

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Fakultät für Chemie und Geowissenschaften

Masterarbeit

im Master of Education

Thema: **Persönliche Mobilität
im Einklang mit den Klimazielen**
Entwicklung von Budgets und Indikatoren
für klimafreundliche Mobilitätsentscheidungen

eingereicht von: Margarita J. Schliffka

betreut von: Dr. Nicole Aeschbach
Prof. Dr. Werner Aeschbach

erstellt am Institut für Geographie,
TdLab Geographie (Labor für Transdisziplinarität)
2021

Abstract

Deutsch

Um globale Klimaziele zu erreichen ist Partizipation auf der individuellen Ebene erforderlich. Dabei machen die Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs einen großen Bestandteil des persönlichen Anteils am Klimaschutz aus. Somit werden innerhalb dieser Arbeit persönliche Emissionsbudgets anhand verschiedener Zielvorgaben wie dem Pariser Klimaabkommen berechnet und Methoden zusammengestellt, mit welchen die Klimawirksamkeit häufig genutzter Verkehrsmittel berechnet werden kann. Innerhalb des Budgets sind dann Überlegungen möglich, wie konkrete Mobilitätsentscheidungen darin aussehen könnten. Anhand dieser Berechnungsgrundlagen wurden Mobilitätsprofile beziehungsweise Indikatoren für „klimafreundliches“ Verhalten ermittelt, mit denen durch Abfragen weniger Informationen schon ein guter Überblick über die Emissionen einer Person gewonnen wird. Ziel ist es eine möglichst hohe Transparenz für die Person, die eine Mobilitätsentscheidung für sich selbst trifft, zu schaffen. Damit kann der Handlungsspielraum aufgezeigt werden, in welchem sich das eigene Verhalten abspielen muss, um gewisse nationale oder globale Ziele zu erreichen.

English

Global climate goals need action on a personal level. Especially greenhouse gas emissions from the personal transport sector can make a big difference on a person's contribution to climate protection. Therefore this thesis offers greenhouse gas budgets based on different climate goals like the Paris agreement and information on how to calculate the emissions of vehicles for personal transport. Based on the personal budget for transport emissions and the information on different modes of transportation, considerations are made on how this could be translated into concrete and every-day mobility decisions. Profiles of possible transport options inside the greenhouse gas budget are calculated and indices for „climate friendly“ mobility behaviour are discussed. Those indices try to offer a good estimate for a persons emissions in the transport sector based on only a few informations required. This thesis has the goal to offer a transparent way to show how mobility behaviour inside a greenhouse gas budget can be made possible. Personal decision making can therefore be based on the goal of achieving certain climate targets.

Inhalt

Verzeichnisse	3
Glossar	4
1 Grundlagen	6
1.1 Einleitung	6
1.2 Klimawandel	6
1.2.1 Budgets, Grenzen, Vergleichbarkeit	8
1.2.2 Stand Verkehrsemissionen	10
1.3 Mobilität	12
Reisen	12
Alltagsmobilität	13
Restliche Mobilität	13
2 Berechnung eines pro-Kopf-Budgets für den Personentransport	14
2.1 Verantwortung und individuelle Ebene	14
2.1.1 Intersektorale Aufteilung	14
2.1.2 Persönliche Voraussetzungen - nationale Perspektive	15
2.1.3 Klimagerechtigkeit global	16
2.2 Gleichverteilung bei RCP 2.6 bzw. RCP 3PD	17
2.3 Gleichverteilung nach B2DS	22
Berechnung auf globaler Ebene	22
Berechnung auf EU-Ebene	23
2.4 Gleichverteilung bei Einhaltung der deutschen Klimaziele	24
2.4.1 Stand 2019	24
2.4.2 Stand 2021	26
2.5 Referenzszenario: Klimaschutz Stand 2017	27
2.6 Vergleich und Diskussion der Budgets	28
Annahmen	29
Referenzszenario	31
Vergleich mit [AGORA VERKEHRSWENDE 2019]	32
Fazit (Budgets)	32
3 Klimawirkung verschiedener Verkehrsmittel	33
3.1 Annahmen	33
3.1.1 CO ₂ , CO ₂ -Äquivalent	33
3.1.2 Systemgrenzen: Welche Emissionen werden berücksichtigt?	33
3.1.3 Infrastruktur- Bestand und Ausbau	34
3.1.4 Platzfrage: Wer verantwortet den leeren Sitz?	35
3.2 Motorisierter Individualverkehr	36
3.2.1 PKW (mit Verbrennungsmotor)	36
3.2.2 E-Autos	38
3.2.3 Weitere Antriebstechnologien	40
3.2.4 Car-Sharing	40
3.2.5 CO ₂ -Rechner	41
3.2.6 Motorräder, Mofas und ähnliches	44
3.2.7 Zusammenfassung und Diskussion MIV	45
3.3 Flugzeuge	49
3.3.1 CO ₂ und weitere Treibhausgase	50
3.3.2 Andere Effekte	51
Wasser, Wolken, Kondensstreifen	51
Strahlungsantrieb für die Gesamtwirkungen	51
3.3.3 Gesamteinfluss	53
3.3.4 Technologische Lösungen	54

3.3.5	CO ₂ -Rechner	55
3.3.6	Fazit: Flugzeuge	58
	Eigenes Berechnungsmodell	59
3.4	Bahnverkehr	61
3.5	Sonstiger ÖV	62
	Straßenbahn, U- Bahn, städtischer Schienenverkehr	62
	Nahverkehr: Bus	62
	Fernbus	63
	Fazit ÖV	63
3.6	Schifffahrt	64
3.7	Klimawirkung der nicht-motorisierten Mobilität und Pedelecs	65
3.8	Zusammenfassung und Vergleich der Verkehrsmittel	66
4	Emissionsprofile	69
4.1	Alltagsmobilität in Deutschland	69
4.2	Theoretische Mobilitätsprofile innerhalb des Budgets	73
4.2.1	Urlaubsflieger	73
4.2.2	AutoenthusiastIn	74
4.2.3	ÖV-NutzerIn	75
	ÖPNV und Fernzugreise	76
4.2.4	Pendeln und Einkaufen mit Auto, Rest mit ÖV	77
4.2.5	Mallorca-Flug und Rest	77
4.2.6	RadfahrerIn, Urlaub mit ÖV	78
	Anteil der Alltagsmobilität im ÖV	79
4.2.7	PedelecfahrerIn mit ÖV	79
4.2.8	LangstreckenpendlerIn	80
4.2.9	Ausformulieren der Mobilitätsprofile für 2021	81
5	Indikatoren der Klimawirksamkeit von Mobilität	82
5.1	Big-Five, lexikalischer Ansatz	82
5.1.1	Vergleich mit Websites	83
5.1.2	Vergleich Wahlprogramme	83
5.1.3	Stand der internationalen Forschung	84
5.1.4	IPCC-Bericht	85
5.1.5	Vorauswahl	85
5.1.6	Hauptauswahl	88
5.2	Punktesystem - mathematischer Ansatz	90
	Mobilitätsbudget als Punktesystem - Ergebnisse	90
	Gesamtenergiebudget als Punktesystem - Ergebnisse	93
5.3	Diskussion der Indikatorenansätze	94
6	Fazit und Ausblick	95
7	Anhang	97
7.1	Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach RCP 2.6	97
7.2	Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach B2DS	98
7.3	Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach Klimaschutzplan 2050	99
7.4	Python-Code zur Berechnung der Funktion zwischen Flugdistanz und Punktwert sowie numerische Auswertung	100
7.5	Ergebnisse Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach RCP 2.6, B2DS und Klimaschutzplan 2050	102
7.6	Ergebnisse gesamtes Emissionsbudgets pro Kopf nach RCP 2.6, B2DS und Klimaschutzplan 2050	103

