationalen Überflügen gesteuert wird, so stünden den jährlich 33.500 t CO₂-Footprint aus dem Energieverbrauch der DFS rund 105 Mrd. PKM gegenüber. Dies entspricht dann rund 0,3 g CO₂/PKM, der im Verkehrssystem Luftfahrt der Steuerungs-Infrastruktur zuzurechnen wäre. Selbst wenn

für den bei der DFS insgesamt im Laufe eines Jahres verbrauchten Strom der CO₂-Wert des Strom-Mix in Deutschland (2019 518 g/kWh) unterstellt wird und sich die gesamten durch die DFS verursachten CO₂-Emissionen damit auf knapp 41.000 Tonnen erhöhen, bleibt der CO₂-Ausstoß unter 0,4 g PKM.

Im Straßenverkehr erfolgt die Verkehrssteuerung primär über Verkehrsschilder sowie Ampelanlagen. In Deutschland sind mehr als 2 Millionen Verkehrszeichen sowie weitere rund 300.000 Hinweiszeichen an den Straßen aufgestellt; die Anzahl der Ampelanlagen geht in die Zehntausende mit einer ungleich größeren Anzahl an einzelnen Ampeln.

Verkehrszeichen sind i.d.R. Aluminiumbleche, die mit verschiedenen Folien beschichtet sind. Täglich werden neue Schilder aufgestellt, existierende Schilder werden ausgetauscht oder ersetzt, sowohl dauerhaft als auch nur für kurzfristige Maßnahmen wie befristete Umleitungen oder Bauarbeiten. Zum Aufstellen bedarf es im einfachsten Fall eines Pfahls aus Aluminium oder verzinktem Stahl, der in einem Betonfundament verankert ist. Auf Autobahnen hat man dagegen häufig Schilderbrücken, die ebenfalls auf entsprechend größeren Betonfundamenten stehen. Ein einzelnes rundes Verkehrsschild mit einer Blechstärke von 2 mm und 60 cm Durchmesser (Halte- oder Parkverbot, Durchfahrt verboten, Rad- oder Fußweg, etc.) besteht aus etwas mehr als 1,5 kg Aluminium. Allein zur Herstellung des dafür benötigten Primäraluminiums fallen 12 bis 15 kg CO₂ an (7), die Weiterverarbeitung zu entsprechenden Blechen sowie die eigentliche Produktion des Schildes mit Folien- und Reflektionsflächen sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Ampelanlagen und -steuerungen müssen gebaut, aufgebaut, programmiert und regelmäßig gewartet und betrieben werden. Zahlen, die den gesamten Stromverbrauch aller Ampeln in Deutschland angeben, konnten nicht recherchiert werden. Für die Stadt Hamburg wurde für 2015 der Stromverbrauch der dort installierten Ampelanlagen mit mehr als 8,5 GWh angegeben, mit gegenüber den Vorjahren abnehmender Tendenz, da existierende Ampeln sukzessive durch energiesparendere Modelle ausgetauscht wurden (48). Unterstellt man den Strommix und den dadurch verursachten CO₂-Ausstoß von 0,57 kg/kWh aus 2016, so führte allein der Stromverbrauch der Hamburger Ampeln im Jahr 2015 zu einer CO₂-Belastung von mehr als 4,8 Tonnen.

Zwischen-Fazit: Im Vergleich mit den anderen Infrastruktur-Komponenten lassen die durchgeführten Analysen vermuten, dass die CO₂-Emissionen, die sich pro PKM aus der Steuerungs-Infrastruktur ergeben, eher gering ausfallen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass es bei allen bisher präsentierten Zahlen zum Stromverbrauch nur um den Betrieb geht, natürlich müssen die Systeme und Anlagen zunächst einmal gebaut und installiert werden, was auch mit THG-Emissionen verbunden ist. Für eine ganzheitliche Bewertung ist es notwendig, diese Emissionen zukünftig konsequent zu ermitteln und dem jeweiligen Verkehrssystem zuzuordnen.

4. Mechanische Bewegungseffizienz und Energieversorgung

Alle Rechnungen inkl. der zugrunde liegenden physikalischen Formeln, die in diesem Abschnitt beschrieben sind, sind im Anhang detailliert aufgeführt. An dieser Stelle werden lediglich die Sachverhalte, Gesamtzusammenhänge und einige Ergebnisse dargestellt.

Für die weitere Betrachtung ist es hilfreich, sich einige physikalische Sachverhalte ins Gedächtnis zu rufen: Entscheidend für die notwendige Antriebsenergie bei Transportvorgängen sind folgende Kenngrößen: die Geschwindigkeit, mit der sich das Transportmittel bewegt, die zu bewegende Gesamtmasse, die Beschleunigungsvorgänge, die im Laufe der Transportleistung anfallen, sowie die Hubarbeit, also die zu leistende Arbeit, die im Transportvorgang zur Überwindung der Schwerkraft notwendig ist.

Als erstes werden die insgesamt zu bewegenden Gesamtmassen kalkuliert, die für die weiteren Betrachtungen eine entscheidende Rolle spielen. Welche Masse muss insgesamt bewegt werden, um eine Person zu transportieren?

Die in Deutschland zugelassenen KFZ haben aktuell ein durchschnittliches Gewicht von 1,5 Tonnen je Fahrzeug. Da die Fahrzeuge durchschnittlich nur mit 1,5 Personen besetzt sind, ergibt sich ein Fahrzeuggewicht von rund 1.000 kg/Person.

Beim Zug wird erneut der ICE 3 als Beispiel betrachtet, der auf eine Leermasse von 408 Tonnen und, je nach Baureihe, 425–460 Plätzen kommt; so dass unter Zugrundelegung der durchschnittlichen Auslastung von 55 % (2017) und 56 % (2019) fast 1,7 Tonnen Zuggewicht pro Passagier zu bewegen sind (21), (49). Selbst bei voller Auslastung der Züge fallen 935 kg Zuggewicht für jeden Passagier an, die zu bewegen sind.

In der Schweiz, deren Bahnsystem im internationalen Vergleich als eines der besten gilt, liefert die Recherche sehr überraschende Zahlen. Als Beispiel nehmen wir den seit 2018 zum Einsatz kommenden SBB RABe 502 (aka FV-Dosto, TWINDEXX Express) von Bombardier; hier haben wir es mit einer Leermasse von 453 Tonnen, einer Länge von 200 m und 606 Plätzen in Doppelstockwagen zu tun (50). Bei einer Komplettauslastung des Zuges werden somit rund 750 kg Zuggewicht pro Passagier bewegt, was besser wäre als bei einem deutschen ICE 3. Berücksichtigt man jedoch die durchschnittliche Sitzplatz-Auslastung der SBB von 2019 in Höhe von lediglich 28,9 % (51), muss das Zuggewicht auf nur 175 Reisende verteilt werden, so dass fast 2,6 Tonnen Zuggewicht für jeden Passagier bewegt werden müssen. Die Pünktlichkeit der Schweizer Züge ist sicherlich vorbildlich, die für den Energieverbrauch entscheidende mechanische Bewegungseffizienz aufgrund dieser Zahlen definitiv nicht.

Auch im Nahverkehr der Bahn in Deutschland sind die Verhältnisse zwischen Nutzlast und zu bewegender Gesamtmasse nicht besser. Dort häufig eingesetzte Züge haben Leermassen zwischen 120 t und 168 t (52). Stellt man die von der Bahn angegebenen Zahlen über gefahrene Zugkilometer, geleistete Personenkilometer sowie Sitzplätze in den Zügen in Relation, ergibt sich beispielsweise für den RE8 (RB27) zwischen Koblenz und Mönchengladbach eine Auslastung von durchschnittlich 44 %–53 % auf dem Teil der Strecke, der zum Nahverkehr Rheinland in Nordrhein–Westfalen gehört (53). (Für die Auslastung auf dem Streckenabschnitt in Rheinland–Pfalz liegen keine Zahlen vor; sie muss als geringer angenommen werden, da es sich um ein deutlich weniger dicht besiedeltes Gebiet handelt.) Selbst bei der zuvor genannten Durchschnitts-Auslastung ergeben sich Zuggewichte von deutlich mehr als 1 t pro Passagier (52). Da gerade im Regional- und Nahverkehr die Zugauslastung sehr stark von den Tageszeiten abhängt, gibt es für vier bis fünf Stunden täglich höhere Auslastungen, über rund 10 Stunden am Tag werden aber häufig nur 20 oder 30 Fahrgäste in Zügen mit weit mehr als 100 t Leergewicht transportiert.

Wie sieht es mit dem Gewicht im Flugzeug aus? Der bereits zuvor erwähnte Airbus A321 hat ein Leergewicht von 47,5 Tonnen; verteilt auf die 200 Plätze und die durchschnittliche Auslastung von rund 82 % (54) fliegen hier „nur“ 290 kg Flugzeuggewicht für jeden Passagier mit.

Bei Flugzeug und Auto ist noch zu berücksichtigen, dass auch die Antriebsenergie in Form von Kraftstoff komplett innerhalb des Verkehrsmittels mitzuführen ist. Da Flugzeuge im innerdeutschen Verkehr nicht nach jedem kurzen Flug aufgetankt werden, unterstellen wir, dass die Tanks durchschnittlich zur Hälfte gefüllt sind, was bei einem Tankvolumen des A321 von 23.700 l und einem Kerosingewicht von 0,785 kg/l (24) einem Gewicht von etwa 57 kg Kerosin pro Passagier entspricht. Beim KFZ machen wir die gleichen Annahmen; 60 l Tank, zur Hälfte gefüllt, ergibt einen Wert von durchschnittlich 17 kg Kraftstoff, der pro Person mitgeführt wird. Unterstellen wir weiterhin, dass eine Person inkl. Gepäck unabhängig vom Verkehrsmittel 100 kg „Nutzlast“ auf die Waage bringt, so haben wir folgende durchschnittlichen Gesamtmassen zu bewegen: KFZ: 1.117 kg/Person; ICE 3: 1.800 kg/Person; Airbus A321: 447 kg/Person.

Bereits diese Zahlen zeigen, welche Unterschiede es in der Bewegungseffizienz der Verkehrssysteme gibt, denn die zu bewegende Gesamtmasse ist eine der entscheidenden Größen bei den weiteren Berechnungen.

4.1 Beschleunigung

Betrachten wir zunächst die für die Beschleunigung notwendige Energie, die durch die Masse und die Endgeschwindigkeit bestimmt wird, wobei der Energiebedarf quadratisch mit der zu erreichenden Geschwindigkeit steigt.

Die pro Person zu beschleunigende Gesamtmasse haben wir zuvor bereits bestimmt, sodass wir daraus die notwendige Beschleunigungsenergie für eine Person unmittelbar ableiten können.

Auto: 1.117 kg auf 36,1 m/sec (130 km/h)
beschleunigen → 728 kJ (Kilojoule)

Zug: 1.800 kg auf 69,4 m/sec (250 km/h)
beschleunigen → 4.340 kJ

Flugzeug: 447 kg auf 246 m/sec (0,8 Mach)
beschleunigen → 13.525 kJ

Betrachtet man also einen einzigen Beschleunigungsvorgang, so ist dieser im Vergleich für das Flugzeug aufgrund der hohen Endgeschwindigkeit trotz der deutlich niedrigeren Masse rund drei Mal so energieintensiv wie bei einem Zug und 18-mal so energieintensiv wie bei einem PKW. Doch sind unsere Überlegungen zur Beschleunigung an dieser Stelle noch nicht abgeschlossen!

Ein Flugzeug beschleunigt in der Regel einmal beim Start, bis es seine Reisegeschwindigkeit auf Reiseflughöhe erreicht hat, danach muss dann bis zur Landung nur noch der Luftwiderstand überwunden werden. Sowohl für Autos wie für Züge gilt hingegen, dass sie eine Vielzahl von Beschleunigungsvorgängen im Laufe eines Transportvorgangs durchführen müssen, da sie zwischendurch immer wieder die Geschwindigkeit reduzieren müssen; bei Stopps an Ampeln oder Bahnhöfen sogar bis zur Geschwindigkeit 0 km/h.

Reist eine Person mit dem ICE von Hamburg nach München, so hat der durchgehende ICE der schnellsten Verbindung 8 Zwischenhalte, es sind also mindestens neun Beschleunigungsvorgänge aus dem Stand notwendig. Zwischen den ersten beiden Halten in Hamburg wird der Zug nicht auf über 200 km/h beschleunigen, andererseits ist es im Gegensatz zum Flugzeug nicht so, dass der Zug zwischen zwei Halten dauerhaft mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit von 250 km/h unterwegs ist. Vielmehr gibt es immer wieder Streckenabschnitte, bei denen langsamer gefahren werden muss, so dass sich viele weitere Beschleunigungsphasen ergeben. Da bei der Beschleunigung die Endgeschwindigkeit quadratisch in den Energiebedarf eingeht, ist eine Beschleunigung von 120 km/h auf 200 km/h mit einer Masse von 1.800 kg mit 1.777 kJ oder von 200 km/h auf 270 km/h (2.285 kJ) sehr viel energieintensiver als eine Beschleunigung von 0 auf 120 km/h (1.000 kJ). Unterstellen wir, dass der Zug bis zum ersten Halt einmal auf 120 km/h beschleunigt, danach zwischen jedem Halt einmal auf 250 km/h und zwischen zwei Halten zwei Mal von 200 auf 250 km/h, so summiert sich die für diese Beschleunigungsvorgänge notwendige Energiemenge pro

Passagier auf 60.728 kJ. Selbst bei dieser stark vereinfachten Rechnung, die dem komplexen Bewegungsprofil einer Zugfahrt nur annäherungsweise gerecht wird, ist das bereits das 4,5-fache der Beschleunigungsenergie, die für einen Passagier beim Flug benötigt wird, weil dort eine sehr viel geringere Masse nur einmal beschleunigt werden muss.