7.7 Berechnung der Emissionsprofile 104

8 Quellenverzeichnis 105

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

1 Lineares Modell: Zsh. CO₂ und ΔT 7

2 Emissionstrend und Ziele (global) 9

3 Emissionstrend und Ziele nach Sektoren (DE) 10

4 EU: THG-Emissionen Gesamt und Transport 11

5 Anteil Verkehrsmittel Deutschland 2008 (nach Strecke) 12

6 Anteil Verkehrsmittel Deutschland 2008 (nach Klimawirkung) 12

7 Flugreisen aus Deutschland (nach Ziel und Zweck) 13

8 Emissionsbudget pro Kopf nach RCP-Berechnung 18

9 Transportemissionsbudget pro Kopf nach RCP-Berechnung 19

10 Persönliches Verkehrsemissionsbudget nach RCP-Berechnung 21

11 Personenverkehrsemissionsbudget pro Kopf nach B2DS 23

12 Personenverkehrsemissionsbudget EU pro Kopf nach B2DS 24

13 Verkehrsemissionsbudget pro Kopf, Klimaschutzplan 2050 25

14 Emissionsbudget Personentransport, Klimaschutzplan Stand 2019 26

15 Emissionsbudget Personentransport, Klimaschutzplan Stand 2021 27

16 Referenzszenario 2017 28

17 Vergleich der Budgets 29

18 Vergleich Budgets mit Referenzszenario 31

19 Betrachtung der Gesamtemissionen eines Transportmittels 34

20 Vergleich der THG-Emissionen versch. PKW 39

21 Vergleich von CO₂-Rechnern für PKW 44

22 Vergleich PKW-Berechnung mit mobitool 47

23 Vergleich Elektromobilität eigene Berechnung 48

24 Reiseemissionen (nach Ziel und Reisenden) 49

25 Flugemissionen und Wirkung auf den Strahlungshaushalt 52

26 Vergleich von CO₂-Rechnern für Flüge 58

27 Vergleich der Berechnungsmethoden der Klimawirksamkeit 69

29 Emissionsgruppen Deutschlands 2017 70

28 Mobilitätsgruppen Deutschlands 2017 70

30 CO₂-Emissionsklassen nach verschiedenen Mobilitätstypen Deutschlands 2017 72

31 Mobilitätsprofil: Urlaubsflyer, mögliche Flugdistanzen 74

32 Punktesystem: Vergleich des aufgebrauchten Budgetanteils nach 100 km 91

33 Fitfunktion zur Bestimmung der Punkte pro 100 km je nach Flugstrecke 92

34 Bestimmung des funktionellen Zusammenhangs zwischen Punkten und Flugstrecke 92

Tabellenverzeichnis

1 Emissionsbudget ausgewählter Jahre pro Person nach RCP-Berechnung 18

2 Transportemissionsbudget ausgewählter Jahre pro Person nach RCP-Berechnung 19

3 Personenverkehrsemissionsbudget ausgewählter Jahre pro Person nach RCP 2.6 21

4 Personentransportemissionsbudget ausgewählter Jahre nach B2DS pro Person 23

5 Personentransportemissionsbudget EU nach B2DS pro Person 24

6	Personentransportbudget Klimaschutzplan Stand 2019	26
7	Personentransportbudget Klimaschutzplan Stand 2021	27
8	Vergleich der Annahmen der Budgetrechnungen	29
9	Vergleich der globalen Gesamtbudgets	30
10	Vergleich der deutschen Personentransportbudgets	32
11	CO ₂ -Emissionen verschiedener PKW	36
12	CO ₂ -Emissionen PKW nach TREMOD	37
13	Emissionen und Treibhausgaswirkungen im Straßenverkehr	37
14	Vergleich von PKW-CO ₂ -Rechnern	42
15	Konstanten für Emissionsberechnung für PKW	47
16	Strahlungsantrieb verschiedener Gase im Flugverkehr	52
17	Vergleich von Flug-CO ₂ -Rechnern	57
18	Datengrundlage Kerosinverbrauch, Strahlenbilanzfaktor	60
19	Vergleich der eigenen Flugemissionsberechnung	60
20	Treibhausgasemissionen durch Bahnverkehr	61
21	Emissionsfaktoren des ÖV	63
23	Treibhausgasemissionen bei Schifffahrt	64
22	Emissionsfaktoren für Mischnutzung des ÖV	64
24	Emissionsfaktoren Schiffstreibstoff	65
25	Klimawirkung verschiedener Prozesse nach Verkehrsmittel	66
26	Klimawirkung anderer Prozesse in CO ₂ -Äquivalenten nach Verkehrsmittel	67
27	Klimawirkung in CO ₂ -Äquivalenten nach Verkehrsmittel	68
28	Strahlungswirkung in Temperaturänderung nach Verkehrsmittel	68
29	Pearsons R für Mobilitätsgruppen	71
30	Mobilitätsprofil: Urlaubsflyer	74
31	Mobilitätsprofil: AutoenthusiastIn	75
32	Mobilitätsprofil: ÖV-NutzerIn	76
33	Mobilitätsprofil: ÖPNV und Fernzug; verbleibende Strecke	76
34	Mobilitätsprofil: Auto und ÖV; verbleibende Emissionen	77
35	Mobilitätsprofil: Auto und ÖV; verbleibende ÖV-Kilometer	77
36	Mobilitätsprofil: Mallorca-Flug; verbleibende Mobilität	78
37	Mobilitätsprofil: Rad und ÖV; verbleibende Strecke	78
38	Mobilitätsprofil: Rad und ÖV bei Frosttagen; verbleibende Strecke	79
39	Mobilitätsprofil: Pedelec und ÖV; verbleibende Strecke	80
40	Mobilitätsprofil: LangstreckenpendlerIn	81
41	Mobilitätsprofil: LangstreckenpendlerIn, verbleibende PKW-Strecke	81
42	Empfehlungsvergleich	83
43	Wahlprogramme im lexikalischen Ansatz	84
44	Punktesystem: Klimawirksamkeit der Verkehrsmittel	90
45	Punktesystem: Klimawirksamkeit von Flugzeugen nach Distanzklassen	91
46	Numerische Wertetabelle für Flugberechnung	93
47	Punktesystem (Energiegesamtbudget): Klimawirksamkeit der Verkehrsmittel	93
48	Punktesystem(Energiegesamtbudget): Klimawirksamkeit von Flugzeugen nach Distanzklassen	94
49	Jährliche Emissionsbudgets	102
50	Jährliche Emissionsbudgets	103
51	Berechnung der jährlichen Emissionsprofile	104

Glossar

Abkürzung	Begriff	Erläuterung
B2DS	Beyond 2 Degrees Scenario	Klimaszenario der [IEA 2017, 1] zum Erreichen des 1,75°C-Ziels
CCS	Carbon Capture and Storage	Technologie zum Einfangen und Speichern von CO ₂ , sodass es nicht in die Atmosphäre gelangt
CO ₂ -Äqu.	CO ₂ -Äquivalent	Maß der Klimawirkung von Treibhausgasen umgerechnet in die entsprechende CO ₂ -Menge für die gleiche Wirkung
EWF	Emission weighting factor	Emissionsgewichtungsfaktor, gibt erwärmende Wirkung auch über die reinen Treibhausgase (z.B. im Flugverkehr) als Faktor der Treibhausgasemissionen an
GWP	Global Warming Potential	Erwärmungspotential einer Treibhausgasmenge (z.B. GWP100: Wirkung über 100 Jahre)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Institution, welche von der UN zur Beantwortung von Klimafragen beauftragt wird
	Klimasensitivität	Temperaturreaktion des globalen Systems auf bestimmte Veränderungen der Treibhausgaswerte der Atmosphäre
J	Joule	Einheit der physikalischen Energie (entspricht $1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$)
kWh	Kilowattstunde	Einheit der physikalischen Energie (entspricht $3,6kJ = 3,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$)
MIV	Motorisierter Individualverkehr	Umfasst PKW, LKW, motorisierte Zweiräder (oft nur mit Straßenzulassung, Pedelecs etc. werden meist getrennt betrachtet) und weitere motorisierte Fahrzeuge, die nicht vollständig öffentlich zur Verfügung stehen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr	Öffentlich zugängliche Personentransportmittel im Nahbereich, v.a. Busse, S-Bahnen etc.
ÖV	Öffentlicher Verkehr	Öffentlich zugängliche Personentransportmittel in allen Entfernungen, z.B. Busse, Züge etc.
Pkm	Personenkilometer	Gibt die pro Person zurückgelegte Strecke in Kilometern an

Abkürzung	Begriff	Erläuterung
PKW	Personenkraftwagen	Personenverkehrsmittel, oft vierrädig, Teil des Individualverkehrs (siehe MIV)
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad	Beschreibung eines Szenarios, bei dem durch einen Verlauf der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre ein bestimmter Strahlungsantrieb (2,6/ 4,5/ 6,0/ 8,5) erreicht wird
	Strahlungsantrieb	Gibt an, wie die Energiebilanz der Erde verändert wird (in $\frac{W}{m^2}$, also Energie pro Zeit und Fläche); positive Werte bedeuten Erwärmung
t	Tonne	Einheit der Masse, entspricht 1000 kg
TTW	Tank-to-Wheel	Emissionen durch Betrieb eines Fahrzeuges ([CE DELFT 2014])
W	Watt	Einheit der physikalischen Leistung (entspricht $1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$)
WTT	Well-to-Tank	Emissionen der Herstellung/Gewinnung und Bereitstellung des Energieträgers bis zu den KonsumentenInnen ([CE DELFT 2014])

1 Grundlagen

1.1 Einleitung

Der Klimawandel ist eine große globale Herausforderung, welche die ganze Menschheit betrifft und auch ein Umdenken im Handeln auf der Ebene von Einzelpersonen benötigt. Schließlich sind schätzungsweise über 60% der Treibhausgasemissionen mit Konsumententscheidungen, also der ganz persönlichen Entscheidungsebene verbunden ([BURGUI-BURGUI, CHUVIECO 2020] NACH HARTWICH, PETERS 2009; IVANOVA ET AL. 2016). Um Entscheidungen möglichst klimafreundlich zu treffen, werden Indikatoren benötigt, die über die Folgen des Handelns klare Auskünfte geben. Des Weiteren können diese Indikatoren aber auch dazu dienen, den Erfolg von Interventionen zum Wechsel zu klimafreundlicherem Handeln selbst zu evaluieren. Sie geben also der handelnden Person eine Entscheidungshilfe, aber auch den Personen, die zu mehr emissionsarmem Handeln motivieren möchten.

Mobilität spielt dabei eine große Rolle: laut [GÖSSLING, HUMPE 2020] (nach GIROD, DE HAAN 2009) ist der Hauptunterschied zwischen Personen mit sehr hohen oder niedrigen Emissionen von Treibhausgasen deren Mobilitätsverhalten. Dabei zeigten Modellberechnungen auf regionaler Ebene wie zum Beispiel für Baden-Württemberg([BUND 2019]), aber auch global ([GIROD ET AL 2012]), dass die erforderlichen CO_2 -Reduktionen im Bereich Transport erreichbar sind, diese jedoch nicht ohne große Umstellungen in Bezug auf die genutzten Technologien, aber auch das Verhalten der Einzelpersonen mit der Reduktion der zurückgelegten Strecken, erreicht werden können. Genau diese Einzelpersonen sind es, die (jedoch eingebettet in ihr soziales, geographisches, wirtschaftliches und gesellschaftliches Umfeld) Entscheidungen treffen und somit gut informiert und motiviert sein müssen, dies klimafreundlich zu tun.

Im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 1) soll der Wissensstand über den Klimawandel und Mobilität allgemein aufgezeigt werden. Mit diesem Wissen werden Methoden vorgestellt, um ein Budget für Treibhausgasemissionen im Personenverkehr zu errechnen (Kapitel 2), wozu auch einige Annahmen getroffen und erläutert werden. Daraufhin wird in Kapitel 3 für die verschiedenen Verkehrsmittel je vorgestellt, welche Klimawirkung deren Nutzung hat. Mit den Ergebnissen der beiden vorangestellten Methoden werden dann Emissionsprofile berechnet (Kapitel 4) und zum Schluss folgen dann Empfehlungen für Indikatoren der Klimawirksamkeit von Mobilität (Kapitel 5).

1.2 Klimawandel

Der Mensch hat seit dem 20. Jahrhundert einen großen Einfluss auf das Klima genommen und so bis zum Jahr 2012 eine Erwärmung der Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche von $0,85\text{ °C}$ im Vergleich zu 1880 verursacht ([ALLEN ET AL. 2018, 1]). Die Auswirkungen sind von globalem Ausmaß, bringen steigende Meeresspiegel, Fluten, Extremwetter und vieles mehr und bedrohen die wachsende Menschheit, aber auch die Biodiversität insgesamt ([ALLEN ET AL. 2018, 1]). Mit dem Pariser Klimaabkommen wurde das Ziel gesetzt, die Erwärmungsgrenze auf $1,5\text{ °C}$ im Vergleich zur vorindustriellen Zeiten zu setzen, welche darauf basierend gewählt wurde, dass deren Überschreiten mit starken globalen Veränderungen und Kipppunkten, also nicht reversiblen Konsequenzen verbunden sein kann ([SRU 2020]). Gemessen wird dies über einen langfristigen Zeitraum und wird durch das Bilden von Mittelwerten über 30 Jahre und über Land- und Meeresflächen berechnet ([ALLEN ET AL. 2018, 1]). Dabei wurde im Vergleich zum Zeitraum 1850 bis 1900 in den Jahren 2006 bis 2015 schon eine Erwärmung von ca. $0,87\text{ °C}$ (mit einer Standardabweichung von $0,12\text{ °C}$) global gemessen, wovon im Bereich der Jahre 1890 bis 2010 höchstens $0,1\text{ °C}$ auf natürliche, nicht-anthropogene Effekte zurückgeführt werden kann ([ALLEN ET AL. 2018, 1]).

Was getan werden muss, um das $1,5\text{ °C}$ Ziel zu erreichen ist im Grundsatz eindeutig, aber im Detail deutlich komplexer: die aktuell stetig steigenden Treibhausgasemissionen müssen

drastisch und global verringert werden. Dabei besteht in Bezug auf das wichtigste Gas im anthropogenen Anteil des Treibhauseffektes (CO_2 , Kohlenstoffdioxid) ein beinahe linearer Zusammenhang zwischen den bereits ausgestoßenen Mengen an CO_2 und dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur ([SRU 2020], siehe Abbildung 1).