Auch im Regionalverkehr der Bahn zeigt sich bei der energetischen Betrachtung der Beschleunigungsvorgänge dieses grundsätzliche Defizit, das Bahnfahren mit häufigem Anhalten und danach erneut notwendigem Beschleunigen kennzeichnet. Auf der zuvor bereits erwähnten, nur knapp 150 km langen Strecke des RE8 (RB27) hält der RE 30 Mal, die RB 33 Mal; es sind also alle 4,5 bis 5 km sehr energieintensive Beschleunigungen von 0 auf 140 km/h notwendig. Unterstellen wir lediglich ein Zuggewicht von 1 t pro Passagier, sodass als Gesamtmasse 1.100 kg zu veranschlagen sind, erfordern 30 Beschleunigungsvorgänge von 0 auf 140 km/h eine Gesamtenergie von fast 25.000 kJ, weit mehr als das Doppelte, was als Beschleunigungsenergie für einen Passagier im A321 vom Start bis zum Erreichen der Reisegeschwindigkeit von 875 km/h aufzuwenden ist. Fährt der Zug außerhalb der Stoßzeiten, sodass die zu bewegende Zug-Masse 3 t für jeden Passagier ausmacht, erhöht sich dieser Wert auf mehr als 70.000 kJ.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass für eine abschließende energetische Bewertung der gesamten Zugfahrt auch berücksichtigt werden muss, dass moderne Elektrolokomotiven (und auch elektrisch betriebene und Hybrid-PKW) beim Bremsen Energie zurück in das Stromnetz (bzw. die Batterie) einspeisen (rekuperieren) können. Im Verhältnis zur notwendigen Gesamtenergie ist dies jedoch nur ein Bruchteil dessen, was für die Vielzahl an Beschleunigungsvorgängen notwendig ist. Für die in dieser Studie dargestellten Zahlen, deren detaillierte Berechnungen im Anhang aufgeführt sind, wurden die von der Bahn publizierten verbrauchten Energiemengen verwendet, bei denen die durch Rekuperation zurückgewonnene Energie bereits berücksichtigt ist.

Für das Verkehrssystem Straße werden auf unserer Beispielsecke von Hamburg nach München Hunderte größere und kleinere Beschleunigungsvorgänge mit anschließenden Verzögerungen (bremsen) erfolgen; der exakte Energiebedarf hierfür ließe sich nur mit einer kontinuierlichen Messung während der Fahrt ermitteln. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden folgende vereinfachte Annahmen unterstellt: Es finden 10 Beschleunigungsvorgänge von 0 auf 50 km/h statt, zudem 3 Beschleunigungen von 0 auf 130 km/h (nach Pausen) und insgesamt 50 Mal muss von 90 auf 130 km/h beschleunigt werden. In Summe ergibt dies für das angenommene Gesamtgewicht von 1.117 kg einen Energiebedarf von 22.214 kJ pro Person.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass ein Transportvorgang umso energieeffizienter ist, je gleichförmiger die Bewegung erfolgt. Im Idealfall gibt es einen Beschleunigungsvorgang und danach eine gleichbleibende Geschwindigkeit bis zum Verzögerungsvorgang am Ziel.

4.2 Geschwindigkeit und Luftwiderstand

Nun zum Aspekt der Geschwindigkeit. Bei konstanter Geschwindigkeit ist Energie für die Fortbewegung nur notwendig, um den Luftwiderstand (bei Flugzeug, Auto und Zug) sowie den Fahrwiderstand (Roll- und Reibungswiderstände bei Auto und Zug auf der Straße bzw. Schienen, Widerstand bei Kurvenfahrten auf Schienen, etc.) zu überwinden.

Die Kraft, die notwendig ist, um den Luftwiderstand zu überwinden, bestimmt sich aus der Luftdichte, dem „Widerstandsbeiwert c_w “, der „(Stirn-)Fläche“ sowie der Geschwindigkeit. Die Luftdichte (in kg/m^3) ist abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchte; der „ c_w -Wert“ (auch Strömungswiderstandskoeffizient) liegt bei modernen PKW zwischen 0,25 und 0,4, bei SUVs und Geländewagen mitunter auch deutlich darüber. Moderne Flugzeuge liegen in der Regel bei 0,08. Bei einem Zug ist dieser Wert von der Gesamtlänge abhängig, der erste Wagen eines ICE bzw. die Lokomotive und der letzte Wagen sind mit je rund 0,2–0,25 zu berücksichtigen, die Wagen dazwischen mit je 0,1.

Auch hier lässt die Geschwindigkeit den Luftwiderstand und damit die benötigte Energie zur Überwindung desselben quadratisch ansteigen, die Luftdichte nimmt dagegen mit zunehmender Höhe etwa logarithmisch ab. Zudem gilt, dass bei Geschwindigkeiten von mehr 80 km/h der Luftwiderstand gegenüber dem Fahrwiderstand die entscheidende Größe darstellt, weswegen Fahrwiderstände im weiteren Verlauf ignoriert werden. Bei Zügen ist noch zu beachten, dass die Durchfahrt durch Tunnel zu erheblich höheren Luftwiderständen führt, da die Luft nicht wie auf freier Strecke zur Seite entweichen kann, sondern vielmehr wie ein immer schwerer werdender Kolben vor dem Zug hergeschoben werden muss. Der Luftwiderstand kann bei schnellen Fahrten durch lange und enge Tunnel doppelt so hoch werden wie bei einer Fahrt mit gleicher Geschwindigkeit auf freier Strecke.

Nachfolgend drei pauschalierte und vereinfachte Rechnungen zur notwendigen Energie, die zur Überwindung des Luftwiderstands für eine Transportleistung von einem PKM notwendig ist.

Für die Zugfahrt wird unterstellt, dass ein ICE 3 mit einem Gesamt- c_w -Wert von 1,1, einer Geschwindigkeit von 250 km/h (69,4 m/s) und in einer Luftdichte von $1,225 \text{ kg/m}^3$ unterwegs ist. Zur Überwindung der sich aus diesen Zahlen errechnenden Luftwiderstandskraft von rund 35 kN (Kilo Newton) über eine Entfernung von 1.000 m wird eine Energie von 35 MJ benötigt. Wenn, wie bei der durchschnittlichen Auslastung der Bahn rund 55 % der gut 400 Plätze in diesem Zug besetzt sind, ergibt dies etwa 156 kJ pro PKM; die zur Überwindung des Luftwiderstands für jeden Passagier notwendig sind.

Für die Fahrt mit dem Auto wird eine Geschwindigkeit von 130 km/h (36,1 m/sec), ein c_w -Wert von 0,3 sowie eine Stirnfläche von 3 m^2 unterstellt. Die Luftdichte ist die gleiche wie bei der Zugfahrt, so dass für eine Strecke von 1 km 703 kJ Energie notwendig sind, um den Luftwiderstand zu überwinden. Im Auto sitzen im statistischen Mittel 1,5 Personen,

sodass sich ein Wert von 469 kJ/PKM ergibt. Ist das gleiche Fahrzeug mit 180 km/h unterwegs, liegt der Wert bei 919 kJ/PKM. Die nur um 38 % erhöhte Geschwindigkeit erfordert 96 % mehr Energie zur Überwindung des Luftwiderstands.

Für die Reise im Flugzeug (A 321) legen wir die Geschwindigkeit von 0,8 Mach zugrunde, das sind in einer Reiseflughöhe von 9 km rund 243 m/s. Die Luftdichte beträgt gemäß der „internationalen Standard-Atmosphäre“ in dieser Höhe $0,466 \text{ kg/m}^3$ (55), die Flügelfläche, die bei einem Flugzeug an Stelle der Stirnfläche die relevante Größe ist, liegt bei 122 m^2 (24), (25), der c_w -Wert ist 0,08. Für das gesamte Flugzeug ergibt sich damit eine Luftwiderstandskraft von 134,3 kN, auf 1.000 m und die durchschnittliche Auslastung gerechnet ergibt sich ein Wert von 819 kJ/PKM.

4.3 Hubarbeit

Neben der Energie, die zur Beschleunigung einer Masse und zur Überwindung der Luft- und Fahrtwiderstände während des Bewegungsverlaufs notwendig sind, fließt als weitere entscheidende Größe für die energetische Effizienz die Energiemenge ein, die notwendig ist, um „Hubarbeit“ zu leisten, also die Schwerkraft zu überwinden. Die zu leistende Hubarbeit ist von der Gewichtskraft der Masse und der Höhe abhängig, die Gewichtskraft ist die Masse in kg multipliziert mit der Gravitationskonstante ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Wird eine Masse von 1 kg um 1 Meter angehoben, ist hierfür eine Energie von 9,81 kJ notwendig. Wird erneut die zu transportierende Gesamtmasse von 447 kg pro Passagier im Flugzeug angenommen, und unterstellt, dass der Flug in einer Reiseflughöhe von 9.000 m stattfindet, so bestimmt sich die notwendige Energie für die zu leistende Hubarbeit auf 39.466 kJ. (Die Tatsache, dass die Gravitationskonstante mit steigender Höhe geringfügig abnimmt, haben wir der Einfachheit halber ignoriert.)

Für ein Flugzeug, das vom Boden abhebt, ist die Notwendigkeit der Verrichtung von Hubarbeit für jedermann offensichtlich. Sehr viel weniger offensichtlich ist dies für den Straßen- und Schienenverkehr, weshalb dieser Sachverhalt in vielen laienhaft geführten Diskussionen schlicht ignoriert wird. Hubarbeit wird an jeder Steigung fällig, die das Fahrzeug hinaufführt. Es hilft auch wenig, wenn nach einigen Hundert Metern Steigung im Anschluss wieder ein Gefälle kommt, bei dem aufgrund der Schwerkraft dann weniger Energie aufgewendet werden muss, um bergab zu fahren. Wenn danach wieder eine Steigung kommt, muss erneut Hubarbeit geleistet werden. Relevant ist die Summe aller Steigungen einer Strecke, unabhängig davon, ob und ggf. welchen Höhenunterschied es zwischen Start und Ziel gibt. Der Unterschied zwischen einem landgebundenen Verkehrsmittel und einem Flugzeug in puncto Hubarbeit ist lediglich der, dass beim Flugzeug die gesamte Hubarbeit während des Steigfluges zu Beginn des Fluges anfällt, während bei Bahn und KFZ viele kleine Stücke aufzusummieren sind. Entsprechend ist der Sinkflug vor der Landung am Ende des Fluges der zusammenhängende Teil, bei dem das Flugzeug aus energetischer Sicht von der

Schwerkraft profitiert; bei Auto und Zug sind dies alle Streckenabschnitte, bei denen es bergab geht.

Um die Hubarbeit für eine Fahrstrecke bestimmen zu können, bedarf es eines exakten Höhenprofils der Strecke, ähnlich der Profile, die von Radrennen bekannt sind. Dank Google Earth kann ein solches Höhenprofil aber für jede beliebige Strecke erstellt werden, für die eine Navigation verfügbar ist. *Abb. 2* im Anhang (Abschnitt 9.1.2) zeigt die kürzeste Fahrstrecke von Hamburg nach München inkl. Höhenprofil; insgesamt wird ein Höhenunterschied von 5.769 Metern ausgewiesen. Da das Vorhandensein von Talbrücken die Hubarbeit verringert (die Täler müssen nicht durchfahren werden), reduzieren wir den im Höhenprofil ausgewiesenen zu bewältigenden Höhenunterschied pauschal um 20 % auf 4.615 m. Mit dem angenommenen durchschnittlichen Gesamtgewicht von 1.117 kg ergibt sich für die Fahrt mit dem PKW eine Energiemenge von 50.570 kJ pro Person zur Bewältigung der Hubarbeit auf der gesamten Strecke.

Leider gibt es keine allgemein verfügbare Quelle mit den exakten Höhenprofilen für Bahnstrecken. Grundsätzlich haben sie aber geringere Steigungen und Gefälle als Straßen, weswegen eine größere Anzahl an Tunnel und Talbrücken notwendig ist. Vor diesem Hintergrund wird unterstellt, dass die Bahnstrecke in Summe nur die Hälfte des Höhenunterschieds der Straßenverkehrsstrecke hat, womit sich die Energie für die zu leistende Hubarbeit unter Zugrundlegung der 1.800 kg Gesamtgewicht auf 40.746 kJ pro Passagier berechnen lässt. Es zeigt sich, dass das im Verhältnis zur Nutzlast sehr hohe zu bewegendes Gesamtgewicht bei PKW und vor allem bei Zügen dazu führt, dass der energetische Aufwand zum Überwinden der Schwerkraft größer ist als im Flugzeug, auch wenn die landgebundenen Verkehrsmittel niemals abheben.

Das Thema Hubarbeit spielt auch für unterirdische Bahnhöfe eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Wenn beispielsweise Stuttgart 21 einmal in Betrieb sein wird, muss bzgl. des benötigten Energieaufwandes berücksichtigt werden, dass für jeden Passagier, egal ob ankommend oder abfahrend, selbst für die durchfahrenden Fahrgäste eine zusätzlich „Hubarbeit“ für rund 30 m Höhendifferenz zu bewältigen sein wird. Reisende, die ankommen, müssen mit Aufzügen oder Rolltreppen „nach oben“ transportiert werden, abfahrende Passagiere müssen auf genau diese Weise „nach unten“ zum Bahnsteig und dann mitsamt Zuggewicht, wieder „nach oben“ gefahren werden. Bei mehr als 200.000 Fahrgästen am Tag sind dies erhebliche Mengen an zusätzlich notwendiger Energie, die nur aufgrund der unterirdischen Lage des Bahnhofs notwendig werden.