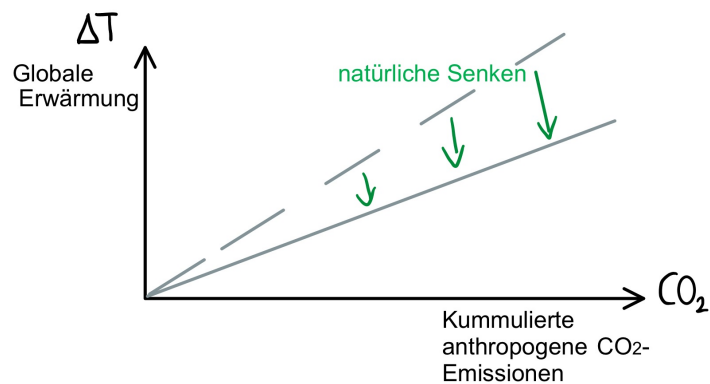


Abb. 1: Einfaches lineares Modell zur Erderwärmung: Direkter Zusammenhang zwischen CO_2 -Emissionen und der Temperaturerhöhung mit abschwächendem Effekt der natürlichen Aufnahmefähigkeit eines Teils der Emissionen, eigene Darstellung

Ca. 30% der CO_2 -Emissionen wurden von der Landbiosphäre (z.B. Photosynthese der Pflanzen, Bodenbildung) aufgenommen, weitere 24% verweilen in den Ozeanen als natürliche Senke, so dass die Steigung der Kurve verringert wird (vgl. Abb. 1, [SRU 2020]). Die menschengemachten Emissionen übersteigen diese natürlichen, aber begrenzten Aufnahmeprozesse so sehr, dass sich der Rest langfristig in der Atmosphäre anreichert ([SRU 2020]), was zu der vorher erläuterten Erwärmung des Klimas führt. Diese lineare Darstellung ist jedoch nur eine Näherung, in der Realität bestehen komplexere Zusammenhänge, da beispielsweise das Aufschmelzen von Permafrost Treibhausgase freisetzt, aber auch von der folgenden Erwärmung wiederum selbst betroffen ist und somit zu Rückkopplungseffekten führt ([ROGELJ ET AL 2019]). Dennoch kann anhand dieser Darstellung gut das Konzept eines CO_2 -Budgets erläutert werden: Einer bestimmten Temperaturzunahme kann eine bestimmte Menge an insgesamt und maximal in die Atmosphäre emittiertem CO_2 zugeordnet werden. Dabei ist es irrelevant, ob diese Menge an CO_2 , also das Budget langsam erreicht wird oder innerhalb kürzester Zeit. So lange es nicht überschritten wird kommt es also auf die Gesamtmenge und nicht so stark den Weg dahin an ([ROGELJ ET AL 2019]). Für Klimaschutzmaßnahmen heißt dies also, dass verschiedene Wege möglich sind um die Erderwärmung innerhalb bestimmter Grenzwerte zu halten und insgesamt vor allem auch auf das Gesamtbudget der emittierten Gase geachtet werden sollte.

Es bestehen verschiedene Ansätze, um diese Budgets zu erreichen. Da aktuell noch wenige effektive technologische Maßnahmen zur Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre bekannt sind, bleiben vor allem die Methoden der Mitigation und Adaption im Fokus: erstere bedeutet die Minderung bzw. das Verhindern von Treibhausgasemissionen, während die Adaption den Umgang mit Folgen des Klimawandels umfasst ([ALLEN ET AL. 2018, 1] NACH IPCC 2014). Innerhalb dieser Arbeit soll jedoch die Mitigation im Vordergrund stehen, also Methoden behandelt werden, mit denen der weiteren Klimaerwärmung entgegen gewirkt werden kann.

Nebst den Emissionsmengen und der Temperaturveränderung (wie in Abbildung 1) wird oft auch der Strahlungsantrieb (englisch: radiative forcing) als Größe genannt, welcher die Reaktion der Erde auf die Einwirkungen auf den Energiehaushalt wiedergibt ([SRU 2020]). Dieser beschreibt die physikalischen Wirkungen des Treibhauseffekts, bei welchen das Gleich-

gewicht zwischen der solaren Einstrahlung und der Ausstrahlung der Erde verschoben wird und so auf die Energiebilanz Einfluss genommen wird. Angegeben wird dies in Energie pro Zeit und Fläche. Der anthropogene Einfluss auf den Strahlungsantrieb wird (Stand 2014) mit $(2,00 \pm 0,23) \frac{W}{m^2}$ angegeben, wovon über 90% auf CO₂-Emissionen zurückzuführen ist ([SMITH ET AL 2020]). Diese Messgröße ist hilfreich für die globale Ebene, betrachtet man aber Staaten oder sogar Einzelpersonen, ist es sinnvoller deren Beitrag zum Klimawandel anhand der Treibhausgasemissionen aufzuzeichnen, welche ja im bekannten Zusammenhang mit der Strahlungsbilanz stehen. Genaueres zu diesen Gasen folgt im nächsten Abschnitt.

1.2.1 Budgets, Grenzen, Vergleichbarkeit

Im Jahr 2015 wurde das Pariser Klimaabkommen entworfen, welches von 195 Ländern mit dem Ziel der Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 1,5°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit unterzeichnet wurde ([ALLEN ET AL. 2018, 1]). Um dies zu erreichen muss klar sein, welche Emissionen in diesem Rahmen noch möglich sind.

Der anthropogene Anteil am Treibhauseffekt ist vor allem durch Kohlenstoffdioxid (CO₂) geprägt, aber auch viele weitere Aerosole und Gase müssen berücksichtigt werden ([CAIN ET AL. 2019]), da diese ebenfalls in manchen Sektoren wie der Landwirtschaft mit dem Beispiel Methan einen großen Anteil ausmachen können ([SRU 2020]) und oft bei zwar deutlich kürzeren Verweildauern in der Atmosphäre ein insgesamt höheres Erwärmungspotential als CO₂ haben ([MYHRE ET AL. 2013]). Deren Einfluss wird häufig in CO₂-Äquivalenten (auch CO_{2e} oder CO_{2equ.}) angegeben, das Erwärmungspotential wird also mit dem von CO₂ verglichen, wozu oft eine Zeitskala von 100 Jahren nach der UNFCCC (United Nations Frameworks Convention on Climate Change) verwendet wird ([CAIN ET AL. 2019] NACH ONEIL, 2000; SHINE, 2009; FUGLESTVEDT ET AL, 2003). Man kann damit angeben, welches Vielfache an Energie eine Tonne eines Gases in der Atmosphäre im Vergleich zu CO₂ absorbiert, von der Ausstrahlung ins Weltall teilweise zurückhält und somit zur Erwärmung der Erde innerhalb der nächsten 100 Jahre beiträgt. Dies vereinfacht die Frage nach klimafreundlichem Handeln auf eine einfachere Abwägung, ob ein bestimmter Wert an CO₂-Äquivalenten in den Emissionen weltweit nicht überschritten wird. Ein komplexer und spezifischer zu errechnendes Maß ist auch CO_{2fe}, welches den Strahlungsantrieb (forcing) aufgrund genauerer physikalischer Berechnungen verwendet ([CAIN ET AL. 2019]).