4.4 Kraftstoff und Elektrifizierung

Flugzeuge, KFZ und auch von Dieselloks gezogene Züge haben das Thema zu bewegendes Gesamtgewicht betreffend noch eine weitere Eigenschaft, die zunächst einmal einen gravierenden Nachteil darzustellen scheint. Diese Verkehrsmittel müssen die Energie, die sie antreibt, innerhalb ihres geschlossenen Systems mitführen; deshalb haben wir dies bei den Überlegungen zum zu bewegendem Gesamtgewicht berücksichtigt.

Elektrolokomotiven, auf dem Streckennetz der Bahnen in Deutschland weit verbreitet, müssen ihren „Treibstoff“ nicht mitführen, sie werden von der Oberleitung mit Energie versorgt. Ende 2017 waren in Deutschland knapp 54 % der Bahnstrecken elektrifiziert, knapp 21.000 km von gut 38.000 km (44). Doch auch die Stromversorgung eines Bahngleises muss zunächst einmal gebaut werden. In Abs. 3.1 wurde dieser Aspekt kurz erwähnt, hier soll er jetzt etwas ausführlicher betrachtet werden. Allein der Fahrdrabt aus Kupfer (120 mm² Querschnitt), der auf Bahnstrecken in Deutschland üblich ist, wiegt pro Kilometer etwa eine Tonne (56). Im Produktionsprozess von Kupfer fallen pro Tonne rund 3 t CO₂ an, die Weiterverarbeitung des reinen Metalls zu Drähten noch nicht eingerechnet. Der eigentliche Fahrdrabt sowie die diversen Halte- und Spannseile, die aus Kupfer, Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung) und Stahl bestehen, sowie die dazugehörigen Masten müssen hergestellt und gebaut werden, auch dafür werden Ressourcen benötigt. Für das notwendige Kupfer und die anderen verwendeten Metalle ist zu berücksichtigen, dass es in Deutschland keine nennenswerten Vorkommen davon gibt und der ökologische Fußabdruck beginnend mit den Erz-Minen in den Herkunftsländern, über die Verarbeitung zu Metall bis hin zur Herstellung der Drähte bzw. Seile zu berücksichtigen ist. Bei Zinn, dem Element, das neben Kupfer in Bronze enthalten ist, fallen rund 16 t CO₂ an, um eine Tonne des Reinmetalls zu gewinnen (57). Neben der mehr als 1 Tonne Kupfer für den Fahrdrabt kommen für Halteseile noch einmal mehrere Tonnen Metall pro km Bahngleis, und zusätzlich etliche Tonnen Beton und Stahl für die Masten und deren Fundamente hinzu. Auf der Beispielstrecke Köln–Frankfurt wurden allein 4.000 Oberleitungsmasten außerhalb der Tunnel gesetzt, in den Tunneln sind 1.600 „Hängesäulen“ verbaut. In Summe wurden für die 170 km lange Strecke rund 3.300 km Drähte, Seile und Kabel für die Elektrifizierung benötigt (29). Oberleitungsmasten wiegen je nach Länge und Material durchschnittlich zwischen 1,5 und 2 Tonnen pro Stück (58). Rechnet man die in den genannten Quellen angegebenen Zahlen und Daten zusammen, ergeben sich für die Elektrifizierung einer Strecke schon für die als Rohmaterial benötigten Mengen an Kupfer für die Fahrleitung, sowie Beton und Stahl für die Masten CO₂-Emissionen von mind. 20 Tonnen pro Kilometer. Der Stahl für die Halteseile der Fahrleitung, die Anker und auch die sog. „Kettengewichte“ an den Masten sind in dieser Überschlagsrechnung ebenso wenig berücksichtigt wie die durch die Bauarbeiten bei der Elektrifizierung entstehenden Emissionen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass in Deutschland für die elektrifizierten Bahnstrecken ein eigenes Energieversorgungsnetz von über 7.900 km Leitungslänge im Hintergrund betrieben wird (59). Dieses bahneigene Hochspannungsnetz (110 kV) hat eige-

ne Überlandmasten und Hunderte eigene Umformerwerke, Gleichrichter und Transformatoren, um den Bahnstrom auf die für den Bahnbetrieb notwendigen 15 kV und 16 2/3 Hz zu transformieren. Zusammenfassend gilt, dass der Sachverhalt, die Energie für einen elektrisch betriebenen Zug nicht im Tank mitführen zu müssen und diese Masse im Transport einzusparen, keineswegs „umsonst zu haben“ ist, sondern im Zusammenhang mit der stattdessen notwendigen Elektrifizierungs-Infrastruktur zu Tausenden Tonnen CO₂ bei der Erstellung führt. In der Gesamtbilanz ist dann noch zu berücksichtigen, dass auch diese Infrastruktur zu warten und gelegentlich zu erneuern ist (32).

4.5 CO₂-Belastung durch die Antriebsenergie

Natürlich gilt es jetzt auch zu betrachten, wieviel CO₂ durch die eigentliche Verbrennung des Kraftstoffes bzw. bei der Erzeugung des Stroms für die Fortbewegung des Verkehrsmittels entsteht. Hier ist zunächst einmal wichtig, dass bei Kraftstoffen nicht kg und Liter (l) vermischt werden, was in der öffentlichen Diskussion immer wieder zu beobachten ist. Da Kohlenwasserstoffe leichter als Wasser sind, entspricht 1 l Benzin rund 0,75 kg, bei Kerosin sind es rund 0,785 kg und bei Dieselmotoren etwa 0,83 kg. Jeweils 1 kg dieser Kohlenwasserstoffe verbrennt zu 3,1–3,2 kg CO₂, im Weiteren wird ein Wert von 3,15 kg CO₂ für jeweils 1 kg verbrannten Kraftstoff zugrunde gelegt (60). Wessen KFZ also z.B. 8 l Benzin (6 kg)/100 km verbraucht, produziert 189 g CO₂ pro km; bei einem KFZ, das mit 5 l Diesel/100 km auskommt, sind es analog 131 g/km. Der BUND gibt den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß deutscher PKW für 2017 mit 128 g pro km an; mit der durchschnittlichen Auslastung von 1,5 Personen ergibt dies 85 g CO₂/PKM (61). Ähnliche Werte ergeben sich, wenn der Kraftstoffverbrauch moderner Mittelklassewagen ins Verhältnis zur erbrachten Verkehrsleistung gesetzt wird. Die oftmals deutlich niedrigeren Werte der Automobilprospekte sind den niedrigeren Verbräuchen geschuldet, die fast ausschließlich in normierten Fahrzyklen erreicht werden, die nicht der Realität entsprechen.

Bei Kraftstoffen aus Raffinerien ist noch zu berücksichtigen, dass sie zunächst aus Rohöl raffiniert, von den Raffinerien zu großen Tanklagern und von dort bis zu den Tankstellen transportiert werden müssen. Auch das geht nicht ohne Energie und damit verbundenen Schadstoffausstoß, die in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden müssen. Für den KFZ-Bereich werden hierfür häufig 10 % der Emissionen zusätzlich veranschlagt, die in den hier gerechneten Beispielen nicht berücksichtigt sind.

Im Flugverkehr lag der Verbrauch aller deutscher Fluggesellschaften 2018 bei 3,55 l/100 PKM durchschnittlich (62), das entspricht 90 g CO₂/PKM⁵.

Beim Strom belieben sich unter Berücksichtigung des in Deutschland üblichen Strommix und des Inlandsverbrauches im Jahr 2016 die CO₂-Emissionen auf 0,572 kg/kWh, 2017 waren es 0,534 kg/kWh und 2018 dann nach vorläufigen Berechnungen 0,518 kg/kWh. Diese, offiziell vom Umweltbundesamt veröffentlichten Zahlen werden in dieser Untersuchung grundsätzlich für alle CO₂-Berechnungen zum Stromverbrauch zugrunde gelegt (63), (64). So ist es schlicht unzulässig zu behaupten, die Bahn fahre im Fernverkehr ausschließlich mit Ökostrom und damit emissionsfrei (65) (66), denn auch bei Windstille im Winter fahren elektrisch betriebene Züge mit bis zu 300 km/h durch die Landschaft, wobei der Strom dann weder aus Windrädern noch aus Solaranlagen kommen kann⁶. Ebenso werden auch Elektrofahrzeuge nachts aufgeladen, wenn Solarstrom auch aus den eigenen, auf dem Dach montierten Solarzellen definitiv nicht zur Verfügung steht. Für einen fairen Vergleich muss stets die Schadstoffbilanz des insgesamt in einem Land verfügbaren Strommix betrachtet werden. Strom ist weder grün noch blau noch schwarz, Strom sind Elektronen, die durch einen Leiter fließen, ohne „Bewusstsein“ durch welche Primärenergie sie ursprünglich angeregt wurden.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass entgegen weit verbreiteter anders lautender Stimmen, auch Strom aus Kernkraftwerken oder aus Wind- und Solarenergie niemals CO₂-frei ist und es auch auf absehbare Zeit nicht sein wird. Sowohl Kraftwerke wie auch Solarzellen und Windräder müssen industriell gefertigt, transportiert, aufgebaut, in Betrieb genommen und dann betrieben werden, gleiches gilt für jegliche Infrastruktur zum Verteilen des Stroms bis zu den Verbraucherinnen und Verbrauchern. Strom lässt sich auch niemals verlustfrei transportieren, transformieren oder von Gleichstrom in Wechselstrom bzw. umgekehrt umwandeln. Dem Gedanken einer ganzheitlichen Ursache- und Wirkungsbetrachtung entsprechend muss dies alles ebenso in die Rechnung mit eingehen, wie beispielsweise die zuvor bereits erwähnten Raffinerie- und Verteilkosten für die Produktion von Kraftstoffen. Bereits bei Betrachtung nur der in einem Windrad verbauten Materialien sowie des Fundaments aus Stahlbeton, das für die Aufstellung erforderlich ist (67), wird schnell deutlich, dass es schlicht falsch ist, dass Wind- oder Solarenergie als „Zero-Emission“ Energie bezeichnet wird, auch wenn es inzwischen in der Werbung für Elektro-PKW gerne behauptet wird.

Die zuvor genannten CO₂-Mengen, die bei der Stromerzeugung entstehen, müssen also bei elektrisch betriebenen Zügen bzw. Elektroautos berücksichtigt werden. Ein ICE 3 hat

5 Bei den Diskussionen um THG-Emissionen im Luftverkehr fließt in der öffentlichen Diskussion häufig auch der sog. RFI (Radiative Forcing Index) in die Berechnung mit ein (83), (84). Hierzu ist festzuhalten, dass einer der „geistigen Väter“ des RFI, ein international angesehener Atmosphärenphysiker, sich von der weit verbreiteten „Anwendung des RFI“ vollständig distanziert und diese schlicht als „unsinnig“ und „missbräuchlich angewendet“ bezeichnet (80). Zudem wurden bei Berechnungen des RFI sämtliche Emissionen der Luftfahrt mit einbezogen, ohne dabei zwischen ziviler und militärischer Luftfahrt zu trennen. Das wäre ungefähr so, als wenn man in die Emissionen des Straßenverkehrs eines Landes die durch die jeweiligen Landstreitkräfte verursachten Emissionen einbeziehe. Führende Atmosphärenphysiker und Klimaexperten haben zwischenzeitlich mit dem ERF (Effective Radiative Forcing) eine Kenngröße entwickelt, die die Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Erderwärmung dem aktuellen Stand der Forschung entsprechend beschreibt (88).

6 Die Behauptung der Bahn, sie fahre im Fernverkehr zu 100 % mit „Ökostrom“ und damit CO₂-frei, wird damit begründet, dass sie in Summe so viel regenerativ erzeugten Strom einkauft, wie sie im Fernverkehr verbraucht. Dabei wird schlicht ignoriert, dass dieser Strom weder komplett ohne CO₂-Emissionen erzeugt werden kann und vor allem in der erforderlichen Menge nicht immer zur Verfügung steht. Ein ICE, der von Frankfurt nach Paris unterwegs ist, wird während seiner Fahrt spätestens in Frankreich auch mit Strom aus Kernenergie angetrieben, weil in Frankreich Strom aus Kernkraftwerken ins Netz eingespeist wird.

eine Dauerleistung von 8.000 kW; die wird zwar im Betrieb nicht immer vollständig abgerufen werden, aber wenn der Zug mit einer Leistung von 60 %–65 % über einen Zeitraum von einer Stunde fährt (ungefähr die Fahrtzeit zwischen Köln und Frankfurt), so kommen 5.000 kWh auf die Rechnung, die 2,6 t CO₂ entsprechen. Etwas genauer lässt sich die CO₂-Belastung pro PKM für Bahnfahrten in Deutschland aus folgenden Daten ermitteln: Die Bahn selbst gibt die Gesamt-Traktionsenergie für 2017 mit 10.190 GWh zzgl. 436 Mio. Liter Dieselmotoren an (21); für 2019 waren es 9.552 GWh und 410,6 Mio. l Diesel (49). Auf den Fernverkehr fielen davon 32,8 % des Stroms und 2,5 % des Diesels. Für den Nah- und Regionalverkehr waren es 43,2 % des Stroms sowie 76,1 % des Dieselmotoren, die übrigen Strom- und Dieselmengen entfielen auf den Güterverkehr (46). Für den Fernverkehr ergibt sich aus diesen Zahlen eine CO₂-Belastung von 45 g/PKM im Jahr 2017, für 2019 waren es 37 g/PKM, im Regio-Verkehr waren es 77 g/PKM 2017 und 71 g/PKM 2019. Alle diesbezüglichen Angaben der Bahn beziehen sich auf Netto-Strommengen, die zuvor bereits erwähnten Leitungs- und Umwandlungsverluste sowie die bei Bau und Wartung der elektrischen Infrastruktur entstehenden Emissionen sind unberücksichtigt. Sämtliche Detailberechnungen für die hier aufgeführten Zahlen befinden sich im Anhang.