Die häufig verwendete UNFCCC-Variante (genannt GWP₁₀₀), welche auch im Pariser Klimaabkommen berücksichtigt wurde, ist eine relativ einfach zu handhabende Methode, die jedoch für Ungenauigkeiten in Bezug auf Temperatúrauswirkungen kritisiert wurde ([CAIN ET AL. 2019], [ALLEN ET AL. 2018, 2]). Die grundlegenden Berechnungen setzen voraus, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den kumulativen CO₂-Emissionen (bzw. auch CO₂-Äquivalent-Emissionen) und dem Strahlungsantrieb existiert. Dies ist für CO₂ auch eine gute Annahme, aber für kurzlebige Gase wie Methan besteht ein solcher Zusammenhang statt dessen zwischen dem Produkt aus Lebenszeit und Emissionsrate gegenüber dem Strahlungsantrieb ([ALLEN ET AL. 2018, 2]). Verschiedene Erweiterungen und Ergänzungen in Form eines GWP*-Modells sollen dies verbessern und gerade in Bezug auf kurzlebige Treibhausgase (sowohl deren dauerhafte Ausschüttung als auch Änderungen in deren Emissionsrate) ergänzend wirken ([CAIN ET AL. 2019]). Insgesamt besteht dabei aber noch kein großer Konsens, während sich die GWP-Methodik weitgehend etabliert hat.

Nicht nur die Gesamtheit der emittierten Treibhausgase ist ein wichtiges Maß, sondern auch der Weg dahin und die Geschwindigkeit der Emissionsreduktion ist entscheidend für die Umsetzung. Ein wichtiges Mittel zur Beschreibung verschiedener Klimaszenarien sind die repräsentativen Konzentrationspfade (RCP), deren Entwicklungsprozess von der IPCC gestartet wurde und welche auf Basis bestimmter Emissionsverläufe und Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre den zu erwartenden Strahlungsantrieb im Jahr 2100 berechnen ([VAN VUUREN ET AL. 2011]). Diese basieren auf verschiedenen Annahmen und beziehen sich

auf Modelle der Ökosysteme und des Klimas, welche das Ziel haben, deren Verhalten bei den Verläufen der CO₂-Konzentrationen vorherzusagen. Das Szenario 2.6 war mit verschiedenen Klimamodellen reproduzierbar und wird mit drei anderen ausgewählten Szenarien (4.5, 6, 8.5, [VAN VUUREN ET AL. 2011]) oft als Vergleichsgröße aktueller Emissionsentwicklungen und zur Findung von Emissionszielen herangezogen.

Aktuell sind die Emissionen (hier noch in Bezug allein auf CO₂ in Ermangelung vollständiger Datensätze in CO_{2e}*) weiterhin stark steigend und können RCP 2.6 und 4.5 übersteigen (vgl. Abb. 2). Um das Pariser Klimaziel (nach RCP 2.6) zu erreichen müssen ab dem Jahr 2020 die globalen Emissionen ihr Maximum erreichen und ab dann stetig abnehmen ([VAN VUUREN ET AL. 2011]).

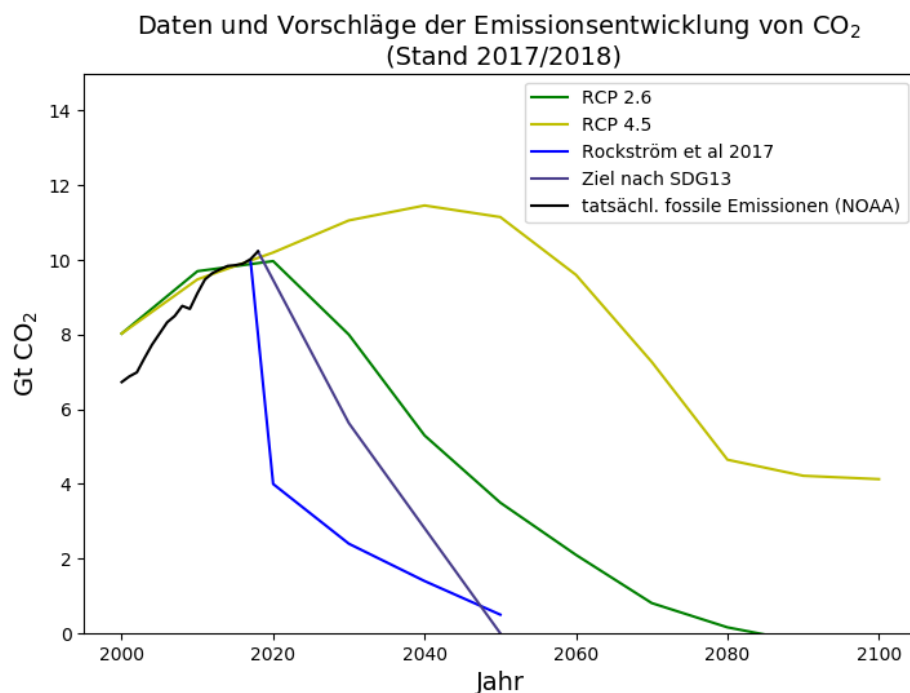


Abb. 2: Emissionstrend bisher und mögliche zukünftige Pfade, Datenquellen: [ROCKSTROEM ET AL. 2017] ,[IPCC 2013] (RCP), [UNDP 2021] (SDG13) , [NOAA 2020]

Nebst den RCP-Kurven bestehen Vorschläge aus der Wissenschaft um grob abzustecken, welche Ziele gesetzt werden sollten und welche teils deutlich stärkere Minderungen der Emissionen fordern (vgl. [ROCKSTROEM ET AL. 2017]). Insgesamt haben die Ziele und die RCP-Kurven eine weite Spannbreite der Emissionsverläufe und somit auch der resultierenden Erwärmung. Um eine maximale Erderwärmung unter 2°C zu ermöglichen (Zweidrittel Sicherheit), nennen [ALCARAZ ET AL. 2018] ein CO₂-Budget von maximal 1,8 Tt CO₂-Äquivalent für den Zeitraum 2000 bis 2049 und einem angestrebten Wert von 4,3 tCO_{2,aequ.} im Jahr 2030. Der aktuelle Stand ist also, dass bereits mehr als Zweidrittel der CO₂-Emissionen, die nicht überschritten werden sollten, bereits emittiert sind und nach grober Schätzung bei weiteren Emissionen wie bisher in den nächsten ca. 25 Jahren diese Grenze schon überschritten würde ([MCKINNON 2015] NACH ROGELJ ET AL, 2013). Aktuellere Zahlen auf Basis von Daten des IPCC gehen von ab 2018 verbleibenden 420 Gt CO₂ für eine Zweidrittelsicherheit, das 1,5°C-Ziel zu erreichen und 800 Gt CO₂ für 1,75°C ([SRU 2020]) aus. Bei all diesen Emissionsbudget liegen jedoch in der Berechnung große Unsicherheiten vor: ein Emissionspfad wird vermutlich nie exakt eingehalten werden, sodass dies stetig an die neuesten Daten angepasst werden muss und zweitens ist die Temperaturerhöhung bei Erreichen einer bestimmten Treibhausgaskonzentration und eines Strahlungsantriebswertes nicht exakt vorhersagbar ([RYPDAL ET AL 2020]).

Für Deutschland sieht die aktuelle Entwicklung der Treibhausgasemissionen leicht absinkend, aber fern der selbst gesteckten Ziele aus.

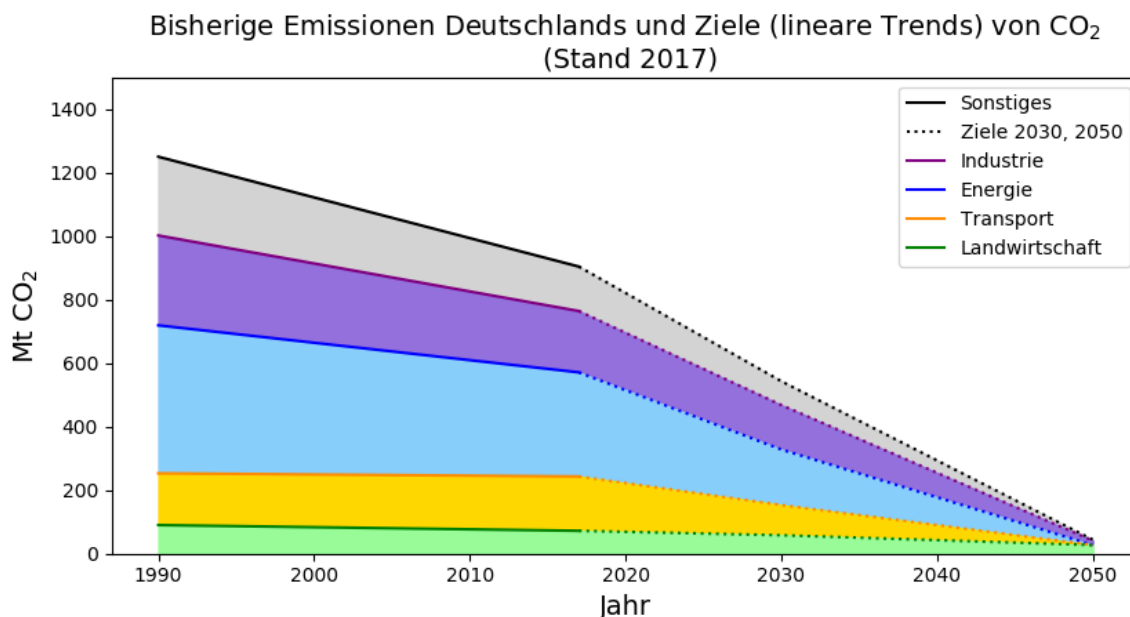


Abb. 3: Emissionstrend nach Sektor für Deutschland und angestrebte Ziele, eigene Darstellung, Datenquelle: [SRU 2020]

Diese Ziele wurden als nationaler Beitrag zu den Pariser Zielen gesetzt. Der Klimaschutzplan der deutschen Bundesregierung sieht im Verkehrssektor bis 2030 eine Reduktion der Treibhausgase um 40 bis 42 % im Vergleich zu 1990 vor, wobei der international Flugverkehr extra und auf EU-Ebene betrachtet wird und dort ebenfalls dem Ziel von -40 % im Vergleich zu 1990 unterliegt ([BMU 2019, 1]). Tatsächlich wurde auch das Ziel erreicht, im Jahr 2020 40% weniger Treibhausgase zu emittieren als im Jahr 1990, was aber auch erst durch die Einschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie erreicht werden konnte ([AGORA ENERGIEWENDE 2021]). Dies reicht jedoch nicht aus, da die global zu erwartende Erwärmung, wenn alle Länder die gleichen Ziele pro Person wie die EU auf deren Treibhausgasziele umsetzen würden bei 3,2°C liegen würde und die nationalen Ziele der Länder, welche das Pariser Klimaabkommen ratifiziert haben liegen ebenfalls in einem Bereich, dass ca. 3°C Erwärmung erreicht würde ([SRU 2020]). Und allein die 15 Länder mit den größten Emissionen überschreiten nach deren nationalen Zielen 2030 den Pfad des RCP 2.6 Pfades, welcher die Erfüllung des Klimaabkommens ermöglichen würde ([ALCARAZ ET AL. 2018]).

Die genaue Verteilung des CO₂-Budgets beinhaltet einige komplexe Abwägungen, welche in Abschnitt 2.1.3 behandelt werden. Der Deutschland bei einer pro-Kopf-Gleichverteilung zustehende Anteil an den noch verbleibenden Emissionen liegt bei 9,7 Gt CO₂ ab 2016 ([SRU 2020]) um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, wovon in den Jahren 2017 bis 2020 aber weitere etwa 3771 Millionen Tonnen emittiert wurden ([AGORA ENERGIEWENDE 2021], [SRU 2020]), sodass ca. **5,9 Gt CO₂ noch ab dem Jahr 2021** übrig bleiben. Dies deckt sich nicht mit den aktuellen deutschen Klimazielen (vgl. Abbildung 3), welche ein Budget von ca. 15,3 Gt CO₂ ab 2018 bei einem linearen Erreichen der jeweiligen Ziele für 2030 und 2050 bedeuten würden ([SRU 2020]).

1.2.2 Stand Verkehrsemissionen

In Deutschland basierte im Jahr 2018 90 % des Energieverbrauchs für Verkehr auf Erdöl und sorgte damit für Emissionen von ca. 162 Mt CO₂-Äquivalent ([BMU 2019, 1]). Weltweit sind ca. 25% der CO₂-Emissionen durch den Transportsektor verursacht, welcher der einzige Sektor mit stark wachsenden Emissionen ist (44% mehr CO₂ im Jahr 2010 als noch 1973), da die steigende Nachfrage technologische Verbesserungsmöglichkeiten weit übersteigt ([BANISTER ET AL. 2012] NACH IEA 2011). Und betrachtet man die EU-weiten Emissionen im Jahr 2019, so waren für den Transport ca. 832 Mt CO₂-Äquivalent freigesetzt worden, welche sich zu fast 99% aus CO₂ selbst, 1,2 Mt CO₂-Äquivalent an CH₄ und 7,8 Mt CO₂-Äquivalent an N₂O zusammensetzten ([EEA 2020], siehe Abb. 4).

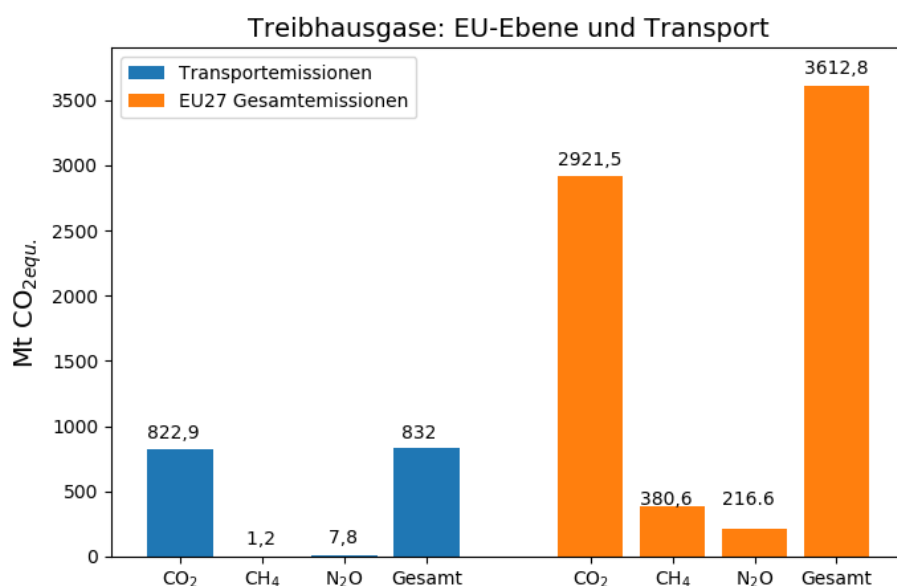


Abb. 4: Emissionen von Treibhausgasen auf EU27 Ebene (je umgerechnet in CO₂-Äquivalente), eigene Darstellung, Datenquelle:[EEA 2020]

Andere Gase sind somit nur zu einem geringen Maße ausschlaggebend bei der Betrachtung von insbesondere Transportemissionen, da diese auch im Vergleich zu den europäischen Gesamtemissionen im Verkehr stark unterrepräsentiert sind (CH₄: ca. 11% der EU-Gesamtemissionen, unter 1% der Verkehrsemissionen; N₂O: ca. 6 % der EU-Gesamtemissionen, unter 1% der Verkehrsemissionen, vgl. Abb. 4). Somit ist es im Rahmen der häufig großen Unsicherheitsintervalle bei der Modellierung (vgl. CO₂-Budgets mit 67%-Sicherheit) langfristiger Klimaveränderungen hier also nur ein kleiner Fehler von ca. 1,1% der Emissionen, wenn bei den Verkehrsemissionen der Fokus nur auf CO₂ gesetzt wird.