Es sei an dieser Stelle auch erwähnt, dass Vergleiche von Schadstoffemissionen verschiedener Verkehrssysteme insbesondere dann sehr schwierig sind, wenn einzelne Verkehrsmittel durch Verbrennungsmotoren, andere durch Strom angetrieben werden. Hier gibt es seit Jahren sehr ideologiegetriebene Diskussionen, in denen sich die Anhänger verschiedener Lager gegenseitig beschuldigen, das jeweils favorisierte Verkehrsmittel schön zu rechnen und andere Verkehrsmittel schlechter aussehen zu lassen als sie es tatsächlich sind. Beispiele hierfür finden sich in (68) (Fliegen vs. Bahnfahrten) und (64), (69), (Diesel-PKW vs. Elektro-PKW). Gerade die zuletzt referenzierte Studie hat eine Flut von Stellungnahmen, Gegendarstellungen, Er widerungen der Gegendarstellungen, Meta-Berichte über diese Studie und daraus resultierende Kommentare und Gegenberichte, etc. ausgelöst, die einer sachlichen Diskussion nicht dienlich waren. Ein fairer und ganzheitlicher Vergleich muss ausschließlich anhand konkreter Zahlen, Daten und Fakten erfolgen, die Argumentation sollte sich plausibel aus wertfrei ermittelten Sachverhalten ergeben.

4.6 Luftlinie oder landgebundene Entfernung

Was bei einem Vergleich verschiedener Verkehrssysteme bzgl. der Bewegungseffizienz auch noch zu berücksichtigen ist, sind die tatsächlichen Entfernungen, die zwischen zwei Orten liegen. Bei landgebundenen Verkehrsmitteln wie Bahn und Straße sind zum Teil erheblich längere Strecken zurückzulegen als im Flugzeug. Für drei typische Strecken in Deutschland, Frankfurt – München, München – Hamburg oder Berlin – München fallen beispielsweise bei Bahn- und Autofahrten zwischen 35 % und 43 % mehr Kilometer an als die Luftlinienentfernung zwischen den jeweiligen Orten. Korrekterweise sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch im Luftverkehr nicht immer die kürzeste Luftlinienentfernung zwischen zwei Flughäfen veranschlagt werden darf. Vorgeschriebene An- und Abflugrouten sowie die Notwendigkeit zur Staffelung des Flugverkehrs und auch wetterbedingte Routenführungen können zur Folge haben, dass Umwege von bis zu 20 % der kürzesten Strecke geflogen werden müssen. Doch auch dann ist immer noch davon auszugehen, dass die tatsächliche zurückzulegende Strecke kürzer ist als die eines landgebundenen Verkehrsmittels. Da die Schadstoffvergleiche in dieser Studie vielfach und wo immer möglich auf PKM bezogen sind, sind beispielsweise 600 km Luftlinie selbst dann 800 km landgebundener Strecke vorzuziehen, wenn die Gesamt-CO₂-Belastung pro PKM auf der Luftlinienstrecke um 30 % höher ist.

Für den Straßenverkehr haben wir in diesem Kontext unterstellt, dass primär das Fernstraßennetz in Deutschland genutzt wird; bei Verwendung von Nebenstraßen und bei Fahrten durch Tschechien auf der Strecke München – Berlin können die Fahrstrecken kürzer sein, die berechnete Fahrt-dauer verkürzt sich dadurch aber nicht.

5. Tabellarische Übersicht

In *Tabelle 3* sind die bisherigen Überlegungen in einer Übersicht zusammengefasst. Hierbei ist zu beachten, dass die Farbcodierung in der Tabelle lediglich eine qualitative und keine quantitative Aussagekraft hat. Die Farbcodierungen geben Aufschluss darüber, wie das Verkehrssystem, bezogen auf das in der ersten Spalte angegebene Kriterium, relativ zu den anderen Systemen einzuordnen ist. Mittels der jeweiligen Transportleistung des Verkehrssystems (*siehe Tabelle 2*) können einzelne Aussagen bezogen auf PKM gemacht werden.

Die endgültige CO₂-Bilanz eines Verkehrssystems lässt sich nicht durch das Zählen der grünen, gelben oder roten Felder ermitteln. Zudem ist zwingend erforderlich, die nummerierten Erläuterungen zur Kenntnis zu nehmen, die nachfolgend aufgeführt sind.

Tabelle 3: Qualitative Aussagen zur ökologischen Einordnung der Komponenten verschiedener Verkehrssysteme

	Schieneverkehr	Straßenverkehr	Luftfahrt
Verkehrsmittel	Zug	PKW	Flugzeug
CO ₂ aus Antrieb	37-71 g/PKM	85 g/PKM	90 g/PKM
Auslastung der Verkehrsmittel (Durchschnittswerte)	55,5%	30%	81,4%
CO ₂ aus Bau u. Wartung	Weniger als bei PKW, mehr als bei Flugzeug	33 g/PKM	Weniger als bei Zug und PKW
Wege-Infrastruktur			
CO ₂ aus Bau u. Wartung	Streckenabhängig (1)	Streckenabhängig (2)	0 nicht notwendig
Knotenpunkt-Infrastruktur	Aufgrund fehlender umfangreicherer Daten keine allgemeingültige Aussage möglich. (3)		
Steuerungs-Infrastruktur	Aufgrund fehlender umfangreicherer Daten keine allgemeingültige Aussage möglich. (4)		
Sonstige Aspekte	(5)		
Transporteffizienz: zu bewegende Masse des Verkehrsmittels pro Person	1,7 t (ICE 3, durchschnittliche Auslastung)	1 t (Durchschnitts-PKW mit 1,5 Personen Auslastung)	0,3 – 0,5t (abhängig vom Flugzeugtyp, durchschnittliche Auslastung)
Mechanische Bewegungseffizienz	Viele Beschleunigungsvorgänge wg. Bahnhöfen unterwegs	Vielzahl verkehrsabhängiger Beschleunigungsvorgänge	Beschleunigung beim Start, anschließend weitgehend gleichförmig
Zurückzulegende Entfernung	Bahnstrecken-orientiert	Straßen-orientiert	Luftlinien-orientiert

(1) Die kompletten THG-Emissionen der gesamten Wege-Infrastruktur für die Bahn lassen sich im Nachhinein nicht abschätzen. Aufgrund der eingesetzten Materialien (Stahl, Beton, Kupfer, etc.) fallen hier für jeden Streckenkilometer allein CO₂-Emissionen von mehreren Hundert Tonnen (nicht elektrifizierte Strecke ohne Brücken oder Tunnelbauwerke) bis hin zu zehntausenden Tonnen (Hochgeschwindigkeitsstrecken auf Brücken und in Tunnelbauwerken) an. Auch auf vielbefahrenen Strecken resultiert dies in CO₂-Belastungen im mittleren bis oberen zweistelligen Grammbereich pro PKM. Für einzelne Streckenabschnitte lassen sich grobe Abschätzungen vornehmen: Annahme: 3–4 Mio. t CO₂ bei Baumaßnahme Köln – Frankfurt entspricht rund 80–106 g/PKM bei 220 Mio. Fahrgästen und 35–47 g/PKM bei 500 Mio. Fahrgästen. 4 Mio. t CO₂ für das Bauwerk des Gotthard-Basistunnels umgelegt auf die aktuell etwa 4 Mio. Nutzer über 50 Jahre hochgerechnet, belastet jeden Nutzer mit 20 kg CO₂ pro Fahrt, was mehr als 350 g/PKM bedeutet. Notwendige Wartungsarbeiten und Reparaturen sowie Komplettsanierung nach entsprechender Nutzung sind dabei noch unberücksichtigt. Auch die Elektrifizierung einer Bahnstrecke ist mit mind. 20 t CO₂ für jeden Kilometer zu veranschlagen, was insbesondere bei wenig genutzten Nebenstrecken die Gesamtemissionen pro PKM in die Höhe treiben kann.

(2) Auch für die Wege-Infrastruktur des Verkehrssystems Straße lassen sich keine pauschalen und allgemeingültigen Aussagen aus Bau und Betrieb festlegen, weil die dafür erforderlichen Daten und Fakten im Nachhinein nicht zuverlässig zu ermitteln sind. Die vorhandenen Zahlen und Daten lassen den Schluss zu, dass aufgrund der 10-fachen Verkehrsleistung gegenüber dem Schienenverkehr und aufgrund der deutlich geringeren Anzahl von Tunnelbauten im bergigen Gelände, die CO₂-Belastung pro PKM deutlich geringer sein wird.

(3) Eine seriöse, allgemeingültige Aussage ist derzeit nicht möglich. Die gerechneten Beispiele zeigen jedoch, dass einzelne Baumaßnahmen (z.B. Stuttgart 21) sehr hohe CO₂-Emissionen zur Folge haben, die über Jahrzehnte hinweg die Gesamtbilanz des Verkehrssystems nachhaltig negativ beeinflussen.

(4) Eine seriöse, allgemeingültige Aussage ist derzeit nicht möglich. Die gerechneten Beispiele zeigen jedoch, dass die CO₂-Belastungen aus der Steuerungs-Infrastruktur im Verhältnis zu den anderen Infrastruktur-Komponenten eher vernachlässigbar sind.

(5) Das Verhältnis zwischen Nutzlast und zu bewegender Gesamtmasse ist bei Zügen und im PKW besonders ineffizient. Auch die Bewegungseffizienz des eigentlichen Transportvorgangs ist aufgrund der häufigen, zum Teil extremen Beschleunigungsvorgänge suboptimal. Was die zurückzulegende Entfernung zwischen zwei Orten angeht, sind die Verkehrssysteme Schiene und Straße auf die jeweilige Wege-Infrastruktur angewiesen. Da das Straßennetz insgesamt feinmaschiger ist als das Schienennetz, sind die notwendigen „Umwege“ im Straßenverkehr i.d.R. geringer als im Bahnverkehr. In der Luftfahrt fliegen die Flugzeuge bei Abflug und Ankunft auch innerhalb festgelegter Korridore, dazwischen orientieren sie sich je nach überflogenem Gebiet auch noch an „Luftstraßen“ und an der aktuellen Wetterlage, sodass sie der effizientesten möglichen Verbindung sehr viel näherkommen, als dies bei einem landgebundenen Verkehrsmittel der Fall ist.

6. Weitere ökologische Aspekte von Verkehrssystemen

Bisher sind wir in unseren Überlegungen fast ausschließlich auf die klimarelevanten Emissionen und der Einfachheit halber speziell auf CO₂ eingegangen. Selbstverständlich gilt es aber noch weitere ökologische Aspekte wie etwa Lärm oder Flächenbedarfe zu berücksichtigen. Diese Aspekte sind für eine Gesamtbetrachtung ebenfalls bedeutsam und auch bereits untersucht worden, aber nicht Teil dieser Studie.

Es gibt allerdings noch einen weiteren wichtigen Aspekt im Zusammenhang mit CO₂-Emissionen, der an dieser Stelle erläutert werden muss. Dieser steht in unmittelbarem Zusammenhang mit Innovation und technischem Fortschritt. Beispielsweise konnte in der Luftfahrt der durchschnittliche Verbrauch von 6,3 l Kerosin pro 100 PKM im Jahr 1990 auf 3,55 l im Jahr 2018 gesenkt werden (62); das entspricht einer Einsparung von 44 %, die sich 1 : 1 auf die CO₂-Emissionen überträgt, von 159 g/PKM auf 90 g/PKM.

Ähnliche Effizienzsteigerungen konnten bei Verbrennungsmotoren für PKW erreicht werden, wobei jedoch gleichzeitig ein Trend zu größeren und leistungsstärkeren Antrieben in den Fahrzeugen zu verzeichnen war, sodass die sich aus der Innovation ergebenden, möglichen positiven Umweltauswirkungen wieder zunichte gemacht wurden. 1995 betrug die durchschnittliche Leistung der in Deutschland zugelassenen Neuwagen 70 kW (95 PS), 2013 waren es bereits 101 kW (137 PS). Dann glaubte man einige Jahre, das Ende sei erreicht (70), doch 2019 hatte man nach erneut zehn Jahren mit Jahr für Jahr steigenden Motorisierungen einen Durchschnittswert von 116 kW (158 PS), (71), (72). Der gegenüber 1995 um 66 % gestiegenen durchschnittlichen Motorenleistung steht deshalb „nur“ eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der daraus resultierenden CO₂-Emissionen um 19 % gegenüber.

Ganz anders verhält es sich mit den CO₂-Emissionen, die beim Bau von Infrastrukturen entstehen. Diese fallen ausschließlich zum Zeitpunkt des Baus an. Die Baumaßnahme selbst wird oft mit der sehr langen Lebensdauer des Bauwerks begründet, über die sich der ökologische Aufwand amortisieren soll. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn sind dies, wie wir inzwischen wissen, 30 Jahre. Für die dem Verkehrssystem zuzurechnende CO₂-Belastung bedeutet dies aber, dass Innovation und Fortschritt Jahrzehnte lang keine Wirkung zeigen können. Ganz konkret fallen auch die in den 1990er Jahren beim Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Köln und Frankfurt entstandenen CO₂-Emissionen, die auch heute den Reisenden noch zugerechnet werden müssen, nach wie vor in dem Maße an, wie es Stand der Wissenschaft zum Zeitpunkt des Baus war. Alle in der Stahl- und Betonproduktion in den letzten 20 Jahren erzielten Verbesserungen und alle Innovationen bei Dieselmotoren von Baufahrzeugen (Katalysator, Partikelfilter, Verbrauchsreduzierung, etc.) bleiben für die zwi-

schon 1995 und 2002 gebaute Beispielstrecke zwischen Köln und Frankfurt ohne Wirkung, denn die bereits in die Umwelt ausgestoßenen Millionen Tonnen CO₂ werden ja nicht wieder eingefangen, nur weil es heute bessere Technologien gibt.

Dies ist ein sehr grundsätzlicher Nachteil bei langlebiger Infrastruktur; je größer der Anteil der Infrastruktur an den Gesamtemissionen des jeweiligen Verkehrssystem ist, desto schwieriger ist es, mittels Innovation und technologischen Fortschritt zur Reduktion der CO₂-Emissionen beizutragen.

Zudem werden die Emissionen von Verkehrssystemen häufig durch eine „lokale Brille“ betrachtet. Definitiv verbessern Elektro-Fahrzeuge die Luft dort, wo sie unterwegs sind; hier geht es jedoch nicht um CO₂, sondern um Stickoxid- (NO_x) und im Sommer um Ozon- (O₃) Belastungen. Der mit Strom betriebene Zug verursacht dort, wo er fährt, keinerlei Abgase. Bei CO₂ spielt es allerdings für das Klima überhaupt keine Rolle, wo das Treibhausgas entsteht. CO₂-Moleküle verursachen durchschnittlich 100 Jahre lang in der Atmosphäre einen Erwärmungseffekt, sie verteilen sich dabei unabhängig von ihrem Entstehungsort gleichmäßig in der Atmosphäre. Stammt der verbaute Stahl aus China oder Indien, hat ein dort im Hochofenprozess entstehendes CO₂-Molekül 100 Jahre lang den gleichen THG-Effekt auf das Klima wie ein CO₂-Molekül, das in Deutschland aus einem Auspuff kommt. Dieser Aspekt verdeutlicht einmal mehr, dass Klimaschutz nur weltweit funktionieren kann; es hilft nicht, lokale oder regionale „Lösungsansätze“ zu verfolgen, wenn dabei die CO₂-Emissionen nur „aus dem eigenen Blickfeld heraus“ verlagert werden.

7. Bewertung des Status quo, Potenziale und politische Steuerung

Auf der Basis der bisherigen Analysen und Ergebnisse ist nun die Frage zu stellen, welche konkreten Beiträge für den Klimaschutz die Verkehrssysteme zu leisten in der Lage sind. Dabei sollten nicht Verbote oder Verzichtsforderungen im Vordergrund stehen, sondern es gilt zu überlegen, mit welchen bereits vorhandenen bzw. aktuell in der Entwicklung befindlichen Technologien und Systemen die Mobilitätsanforderungen heute und in Zukunft bewältigt werden können.

7.1 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Schiene

Das Verkehrssystem Schiene gilt gemeinhin als das „umweltfreundlichste“ der drei betrachteten Systeme. Die bisherige Analyse zeigt sehr deutlich, dass dies nur bei der auf die reine Antriebsenergie reduzierten Sichtweise gilt. Entgegen weit verbreiteter Meinung ist auch der Antrieb weder bei Fern- noch bei Nahverkehrszügen CO₂-frei und wird dies auch auf absehbare Zeit nicht sein. Bei ganzheitlicher CO₂-Bilanzierung relativiert sich die Umweltfreundlichkeit der Bahn noch einmal erheblich; Bau und Erhalt der sehr aufwendigen Wege-Infrastruktur führen zu Hunderten Millionen Tonnen CO₂, die die Gesamtbilanz über Jahrzehnte hinweg negativ belasten. Hinzu kommt das schlechteste Verhältnis von Nutzlast im Verhältnis zur zu bewegenden Gesamtmasse sowie eine systembedingte Ineffizienz. Züge können nur auf dem vergleichsweise grobmaschigen Schienennetz unterwegs sein. Zudem müssen an jedem Bahnhof große Massen zum Stillstand gebracht und nach kurzem Halt wieder auf Reisegeschwindigkeit beschleunigt werden. Für einen Transportvorgang ist das aus physikalischer Sicht nicht effizient.

Vor dem Hintergrund, dass Bahntrassen auch in Zukunft primär aus Stahl für Schienen, Stahl und Beton für die feste Fahrbahn, Tunnel und Brücken, sowie Kupfer, Stahl und Beton für die Elektrifizierung gebaut werden, ergeben sich hieraus THG-Emissionen, die die antriebsbedingten Emissionen deutlich übertreffen können. Auch die Knotenpunkt-Infrastruktur trägt erheblich zu CO₂-Emissionen bei, auch wenn einzelne exemplarische Beispiele wie Stuttgart 21 nicht verallgemeinert werden sollten. Das häufig genannte Ziel, die Verkehrsleistung der Bahn zu verdoppeln, hätte zur Folge, dass beispielsweise im Fernverkehr der Bahn in Deutschland zukünftig 80 Mrd. statt 40 Mrd. PKM geleistet werden, was den MIV in der heutigen Form aber nur um weniger als 5% reduzieren würde. Um dies zu erreichen, sollen innerhalb der nächsten zehn Jahre in Deutschland zusätzlich rund 86 Mrd. € in die Infrastruktur des Verkehrssystems Bahn investiert werden (73). Wie viel Verkehrsleistung dann tatsächlich im Laufe der Jahre auf die Schiene verlagert werden kann, bleibt abzuwarten,

weil bereits heute absehbar ist, dass die zusätzlichen Kapazitäten gerade nicht dort entstehen, wo die größten Bedarfe erwartet werden (74). Grundsätzlich ist die Frage zu stellen, ob Infrastrukturinvestitionen von Milliarden Euro in das System Schienenverkehr wirklich sinnvoll sind, und ob diese Investitionen überhaupt in der Lage sein werden, dauerhaft Teil einer effizienten Lösung für zukünftige Mobilitätsanforderungen zu sein. Denn die systemimmanenten Nachteile des Verkehrssystems Schiene werden durch derartige Infrastrukturmaßnahmen nicht adressiert.

7.2 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Straße

Das Verkehrssystem Straße wird in der heute genutzten Art und Weise bzgl. der eingesetzten Ressourcen am wenigsten effizient betrieben. Eine hohe Anzahl von Fahrzeugen mit jeweils vergleichsweise geringen Transportleistungen sowie eine sehr geringe Auslastung der einzelnen Verkehrsmittel führen insgesamt zu CO₂-Belastungen pro PKM, die in Summe erheblich über den politisch und öffentlich vielfach diskutierten Abgaswerten liegen. Als landgebundenes Verkehrssystem benötigt es wie die Bahn eine THG-intensive Wege-Infrastruktur, wobei die aus Bau und Erhalt des Straßensystems entstehenden CO₂-Belastungen ein Stück weit durch die insgesamt sehr hohe Verkehrsleistung relativiert werden.⁷

Andererseits steht das Verkehrssystem Straße vielerorts kurz vor dem Kollaps; trotz seiner kritischen THG-Bilanz und seiner nachweislichen Ressourcen-Ineffizienz, ist es für die meisten Menschen in Deutschland bequem und es leistet mit weitem Abstand den größten Beitrag zur Erfüllung des Mobilitätsbedarfs. Gerade durch die riesige Transportleistung und die derzeitige ineffiziente Nutzung des Systems ergibt sich aber der bei weitem größte Hebel für nachhaltige Verbesserungen. Für die jährlich 966 Mrd. Personenkilometer im motorisierten Individualverkehr (MIV) sind in Deutschland rund 47 Millionen PKW (und Kleintransporter) unterwegs; die jährliche Anzahl an Neuzulassungen beläuft sich auf rund 3,4 Mio. Fahrzeuge. Statistisch gesehen wird jedes dieser Fahrzeuge weniger als eine Stunde am Tag gefahren und benötigt in den restlichen 23 Stunden öffentlichen oder privaten Parkraum.

⁷ Der Reisebus als Fernverkehrsmittel wurde aufgrund der geringen Bedeutung bisher nicht separat betrachtet; es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Fernbusse selbst bei durchschnittlicher Auslastung durch sehr gute Effizienzwerte hervorstechen. Selbst wenn in einem großen Bus nur 30 Personen transportiert werden, entspricht dies einer Verkehrsleistung von 20 durchschnittlich besetzten PKW; die THG-Emissionen aus dem Antrieb erreichen aber nur das 3- bis 4-fache eines einzelnen PKW, der Platzbedarf auf der Straße entspricht bei Reisegeschwindigkeit von 100 km/h dem von nur max. 2 PKW und auch die bei der Produktion entstehenden CO₂-Emissionen sind aufgrund der vergleichsweise hohen Transportleistung über die Jahre hinweg deutlich geringer als bei KFZ, sobald sie auf PKM umgelegt werden.

Zu keinem Zeitpunkt, auch nicht, während sich die längsten Staus bilden, sind auch nur die Hälfte der Fahrzeuge gleichzeitig unterwegs (75). Die geringe tägliche Nutzungszeit eines einzelnen Fahrzeugs führt gemeinsam mit der ebenfalls sehr geringen Auslastung von durchschnittlich 1,5 Personen (30 % bei unterstellten fünf Plätzen) zu einer täglichen Nutzungsrate von lediglich 1,25 %.

Diese Zahlen lassen folgendes Gedankenexperiment zu: Der gesamte MIV könnte auch mit weniger als der Hälfte der Fahrzeuge bewältigt werden, ohne dass irgendjemand zu irgendeinem Zeitpunkt auf irgendeine Fahrt verzichten müsste. Man könnte dauerhaft auf die Hälfte der Neufahrzeuge verzichten und hätte dann nach etwa 13–15 Jahren die Gesamtanzahl der Autos halbiert, wodurch u. a. sehr viel Platz von derzeit benutztem Parkraum frei würde. Unterstellt man zudem die berechneten 8 t CO₂ aus der Produktion eines Durchschnittsfahrzeuges, so führt dieser Ansatz zu einer jährlichen Ersparnis von mehr als 13 Mio. t CO₂, die bei der Nicht-Produktion von nicht mehr notwendigen KFZ eingespart würden. Gelingt es zusätzlich, die durchschnittliche „Besetzung“ eines KFZ von derzeit 1,5 Personen pro Fahrt auf 2 oder gar 2,5 zu erhöhen, könnten weitere Fahrzeuge und auch etwa 25 % (bei 2 Personen) bzw. 40 % (bei 2,5 Personen) der durchgeführten Fahrten eingespart werden. Dies hätte signifikante Einsparungen bei den benötigten Kraftstoffen (bei zukünftigen Elektrofahrzeugen Strom) zur Folge. Die Reduzierung der heutigen Fahrten um 25 %, die sich bei einer durchschnittlichen Auslastung der Fahrzeuge von 2 Personen rechnerisch sofort ergibt, reduziert die heutigen CO₂-Emissionen des MIV um 31,5 Mio. Tonnen jährlich. Weniger KFZ und weniger Verkehr benötigen weniger Straßen, Straßenneubauten und -reparaturen, was auch Reduktionen der CO₂-Emissionen für die Wege-Infrastruktur im Verkehrssystem Straße zur Folge haben wird.

Die zuvor dargelegten Zahlen der Verkehrsleistungen erlauben noch ein weiteres Gedankenexperiment: Eine lediglich um 10 % erhöhte durchschnittliche Personenzahl im PKW (von 1,5 auf 1,65) macht rechnerisch den gesamten Bahnverkehr in Deutschland obsolet. Damit erübrigte sich auch der sehr teure und Mio. Tonnen CO₂ verursachende Bau der Bahn-Infrastruktur. Natürlich ist dies aus heutiger Sicht eine rein theoretische Rechnung; vor dem Hintergrund, dass die Wege-Infrastruktur für beide Systeme häufig weitgehend parallel verläuft, ist dies jedoch ein Szenario, über das es sich lohnt nachzudenken. Weniger als die Hälfte der heute zugelassenen PKW könnte mit einer geringfügig erhöhten durchschnittlichen Auslastung der Fahrzeuge den gesamten Verkehrsbedarf auf Straße und Schiene bewältigen. Millionen Tonnen CO₂ ließen sich Jahr für Jahr einsparen, ohne dass es zu einer Einschränkung der persönlichen und individuellen Mobilität kommen müsste.