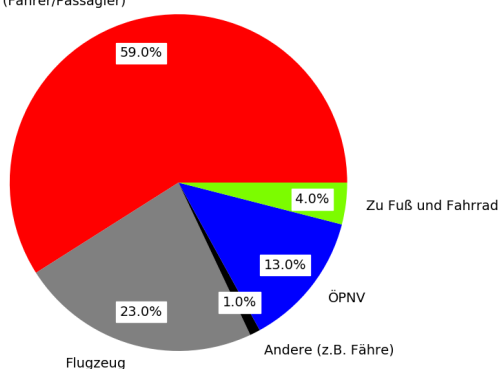
Dies bestätigt sich auch in Hinblick auf die Berechnungen des RCP 2.6 Szenarios, bei welchem die Pariser Klimaziele ohne große Reduktion von N₂O auskommen und in dem der Transport eine wichtige Rolle nur bei der Reduktion der CO₂-Emissionen spielt ([VAN VUUREN ET AL. 2011]). Die Einsparungen bei SO₂ sind dabei vor allem der Reduktion von Kohleverbrennung zuzuschreiben, während beim Transport durch den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Treibstoffe flüchtige organische Verbindungen reduziert werden können ([VAN VUUREN ET AL. 2011]). Um zu verhindern, dass ein Anstieg dieser anderen Gase in Kauf genommen wird, kann die Umrechnung in CO₂-Äquivalente aber weiterhin hilfreich sein. Wenn Mobilitätsverhalten aber nach der Klimawirkung bewertet wird, ist die Reduzierung von CO₂-Emissionen das sinnvollste Hauptziel.

Wie dieses Ziel aussehen kann ist sehr unterschiedlich: Die Bundesregierung fordert im Jahr 2030 Emissionen unter 95 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent als Ziel, während eine Studie mehrerer Institute zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens die Grenze bei 89 Millionen t CO₂-Äqu. setzt ([PROGNOS, ÖI, WI 2020]). Mehr folgt dazu im Kapitel über die Budgets.

1.3 Mobilität

In Bezug auf das Mobilitätsverhalten wird dabei im weiteren Verlauf in die verschiedenen Verkehrsmittel unterteilt. Während 2008 in Deutschland die Nutzung von PKW fast 60% der Strecken ausmachte (vgl. 5), bedeutete der Flugverkehr jedoch einen deutlich überproportionalen Anteil an der Klimawirkung (vgl. 6) ([AAMAAS ET AL. 2013]).

Anteil an den gereisten Kilometern in Deutschland (2008)
PKW (Fahrer/Passagier)



Anteil an den Klimawirkungen von Reisen in Deutschland (2008)
PKW (Fahrer/Passagier)

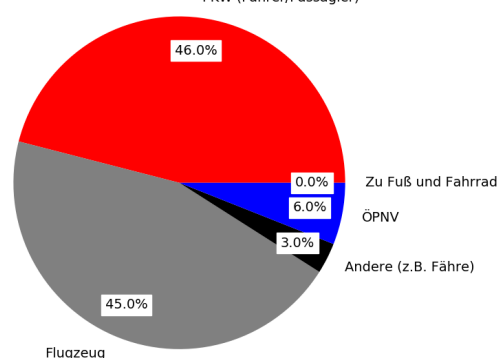


Abb. 5: Prozentuale Mobilitätsvolumenanteile der Verkehrsmittel in Deutschland 2008, eigene Darstellung, Daten: [AAMAAS ET AL. 2013] nach FOLLMER ET AL. 2010

Abb. 6: Prozentuale Klimawirkungsanteile der Verkehrsmittel in Deutschland 2008, eigene Darstellung, Daten: [AAMAAS ET AL. 2013] nach FOLLMER ET AL. 2010

Dies bedeutet also, dass Handlungsempfehlungen klare Unterscheidungen des jeweilig genutzten Transportmittels umfassen müssen. Zunächst aber wird auf Seiten der Personen, welche die Verkehrsmittel nutzen anhand des Zwecks unterschieden.

Reisen Rund 78% der deutschen Bevölkerung ging im Jahr 2019 auf mindestens eine Urlaubsreise ([FUR 2020]). Reisen können als Ortsveränderungen von Personen zu privaten oder beruflichen Zwecken, deren Ziele außerhalb des gewöhnlichen Umfeld liegen” ([SCHULZ ET AL 2020], S.14 NACH UNITED NATIONS, 2016) aufgefasst werden. Flugzeuge sind beinahe ausschließlich ein Reiseverkehrsmittel, da über 99% der Flugkilometer zur Beförderung einer Person zu Reisezwecken, also nicht für alltägliche Wege zurückgelegt werden, während dies beispielsweise beim motorisierten Individualverkehr nur ca. 39,6 % sind ([SCHULZ ET AL 2020]). Nach einer Befragung in Deutschland für den Zeitraum Dezember 2017 bis Dezember 2018 waren ca. 20% der Reisen mit dem Flugzeug zurückgelegt worden, bei 57% PKW-Nutzung ([SCHULZ ET AL 2020]). Dabei stellen private Reisen mit Ziel in der EU über 50% der Flüge dar (Abbildung 7). Insgesamt besteht ein großer Anteil der Flugreisen aus privaten Reisen, welche der (oft) freien Entscheidung der Personen unterliegen. So war es 2019 nur knapp hinter dem MIV das zweitmeiste Reiseverkehrsmittel der Deutschen mit 42% Anteil ([FUR 2020]). Hier kann also ein Bewusstsein bezüglich der Treibhausgasemissionen und des Klimawandels gut ansetzen,

Aus Deutschland startende Flugreisen nach Zielland und Zweck

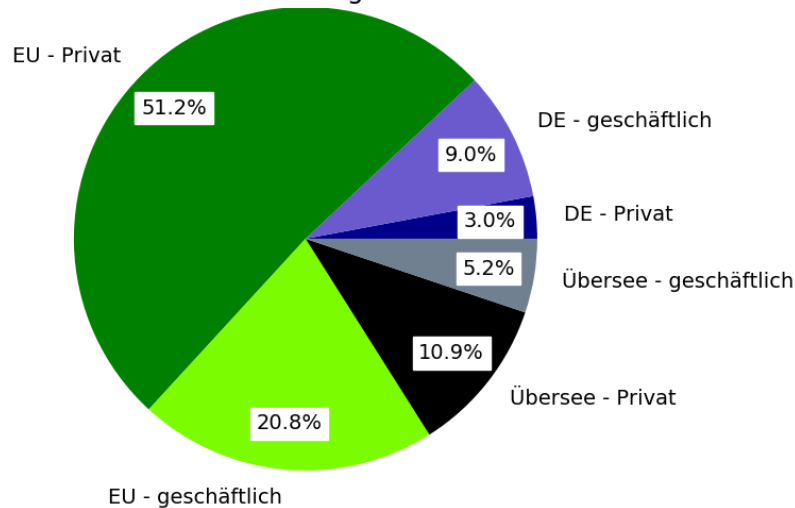


Abb. 7: Flugreisen aus Deutschland, eigene Darstellung, für das Jahr 2017, Datenquelle: [SCHULZ ET AL 2020]