Was ist notwendig, um in Zukunft Anreize für eine effizientere PKW-Nutzung zu erreichen: Zum einen bedarf es einer „intelligenten Plattform“, durch die sichergestellt wird, dass ein Fahrzeug immer dann zur Verfügung steht, wenn es benötigt wird. Letztendlich ist dies nichts anderes als ein weiterentwickeltes Car-Sharing, das in Ansätzen heute schon vielerorts verfügbar ist. Weiterhin ist es notwendig, einen Anreiz dafür zu schaffen, dass man im Auto ggf. auch mit „fremden“ Personen unterwegs ist, die zum selben Zeitpunkt dieselbe Strecke zurücklegen wollen; das ist nichts anderes als das, was Mitfahrzentralen schon seit Jahren erfolgreich anbieten und was im öffentlichen Nahverkehr, in der Bahn und im Flugzeug gang und gäbe ist. Das gemeinsame Nutzen eines Fahrzeuges zur selben Zeit lässt sich über den zu zahlenden Preis incentivieren; wer allein fahren möchte, sollte dies auch weiterhin tun können, wenn er bereit ist, etwas mehr dafür zu bezahlen. Weiterhin ist es wichtig zu verstehen, dass gemeinsam genutzte Fahrzeuge für den Individualverkehr der Zukunft nur wenig mit Autos zu tun haben werden, wie wir sie heute kennen. „Private Abteile“ für ein oder zwei Personen in autonom fahrenden Fahrzeugen werden ebenso zum Standard gehören, wie Fahrzeuge, bei denen Antriebseinheit und Fahrgestell vom „Nutzlast-Aufbau“ getrennt sind, so dass die Unterteile der Fahrzeuge nachts Fracht und tagsüber Personen transportieren können (76). Niemand wird im Hochsommer mit schwitzenden Fremden Körper an Körper auf einer verdreckten Rückbank im Autos sitzen müssen. Digitale Technologien, die zur Realisierung solcher „Mobility as a Service“-Plattform notwendig sind, sind heute bereits verfügbar bzw. in fortgeschrittenem Entwicklungsstadium. Es wird gar nicht mehr lange dauern, bis ein Fahrzeug, nur wenige Minuten nach Anforderung, als autonom fahrendes Gefährt vor der Haustür stehen könnte. Die wichtigste Voraussetzung für dieses Szenario ist aber, dass ein solcher Paradigmenwechsel für die Gesellschaft attraktiv ist: weg vom Auto besitzen, hin zum Auto nutzen, wann immer es gebraucht wird.

Systeme, die die bereits vorhandene Infrastruktur und innovative Möglichkeiten der Digitalisierung verbinden und sinnvoll nutzen, müssen zügig (weiter-)entwickelt und erprobt werden; Digitalisierung und Automatisierung werden innerhalb der nächsten ein bis zwei Jahrzehnte im Kontext Mobilität Dinge ermöglichen, die sich viele Menschen heute noch gar nicht vorstellen können. Hier ist die Politik dahingehend gefordert, die notwendigen Rahmenbedingungen für die Entwicklung intelligenter Plattform-Lösungen zu schaffen, die die Bedarfe des Individualverkehrs zielgenau unterstützen.

7.3 Bewertung/Potenzial des Verkehrssystems Luftfahrt

Für das Verkehrssystem Luftfahrt wird die für den Antrieb benötigte Energie derzeit fast ausschließlich aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Die Tatsache, dass sich die gegenwärtige gesellschaftliche und politische Diskussion zu den THG-Emissionen des Verkehrssektors primär um die Antriebsenergie dreht, hat in den vergangenen Jahren zu einem sehr negativen Image geführt.

Interessant ist deshalb die Erkenntnis, dass das System Luftfahrt bei allen anderen zu berücksichtigenden Komponenten von allen drei untersuchten Verkehrssystemen relativ am besten abschneidet; insbesondere die nicht benötigte Wege-Infrastruktur stellt einen erheblichen und dauerhaften systemischen Vorteil gegenüber Straßen- und Schienenverkehr dar. Für den Luftverkehr kann es für die Zukunft nur ein Ziel geben: Der für den Antrieb notwendige Treibstoff muss klimaneutral werden. Synthetisches Kerosin, das unter Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen aus dem CO₂ in der Luft und Wasserstoff gewonnen wird, befindet sich aktuell in der Labor- und Erprobungsphase. Ebenso wird mit Kerosin aus Biomasse experimentiert; an einzelnen Flughäfen können Fluggesellschaften bereits (deutlich teureres) Kerosin tanken, das nicht fossilen Ursprungs ist (77), (78), (79). Bis nennenswerte Anteile an solchen klimaneutralen Treibstoffen zur Verfügung stehen, werden noch einige Jahre vergehen, und ob mit den heute bekannten Verfahren jemals der gesamte Bedarf für den weltweit steigenden Luftverkehr gedeckt werden können, wird sich erst im Laufe der Jahre zeigen. Erste, elektrisch betriebene Flug-Taxis, die ebenfalls vollkommen ohne Wege-Infrastruktur auskommen, haben die Labors verlassen und befinden sich in der Erprobungsphase.

Kurzfristig sollten verstärkt Überlegungen angestrengt werden, Streckenführung und Flughöhen im tagtäglichen Luftverkehr auch nach Kriterien der ökologischen Effizienz zu optimieren (80). Die fehlende Notwendigkeit einer Wege-Infrastruktur, der Vorteil des kürzesten Weges zwischen den Orten und die bereits heute höchste Effizienz im Verhältnis von Nutzlast zu bewegender Gesamtmasse sind jedoch systeminhärente Vorteile der Luftfahrt, die dauerhaft Gültigkeit behalten werden.

7.4 Politische Steuerung: Emissionshandel und andere Maßnahmen

Politische Überlegungen, die verkehrsbedingten CO₂-Emission mittels des Handels von Emissionszertifikaten, Steuern oder andere Abgaben beeinflussen zu wollen, haben in den letzten Jahren zu verschiedenen Maßnahmen geführt. Auf Basis der in dieser Studie dargelegten Zusammenhänge lässt sich festhalten, dass solche Aktivitäten nur dann erfolgreich sein können, wenn sie einerseits alle Emissionen, auch die der Verkehrsinfrastruktur und des Verkehrsmittelbaus miteinschließen und andererseits international und global angewendet werden. Dem Klima wird nicht geholfen, wenn Schienenstahl für Bahnstrecken und Zement für Tunnelbauten in Deutschland aus Ländern ohne CO₂-Bepreisung kommen und die Emissionen des Transportweges ebenfalls nicht eingepreist werden. CO₂-Emissionen, die irgendwo auf dieser Welt entstehen, ohne in ein entsprechendes Preis- und Verrechnungssystem einbezogen zu sein, stellen einen Anreiz dar, die Produktion CO₂-intensiver Materialien dorthin zu verlagern.

Das zu Beginn dieses Jahrhunderts eingeführte Emissionshandelssystem der EU (EU-EHS, engl. EU-ETS) teilt Unternehmen handelbare Emissionszertifikate zu (81). Damit wird für Unternehmen ein Anreiz geschaffen, CO₂-Emissionen zu senken, wobei unternehmerische Entscheidungsspielräume erhalten bleiben. Wo konkret die Emissionen gesenkt werden und mit welchen Kosten dies verbunden ist, bleibt in der Verantwortung der unternehmerischen Entscheidungsträger.

Für bereits existierende oder weitgehend fertiggestellte Infrastruktur kommen die Erkenntnisse dieser Studie zu spät; verkehrspolitische Überlegungen sollten diese ganzheitliche Sichtweise in Zukunft aber sehr viel stärker im Fokus haben. Das ausschließliche Festhalten an dem, was heute bekannt und bewährt ist, wird langfristig keine signifikanten CO₂-Reduktionen zur Folge haben, sondern eher zum Verdruss in der Bevölkerung führen, weil immer höhere Steuern und Abgaben erhoben werden, um weiterhin ineffiziente Verkehrssysteme am Leben zu halten.

8. Fazit

Der Fokus dieser Studie liegt auftragsgemäß auf dem ökologischen Vergleich verschiedener Verkehrssysteme mit einem besonderen Schwerpunkt auf den CO₂-Emissionen. Diese Fokussierung darf jedoch nicht den Eindruck erwecken, dass bei Entscheidungen für und wider bestimmte Verkehrssysteme unter ganzheitliche Betrachtung nicht auch noch ganz andere Aspekte eine wichtige Rolle spielen. Zu diesen Aspekten, die wichtig sind, hier aber nicht betrachtet wurden, zählen mindestens

- Weitere ökologische Aspekte wie Lärm, Vibrationen, Flächenverbrauch, etc.,
- Verfügbarkeit der Systeme heute und in Zukunft,
- Flexibilität der Systeme bei sich ändernden Anforderungen und Bedarfen,
- Ausfallsicherheit und Fehlertoleranz der Systeme im Falle unvorhergesehener Ereignisse,
- ökonomische Aspekte.

Alle diese und weitere Kriterien müssen ebenfalls ganzheitlich unter Berücksichtigung des gesamten Systems analysiert und bewertet werden; alle in der zuvor dargestellten Tabelle aufgeführten Systemkomponenten sind entsprechend zu untersuchen, um eine Aussage für das komplette Verkehrssystem in Bezug auf Ökonomie, Zuverlässigkeit, Flexibilität, Ausfallsicherheit, etc. treffen zu können.

Für jeden der zuvor erwähnten Aspekte sind eigene umfangreiche Analysen und Berechnungen notwendig. Die hier vorgestellte und angewendete Methodik lässt sich sowohl auf andere ökologische Aspekte als auch auf nicht-ökologische Kriterien anwenden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es dringend geboten ist, die ökologische Bewertung von Verkehrssystemen nicht nur auf Basis der Antriebsenergie vorzunehmen, sondern das gesamte Verkehrssystem inkl. aller Infrastrukturkomponenten zu betrachten. Zudem muss zwingend der auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basierende Bewegungsverlauf eines Transportvorgangs in die Bewertung einfließen. Hier spielt vor allem die insgesamt im Transportvorgang zu bewegendende Masse eine entscheidende Rolle.

Anhand exemplarischer Beispiele wurde in dieser Studie aufgezeigt, dass insbesondere die spezifische Wege-Infrastruktur und Knotenpunkt-Infrastruktur erheblichen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck eines Verkehrssystems haben. Die Abgase aus der Antriebsenergie des Verkehrsmittels machen nur einen Teil der Gesamtemissionen aus, je nach Verkehrssystem und spezifischer Strecke kann es sich bei den Abgasen sogar um den kleineren Teil handeln.

Sachlich erscheint es weder gerechtfertigt noch hilfreich, bestimmte Verkehrsmittel grundsätzlich zu verteufeln und andere als die Lösung für alle zukünftigen Probleme zu bejubeln. Ganzheitlich über die gesamte Prozesskette hinweg zu denken, sämtliche notwendigen Infrastruktur-Komponenten im Blick zu behalten und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge systematisch zu analysieren und zu berücksichtigen, ist dringend geboten. Der Bau neuer Hochgeschwindigkeitstrassen für Züge oder ein möglichst schneller Ausbau des schienengebundenen ÖPNV und dafür neue Trassen oder U-Bahnen zu bauen, mögen besonders umweltfreundlich klingen, können sich auf die ökologische Gesamtbilanz aber durchaus kontraproduktiv auswirken. Statt den Absatz von Elektro-PKW mit Milliarden Steuergeldern zu subventionieren, ohne dabei die Themen Verkehrsleistung und Auslastung der einzelnen Fahrzeuge zu adressieren, sollte man über Anreize nachdenken, wie die Nutzung von Fahrzeugen im MIV verbessert werden könnte.

Entwicklungen, die sich heute bereits deutlich abzeichnen, werden die Art und Weise, wie dem Mobilitätsanspruch zukünftig Rechnung zu tragen ist, stark beeinflussen. Eine ideologiefreie Aufgeschlossenheit gegenüber neuen Erkenntnissen, Verfahren, Methoden und Technologien ist zwingend notwendig, um nicht in Zukunft immer nur auf „ausgetretenen Pfaden“ unterwegs zu sein. Die öffentliche und politische Diskussion muss über alle Parteigrenzen hinweg konsequent versachlichtet werden und sich an naturwissenschaftlichen und technischen Gesetzmäßigkeiten orientieren. Physik, Chemie und Mathematik sind ideologiefrei und wahrhaft überparteilich, sie gelten weltweit für alle Menschen und alle politischen Parteien. Naturwissenschaftliche und mathematische Gesetzmäßigkeiten lassen sich weder in demokratischen Gesellschaften durch Mehrheitsbeschlüsse noch in Diktaturen durch Verordnung verändern. Die Tatsache, dass es faktische, natürliche Grenzen des Machbaren gibt, darf nicht ignoriert werden.

Die Zukunft der Verkehrssysteme sollte stärker durch Inter-Modalität bestimmt werden. Die Systeme müssen sich in Zukunft deutlich sinnvoller ergänzen; Wettbewerb ist dabei grundsätzlich zu begrüßen und kann durch sinnvolle Regulierung erreicht und ggf. gelenkt werden. CO₂-Emissionen, die durch Bau und Wartung der notwendigen Verkehrsinfrastruktur entstehen, bei der THG-Diskussion zu ignorieren hilft niemandem, dem Klima schon gar nicht. Jedes Jahr zweistellige Milliardenbeträge aus Steuermitteln für den Bau einer Bahn-Infrastruktur aufzuwenden, die im Endeffekt nicht oder nur in kleinen Teilen von den Nutzern der Transportleistung getragen werden, unterstützt keinen Wettbewerb um den ökonomisch und ökologisch sinnvollsten Transport (82). Auch wenn Mobilität als grundlegendes Bedürfnis betrachtet wird, muss die Erkenntnis bleiben, dass physischer Transport ökologisch und ökonomisch mit Aufwand verbunden ist. In der letzten Zeit entstandene Überlegungen zu kostenlosem ÖPNV setzen hier bewusst oder unbewusst falsche Akzente.

Politische Entscheidungen müssen darauf ausgerichtet werden, dem weltweit insgesamt steigenden Mobilitätsbedarf auch in Zukunft angemessen Rechnung zu tragen. Eine sehr viel stärkere Differenzierung unter Berücksichtigung unveränderbarer Gegebenheiten ist dabei unausweichlich. In den durchweg dicht besiedelten Niederlanden, wo Tunnel aufgrund fehlender Berge kaum nötig sind und Brücken nur über Grachten und Bewässerungskanäle zu bauen sind, sieht die ökologische Bilanz für eine Bahntrasse anders aus als im Westerwald, im Thüringer Wald und erst recht in den Alpen. Die beim Infrastrukturausbau entstehenden CO₂-Emissionen müssen unbedingt berücksichtigt werden. Gleichzeitig sollte zur Kenntnis genommen werden, dass Verkehrssysteme, die keinerlei Wege-Infrastruktur benötigen, grundsätzliche und dauerhafte Vorteile gegenüber anderen Verkehrssystemen haben.

Die Tatsache, dass Entscheidungen für neue Straßen und Brücken, Bahntrassen, Bahnhöfe oder Flughäfen sehr langfristige Auswirkungen haben, und Nutzen oftmals erst nach Jahren oder Jahrzehnten zu erwarten ist, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Die zum Zeitpunkt der Planung und des Baus gemachten Annahmen über Nutzungsdauer und Verkehrsleistung im Laufe der Jahrzehnte ist maßgeblich auch davon abhängig, welche grundlegenden Innovationen während der intendierten Nutzungsdauer entwickelt werden. Die Geschichte lehrt uns, dass auch im Kontext Verkehrssysteme „disruptive Innovationen“ schon einmal unerwartete und tiefgreifende Veränderungen mit sich brachten. Dazu zum Abschluss eine Anekdote, die sich vor rund 120 Jahren zugezogen hat:

Zum Zeitpunkt der vorletzten Jahrhundertwende wurde eine Umfrage unter jungen Männern der Adligen (die damals das Privileg hatten, zu reisen) gemacht: „Was muss getan werden, damit Sie zukünftig schneller und bequemer reisen können?“, war die Frage. Fast alle Befragten antworteten: „Wir brauchen schnellere Pferde.“

Weitsicht ist etwas anderes.

9. Anhang

9.1 Physikalische Berechnungen

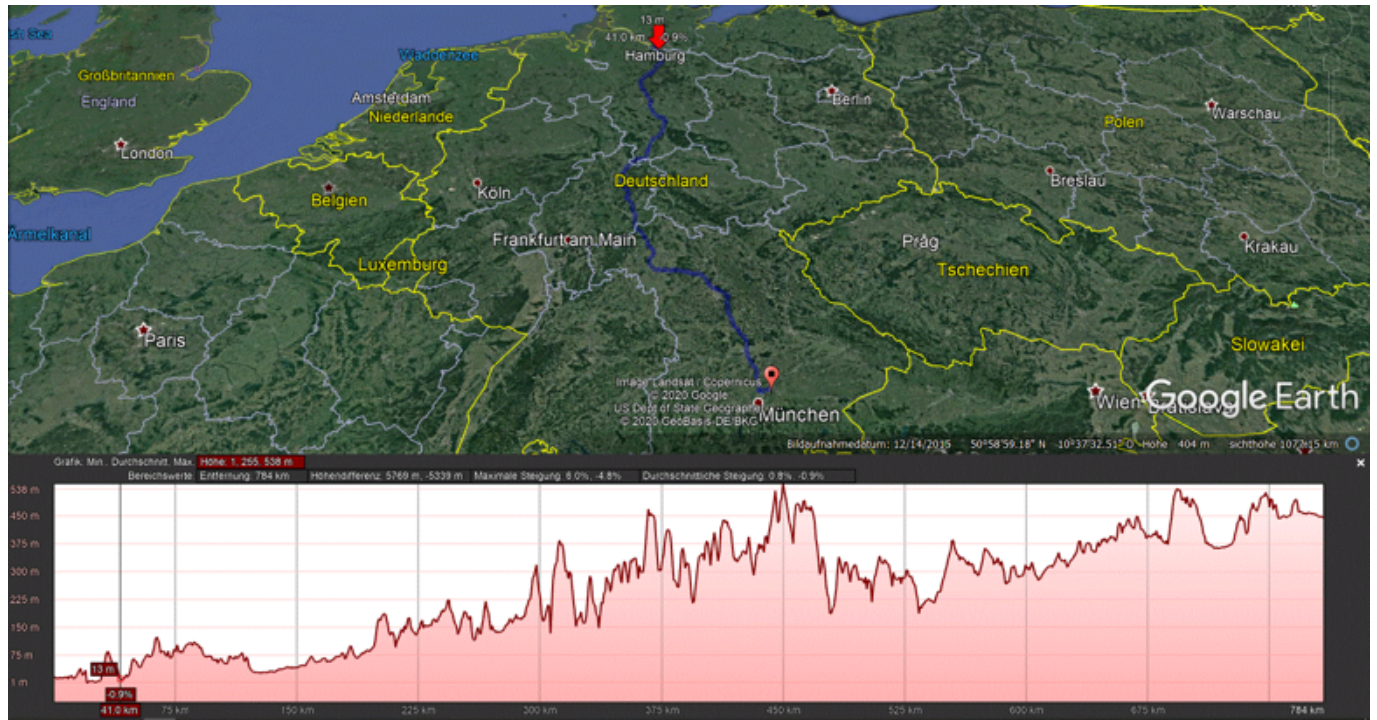
9.1.1 Beschleunigungsenergie pro Passagier

Tabelle 4: Energie für Beschleunigung pro Passagier: $F_{\text{Beschl}} = m/2 * v^2$

	Masse (kg)	v_A (km/h)	v_E (km/h)	v_A (m/s)	v_E (m/s)	kJ
ICE 3	1.800	0	60	0	16,67	250
		60	120	16,67	33,33	750
		120	180	33,33	50,00	1.250
		180	220	50,00	61,11	1.111
		220	270	61,11	75,00	1.701
		270	290	75	80,56	778
		0	140	0	33,33	1.361
		0	250	0	75,00	4.340
		0	290	0	80,56	5.840
		PKW	1.117	0	130	0
80	100			22,22	27,78	155
80	130			22,22	36,11	452
100	130			27,78	36,11	297
0	150			0	41,67	970
A 321	447	0	0,8 Mach	0	243,00	13.197

9.1.2 Energie für Hubarbeit pro Passagier

Grafik 1: Schnellste Verbindung von Hamburg nach München inkl. Höhenprofil



Quelle: Google Earth

Tabelle 5: Energie für Hubarbeit pro Passagier: $F_{Hub} = F_G \cdot h = m \cdot 9,81 \cdot h$

	Masse (kg)	Höhe (m)	kJ
ICE 3	1.800	2.308	40.746
	1.800	100	1.766
PKW	1.117	4.615	50.570
	1.117	100	1.096
A 321	447	9.000	39.466
	447	100	439

9.1.3 Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro PKM

Tabelle 6: Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro km: $F_{\text{Luft}} = \text{Rho}/2 * c_w * A * v^2$

	Rho (kg/m ³)	C _w	A (m ²)	v (km/h)	v (m/s)	kJ	# Fahrgäste	kJ pro PKM
ICE 3	1,225	1,1	11	80	22,22	3.660	231	16
				100	27,78	5.719		25
				150	41,67	12.867		56
				180	50,00	18.528		80
				200	55,56	22.874		99
				230	63,89	30.251		131
				250	69,44	35.741		155
				270	75,00	41.688		180
				290	80,56	48.093		208
PKW	1,225	0,3	3	50	13,89	106	1,5	71
				80	22,22	272		181
				130	36,11	719		479
				150	41,67	957		638
				180	50,00	1.378		919
A 321	0,466	0,08	122	0,8 Mach	243,00	134.282	164	819

9.2 Energetische Berechnungen und CO₂-Ausstoß für BahnfahrtenTabelle 7: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen Deutsche Bahn 2017:

Traktionsenergie						
		kWh	CO ₂ in kg			
Traktionsstrom Bahn 2017	100,00 %	10.190.000.000	5.441.460.000			
Fernverkehr	32,80 %	3.342.320.000	1.784.798.880			
Regio-/Nahverkehr	43,20 %	4.402.080.000	2.350.710.720			
Güterverkehr	24,00 %	2.445.600.000	1.305.950.400			

		Liter	CO ₂ in kg	CO ₂ in kg aus Strom + Diesel	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂
Dieserverbrauch Bahn 2017	100,00 %	436.000.000	1.139.922.000	6.581.382.000		
Fernverkehr	2,50 %	10.900.000	28.498.050	1.813.296.930	40.548.000.000	44,72 g/PKM
Regio-/Nahverkehr	76,10 %	331.796.000	867.480.642	3.218.191.362	41.876.000.000	76,85 g/PKM
Güterverkehr	21,50 %	93.740.000	245.083.230	1.551.033.630	92.651.000.000	16,74 g/TKM

Annahmen: Alle kWh-Angaben als Nettostrommengen; Leitungs- und Umwandlungsverluste sind zusätzlich zu berücksichtigen. Stromverbräuche sonstiger Schienenverkehre sowie von Baustellenverkehren sind nicht berücksichtigt.

CO₂-Menge in kg/kWh: 0,534

Quelle: UBA

Tabelle 8: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen Deutsche Bahn 2019:

Traktionsenergie			
		kWh	CO ₂ in kg
Traktionsstrom Bahn 2019	100,00 %	9.552.000.000	4.947.936.000
Fernverkehr	32,80 %	3.133.056.000	1.622.923.008
Regio-/Nahverkehr	43,20 %	4.126.464.000	2.137.508.352
Güterverkehr	24,00 %	2.292.480.000	1.187.504.640

		Liter	CO ₂ in kg	CO ₂ in kg aus Strom + Diesel	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂
Dieserverbrauch Bahn 2019	100,00 %	410.600.000	1.073.513.700	6.021.449.700		
Fernverkehr	2,50 %	10.265.000	26.837.843	1.649.760.851	44.151.000.000	37,37 g/PKM
Regio-/Nahverkehr	76,10 %	312.466.600	816.943.926	2.954.452.278	41.634.000.000	70,96 g/PKM
Güterverkehr	21,50 %	88.279.000	230.805.446	1.418.310.086	88.237.000.000	16,07 g/TKM

Steuerungsinfrastruktur			
Strom Steuerungsinfrastruktur 2019		kWh	CO ₂ in kg
Weichensteuerung/Signale		196.000.000	101.528.000
Weichenheizung		131.500.000	68.117.000

			CO ₂ insges. Steuerungsinfr.	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂	
			169.645.000			
Fernverkehr			27,40 %	46.479.452	44.151.000.000	1,05 g/PKM
Regio-/Nahverkehr			49,07 %	83.237.108	41.634.000.000	2,00 g/PKM
Güterverkehr			23,55 %	39.958.685	88.237.000.000	0,45 g/TKM

Knotenpunkt-Infrastruktur						
Strom Betrieb Bahnhöfe		kWh	CO ₂ in kg	CO ₂ in kg	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂
		331.500.000	171.717.000	171.717.000	85.785.000.000	2,00 g/PKM

Annahmen: Alle kWh-Angaben als Nettostrommengen; Leitungs- und Umwandlungsverluste sind zusätzlich zu berücksichtigen. Stromverbräuche sonstiger Schienenverkehre sowie von Baustellenverkehren sind nicht berücksichtigt.

CO₂-Menge in kg/kWh: 0,518

Quelle: UBA

10. Literatur und Referenzen

1. **Jens Borken-Kleefeld, Terje Berntsen, Jan Fuglestvedt**, Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport, Environmental Science Technology, 2010, Bd. 44, S. 5700–5706
2. **Jens Borken-Kleefeld, Jan Fuglestvedt, Terje Berntsen**, Supporting Information for: Mode, load, and specific climate impact from passenger trips, Environmental Science & Technology, 2013, Bd. 47, 14, S. 7608–7614
3. **Brandenburg, Landesamt für Umwelt**, [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12. 19] <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de>
4. **FIZ, Karlsruhe, EnEff:Industrie**, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://eneff-industrie.info/quick-infos/energieintensive-branchen/daten-zu-besonders-energiehungrigen-produktionsbereichen/>
5. **UBA**, Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung, [Online] 2010, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4362.html>
6. **Energiewirtschaft**, Forschungsgesellschaft für CO₂ Verminderung in der Metallherzeugung, S.4, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019]
7. **Umweltagentur**, NÖ Energie- und Aluminium. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12. 2019.] <https://www.wir-leben-nachhaltig.at/aktuell/detailansicht/aluminium/>
8. **Wikipedia**, Zement, Umweltschutzaspekte, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://de.wikipedia.org/wiki/Zement#Umweltschutzaspekte>
9. **Klimabilanz Zementindustrie**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019.] <https://www.chemietechnik.de/klimabilanz-der-zementindustrie/>
10. **Welt**. Klimakiller Beton. [Online] 2011, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.welt.de/print/die_welt/debatte/article13499011/Klimakiller-Beton.html
11. **ZDF**, Zement – Der heimliche Klimakiller, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-zement---der-heimliche-klimakiller-100.html>
12. **Deutschlandfunk**, Klimasünder Beton – Ein Baustoff sucht seinen Nachfolger, [Online] 20. 12. 2020, [Zitat vom: 24. 12. 20] https://www.deutschlandfunk.de/klimasuender-beton-ein-baustoff-sucht-nachfolger.740.de.html?dram:article_id=488355
13. **Ricke, Katherine L. und Caldeira, Ken**, Maximum warming occurs about one decade after a corbondioxide emission, [Online] 2014, [Zitat vom: 06. 01. 21] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/12/124002/pdf>
14. **Statistisches_Bundesamt**, Luftverkehr auf allen Flugplätzen – Fachserie 8 Reihe 6.2 – 2018, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-alle-flugplaetze-2080620187004.pdf.jsessionid=9FB84A3F57BD035C3F8E8C7471B9C9A0.internet742?_blob=publicationFile
15. **BMVI**, Verkehr in Zahlen 2017/2018, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.html>
16. **UBA**, Daten zum Verkehr, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr>
17. **IFEU-ADAC**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/studie-oekobilanz-pkw-antriebe-2018/>
18. **Emilsson, E. und Dahllöf, L**, Report C444 – Lithium-Ion Vehicle Battery Production – Status on Energy Use, CO₂,..., [Online] 2019, [Zitat vom: 04. 12. 20] <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publication.html?id=5808>
19. **Handelsblatt**, Welche Strecke legt ein Zug insgesamt zurück? [Online] 2013, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.handelsblatt.com/technik/das-technologie-update/weisheit-der-woche/schienerverkehr-welche-strecke-legt-ein-zug-insgesamt-zurueck/8896436.html?ticket=ST-51043305-2RyidOktPLdICL01yqgb-ap5>
20. **Wikipedia**, ICE3, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://de.wikipedia.org/wiki/ICE_3
21. **DB**, Daten & Fakten 2017, 2018
22. **Planefinder**, Planefinder App: Analyse der Flugbewegungen des Flugzeugs mit der Registrierung D-ABYZ für September 2019, 2019
23. **Flugzeuginfo.net**, Flugzeuginfo.net: Airbus A321. [Online] 2019, http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a321_dt.php

- 24. Airbus**, AIRCRAFT CHARACTERISTICS Airbus 321, [Online] 01. 04. 2020, [Zitat vom: 23. 05. 2020] <https://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html>
- 25. Wikipedia**, Airbus-A320-Familie, [Online] 2020, [Zitat vom: 23. 05. 2020] https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus-A320-Familie#A321_2
- 26. Schiene_(Schieneverkehr)**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] [https://de.wikipedia.org/wiki/Schiene_\(Schieneverkehr\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Schiene_(Schieneverkehr))
- 27. Gleisbau-Welt**, Feste Fahrbahn, Gleisbau-Welt.de, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/feste-fahrbahn/>
- 28. Wikipedia**, Idsteintunnel, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://de.wikipedia.org/wiki/Idsteintunnel>
- 29. Schnellfahrstrecke Köln–Rhein-Main**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://de.wikipedia.org/wiki/Schnellfahrstrecke_K%C3%B6ln%E2%80%93Rhein/Main
- 30. Rößler**, Quantifizierung der THG-Emissionen des Projekts Stuttgart 21, [Online] 2017, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.umstieg-21.de/assets/files/thg-endbericht_s21_251017.pdf
- 31. NBS, ARGE**, Web Archive: ARGE NBS Los A, [Online] 2019, <https://web.archive.org/web/20060208054606/http://www.arge-nbs.de/deutsch/strassenbau/index.php>
- 32. Tagesschau**, Tagesschau, Bahn sperrt Hauptstrecken monatelang, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutschebahn-sa-nierung-101.html>
- 33. Spiegel-Online**, Bahnpassagiere müssen längere Fahrzeit einplanen, [Online] 2019, [Zitat vom: 05. 10. 20] <https://www.spiegel.de/reise/aktuell/ice-strecke-hannover-goettingen-30-minuten-laengere-fahrzeit-ab-11-juni-a-1268770.html>
- 34. AlpTransit**, Projektkennzahlen Rohbau Gotthard-Basistunnel
- 35. Wikipedia**, Richtlinie Anlage von Autobahnen, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinien_f%C3%BCr_die_Anlage_von_Autobahnen
- 36. Deckschicht-Straßenbau**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] [https://de.wikipedia.org/wiki/Decke_\(Straßenbau\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Decke_(Straßenbau))
- 37. Leitplanken**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://leitplanken-kaufen.de/>
- 38. Welt**, „Ich grabe nicht ganz Tübingen um,...“, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.welt.de/wirtschaft/article200285740/Boris-Palmer-Ich-grabe-nicht-ganz-Tuebingen-um-damit-Sie-Ihre-Ladesaeulen-kriegen.html>
- 39. Wikipedia**, Liste der 100 flächengrößten Gemeinden Deutschlands, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_100fl%C3%A4chengr%C3%B6%C3%9Ften_Gemeinden_Deutschlands
- 40. DEKRA**, Fakten zum Parken, [Online] 2016, [Zitat vom: 04. 12. 20] <https://www.dekra-infoportal.de/statistik/fakten-zum-parken/>
- 41. Prognos AG**, Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten. 2015
- 42. Statista**, Anzahl Bahnhöfe, [Online] 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13357/umfrage/anzahl-der-bahnhoefe-im-besitz-der-db-ag/>
- 43. KONTEXT:Wochenzeitung**, CO₂-Schleuder S-21, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.kontextwochenzeitung.de/politik/345/co2-schleuder-s-21-4704.html>
- 44. Deutscher Bundestag**, Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjk4e6BtoXmAjVjw8QBHQDG-BkYQFjAAegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bundestag.de%2Fblob%2F549342%2F...%2Fwd-5-027-18-pdf-data.pdf&usg=AOvVaw1YSdqOyFxDVLxuoTGzxfxL>
- 45. Fraport**, Umwelterklärung 2019, [Online] [Zitat vom: 21. 01. 21] https://www.fraport.com/content/dam/fraport-company/umwelt/klimaschutz/bin%C3%A4r-dokumente/verkuerzte-umwelterkla-rung_2019.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/verkuerzte-umwelterkla-rung_2019.pdf
- 46. Bundestag, Deutscher**, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der FDP Fraktion betreffend „Energieverbrauch der Deutschen Bahn AG“, 2020
- 47. DFS**, E-Mail-Antwort der DFS auf Anfrage zum jährlichen Energieverbrauch, 2020
- 48. Hamburg, Bürgerschaft der Stadt**, Kleine Anfrage vom 16. 06. 2016, [Online] 16. 06. 2016, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://kleineanfragen.de/hamburg/21/4741-umruestung-von-ampeln-in-hamburg-auf-neueste-led-technik.txt>
- 49. DB**, Daten & Fakten 2019, 2020
- 50. Wikipedia**, SBB RABe 502, [Online] [Zitat vom: 10. 07. 20] https://de.wikipedia.org/wiki/SBB_RABe_502

- 51. Statistikportal, SBB**, SBB Verkehrsleistungen, [Online] [Zitat vom: 10. 07. 20] <https://reporting.sbb.ch/verkehr?years=0,1,4,5,6,7&scroll=0&highlighted=70291c3c32fba876bef5ed8198c49e1f>
- 52. Alstom Corodia Continental**, [Online] [Zitat vom: 17. 12. 20] https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom_Corodia_Continental
- 53. RE 8 – Rhein-Erft-Express und RB 27 – Rhein-Erft-Bahn**, [Online] 2020, [Zitat vom: 17. 12. 20] <https://www.nvr.de/streckennetz-und-angebot/liniuebersicht/re-8-rhein-erft-express-und-rb-27-rhein-erft-bahn>
- 54. Lufthansa**, LH-Group Auslastung 2018, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://newsroom.lufthansagroup.com/german/newsroom/mit-142-millionen-passagieren-im-jahr-2018-ist-die-lufthansa-group-die-nummer-eins-in-europa/s/41337be6-ca07-4298-bf9b-cee7e91c69e3>
- 55. DWD**, ICAO-Standardatmosphäre, [Online] 2020, [Zitat vom: 23. 05. 2020] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewif_sPT_cnpAhXB0aQKHS-GMBj4QFjABegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.dwd.de%2FDE%2Fservice%2Fflexikon%2Fbegriffe%2FS%2FStandardatmosphaere_pdf.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D3&usg=AOvV
- 56. Wikipedia**, Oberleitung, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://de.wikipedia.org/wiki/Oberleitung>
- 57. Giegrich, Liebich, Fehrenbach, UBA**, Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle, [Online] 2007, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ableitung-von-kriterien-zur-beurteilung-einer>
- 58. Bahn**, Erster Oberleitungsmast gestellt, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/no_cache/projekt/aktuell/archiv-suche/news-archiv-detail/news/1432-erster-oberleitungsmast-gestellt/newsParameter/detail/News/
- 59. DB Energie**, DB Energie – Über uns, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/db-energie-unternehmen/unternehmen-1345392>
- 60. Klimaschutz-Portal**, Klimawirkung Luftverkehr, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.klimaschutz-portal.aero/klimakiller-nr-1/klimawirkung-des-luftverkehrs/>
- 61. BUND**, CO₂-Emissionen des Verkehrs, [Online] 2019, <https://www.bund.net/themen/mobilitaet/autos/co2-emissionen/?wc=24308>
- 62. Klimaschutz-Portal**, Verbrauch senken, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.klimaschutz-portal.aero/verbrauch-senken/>
- 63. UBA**, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018, 2019
- 64. Eisenkopf, A**, Böse Studie: Elektroautos lassen nur woanders verbrennen, [Online] 2019, [Zitat vom: 09. 12. 20] https://www.achgut.com/artikel/boese_studie_elektroautos_lassen_nur_woanders_verbrennen/P15#comment_entries
- 65. Deutsche Welle**, Wie grün ist die Deutsche Bahn wirklich? [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.dw.com/de/wie-gr%C3%BCn-ist-die-deutsche-bahn-wirklich/a-41894678>
- 66. Frankfurter Rundschau**. Die grüne Mär der Bahn, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.fr.de/wirtschaft/gruene-bahn-10991713.html>
- 67. Windpark Geisberg – Technik**, [Online] [Zitat vom: 09. 12. 20] <https://www.windpark-geisberg.de>
- 68. Kuhne, Manfred**, Energieverbrauch von Bahn und Flugzeug, [Online] 2015, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.airliners.de/energieverbrauch-bahn-flugzeug-apropos/36592>
- 69. C. Buchal, H.-D. Karl, H.-W. Sinn**, 2019, Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? ifo Schnelldienst, 08 2019
- 70. Stockburger, C. Spiegel Mobilität**: Die Mär vom Mehr, [Online] 2013, [Zitat vom: 11. 12. 20] <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/durchschnittliche-ps-zahl-der-neuwagen-in-deutschland-gesunken-a-931262.html>
- 71. Spiegel Mobilität**, Deutsche Autofahrer stellen PS-Rekord bei Neuzulassungen auf, [Online] 2020, [Zitat vom: 10. 12. 20] <https://www.spiegel.de/auto/deutsche-autofahrer-stellen-ps-rekord-bei-neuzulassungen-auf-a-742a5bf1-30c5-4eca-8a96-9918b23ccf57>
- 72. Statista**, durchschnittliche Motorleistung von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2018, [Online] [Zitat vom: 10. 12. 20] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12937/umfrage/entwicklung-der-motorleistung-von-neuwagen/>

- 73. Tagesspiegel**, Wofür die Deutsche Bahn 86 Milliarden Euro braucht, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 10. 20] <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/marode-infrastruktur-wofuer-die-deutsche-bahn-86-milliarden-euro-braucht/24844350.html>
- 74. –**. Scheitern mit Ansage: Interne Analyse stellt Bahn alarmierendes Zeugnis aus, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 10. 20] <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/scheitern-mit-ansage-interne-analyse-stellt-bahn-alarmierendes-zeugnis-aus/24313964.html>
- 75. infas**, Mobilität in Deutschland, [Online] 2018, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile
- 76. Herrmann, Andreas und Brenner, Walter**, Die autonome Revolution: Wie selbstfahrende Autos unsere Welt erobern, s.l. : Frankfurter Allgemeine Buch, 2018
- 77. NZZ**, Synthetisches Flugbenzin, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.nzz.ch/mobilitaet/luftfahrt/synthetisches-flugbenzin-abheben-mit-kerosin-aus-windstrom-ld.1520098>
- 78. Tagesspiegel**, Forscher entwickeln klimaschonendes Kerosin, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.tagesspiegel.de/wissen/treibstoff-aus-luft-wasser-und-licht-forscher-entwickeln-klimaschonendes-kerosin/24976042.html>
- 79. Golem.de**, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.golem.de/news/sun-to-liquid-wie-mit-sonnenlicht-sauberer-kerosin-erzeugt-wird-1806-134969.html>
- 80. Wirtschaftswoche**, Tempolimit am Himmel, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/inlandsfluege-ein-tempolimit-am-himmel-konnte-dem-klima-helfen/25308762.html>
- 81. Union, Europäische**, Emissionsobergrenzen und -zertifikate, [Online] [Zitat vom: 08. 01. 21] https://ec.europa.eu/clima/Policies/ets/cap_de
- 82. Wikipedia**, Leistungs und Finanzierungsvereinbarung, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://de.wikipedia.org/wiki/Leistungs-_und_Finanzierungsvereinbarung
- 83. UBA**, Klimawirksamkeit des Flugverkehrs, [Online] 2012, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf
- 84. Atmosfair**, Fliegen und Klima, [Online] 2019, [Zitat vom: 15. 12. 2019] https://www.atmosfair.de/de/fliegen_und_klima/flugverkehr_und_klima/klimawirkung_flugverkehr/
- 85. Greenhouse Gas Protocol**, [Online] [Zitat vom: 21. 01. 21] <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>
- 86. World Resources Institute**, [Online] [Zitat vom: 21. 01. 21] <https://www.wri.org/>
- 87. World Business Council for Sustainable Development**, [Online] [Zitat vom: 21. 01. 21] <https://www.wbcsd.org/>
- 88. D.S. Lee**, et.al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment. 2021, Bd. 244. [Zitat vom: 08. 02 21.] <https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-environment/vol/244/suppl/C>