da bei privaten Reisen weniger auf externe Meinungen und Interessen wie die von Arbeitgebern geachtet werden muss. Bei der Betrachtung von Reisen nehmen Flüge also in Deutschland eine große Rolle ein nebst den PKW. Betrachtet man dies international, so sind ca. 10% der Transportkilometer weltweit durch Flugzeuge verursacht ([BOWS-LARKIN ET AL. 2016] nach AVIATION TRANSPORT ACTION GROUP, 2014) und der Personentransport damit setzte sich zusammen aus ca. 52% aus Gründen der Erholung und 14% aus beruflichen Gründen, der Rest für Besuche oder z.B. aus gesundheitlichen Gründen ([BOWS-LARKIN ET AL. 2016] nach UN WORLD TOURISM ORGANIZATION, 2014). Auch global ist das Flugzeug also ein Reiseverkehrsmittel und seltenst ein Mittel des regelmäßigen Pendelns. Flugreisen sind also eher Einzelevents ohne eine feste Gewohnheitsstruktur, welche aufgrund ihrer Klimawirkung aber dringend zu betrachten sind. Auch PKW spielen eine große Rolle, da beispielsweise 2019 knapp 43% der Reisen mit dem MIV zurückgelegt wurden, während Bus und Bahn nur auf je 6% kamen ([FUR 2020]).

Alltagsmobilität Der Weg zu Schule, Arbeit oder zum Einkaufen ist nur ein Teil der alltäglichen Verkehrsbewegungen vieler Menschen. Dabei haben im Jahr 2017 in Deutschland Personen durchschnittlich über 3 Wege pro Tag zurückgelegt mit einer mittleren Tagesstrecke von 39 km ([NOBIS ET AL. 2019]). Das waren im Vergleich zu 2002 und 2008 eine geringere Anzahl an Wegen, aber dafür eine längere Strecke und Zeit im Schnitt. Diese Steigerung der zurückgelegten Kilometer führte zu einer Zunahme vor allem im Öffentlichen Fern- und Nahverkehr, dem Fahrrad und dem motorisierten Individualverkehr, wobei letzterer deutlich über die Hälfte der Personenkilometer ausmachte ([NOBIS ET AL. 2019]). Dabei wurden 98 Millionen Wege pro Tag für Einkauf, Erledigungen und Begleitung zurückgelegt, gefolgt von 87 Millionen zur Arbeit oder Ausbildung, wobei letztere Kategorie innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte eine Steigerung von fast 20 % hatte ([NOBIS ET AL. 2019]). Es gibt also ganz verschiedene Gründe für die alltägliche Fortbewegung, welche auch insgesamt eine Steigerung erfahren und doch oft auf ähnliche Verkehrsmittel zurückgreifen lassen. Für die Alltagsmobilität sind gerade der ÖPNV, der MIV und nicht motorisierte Arten der Fortbewegung zu betrachten, wobei gerade die Fahrten mit dem Auto sowohl einen großen Anteil der Strecken, als auch der

Treibhausgasemissionen ausmachen ([AAMAAS ET AL. 2013], [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]).

Restliche Mobilität Betrachtet man die dienstlich zurückgelegten Wege, also Arbeitsfahrten, so sind diese sogar zu 76 % im Jahr 2017 mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückgelegt worden ([NOBIS ET AL. 2019]), wobei diese Wege meist für den Transport von Waren oder zum Erbringen einer Dienstleistung zurückgelegt werden. Zudem ist davon auszugehen, dass beispielsweise die Person, die einen LKW dienstlich fährt, keinen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittel hat.

Diese ganze Kategorie nimmt einen großen Anteil am Verkehr ein, dennoch werden diese dienstlichen Fahrten wie im Güterverkehr in dieser Arbeit nicht explizit behandelt, da es sich dabei nicht um die persönliche Entscheidung, sich auf den Weg zu machen handelt, sondern Personen bei Kaufentscheidungen sich beispielsweise gezielt für regionale Produkte entscheiden können, um die Wege des Produkts zu verkürzen. Dies ist jedoch eine anderer großer Themenkomplex, der hier nicht mit einbezogen werden kann.

2 Berechnung eines pro-Kopf-Budgets für den Personentransport

In diesem Kapitel wird nun ein Handlungsrahmen ermittelt, der angibt, wie Mobilität von Einzelpersonen aussehen darf, um bestimmte Ziele der maximalen Erderwärmung zu erreichen. Zunächst müssen verschiedene Fragen der Verteilung und Zuordnung von Emissionen geklärt werden, Daraufhin können dann die konkreten Berechnungen anhand verschiedener Emissionspfade erfolgen und es wird anhand der Ergebnisse ein Zwischenfazit gezogen, das für die weitere Arbeit ein nutzbares Budget festlegt.

2.1 Verantwortung und individuelle Ebene

Um die Klimaziele zu erreichen, müssen CO₂-Emissionen limitiert werden. Und wie bei allen knappen Gütern stellt sich global betrachtet die Frage der gerechten Verteilung und der Verantwortung von Emittenten gegenüber den davon betroffenen Personen ([MCKINNON 2015]). Nicht nur zwischen Nationen, sondern zwischen einzelnen Personen unterscheidet sich der Beitrag zur globalen Erwärmung, sodass auch Verantwortung diese individuelle Basis nicht umgehen darf, so [GÖSSLING, HUMPE 2020] (nach CHAKRAVARTY ET AL. 2009). In einer Schweizer Studie konnte ausgemacht werden, dass ein großer Anteil des Unterschieds zwischen Menschen mit hoher oder niedriger Verursachung klimarelevanter Gase daran liegt, dass Menschen mit hoher Emission auch stark mobil sind ([GÖSSLING, HUMPE 2020]). Transport spielt also eine große Rolle bei der individuellen Betrachtung der Emissionen Einzelner, gleichermaßen ist jedoch die Rolle der Einzelnen für die Erreichung von Klimazielen stark relevant.

Mit dem in Abschnitt 2.2 ermittelten persönlichen Fußabdruck wird jede Einzelpersonen dafür verantwortlich die eigenen Emissionen niedrig und innerhalb des genannten Bereichs zu halten. Wird dieser Wert von allen nicht überschritten, so kann das Pariser Klimaziel eingehalten werden. Gleichzeitig stehen jedoch auch andere Verteilungsmöglichkeiten dieses Gesamtemissionsbudgets auf nationaler, globaler, bis hin zur situationsspezifischen Ebene noch offen und müssen abgewägt werden.

2.1.1 Intersektorale Aufteilung

Die Aufteilung der Treibhausgasreduktionsziele kann auf unterschiedliche Weise über verschiedene Sektoren wie den Verkehr oder die Landwirtschaft erfolgen ([ROGELJ ET AL 2018]). Dabei können viele Faktoren wie die wirtschaftliche oder soziale Bedeutung des Sektors, aber auch die technischen Möglichkeiten und emissionsarmen Alternativen betrachtet werden und miteinander abgewogen werden. Es gilt aber: „*choices in one sector affect the efforts that are required from others*“ ([ROGELJ ET AL 2018], S.112; nach CLARKE ET AL 2014), also innerhalb eines festen Budget bedeuten beispielsweise große Emissionen in der Landwirtschaft, dass der Industriesektor weniger Treibhausgase ausstoßen darf. Der Verkehrssektor nimmt neben der Industrie gerade im Unterschied zwischen Emissionspfaden mit dem Ziel von maximal 2°C im Vergleich zu denen mit 1,5°C globaler Erderwärmung eine wichtige Rolle ein und muss dann noch eine deutliche Emissionsreduktion beisteuern ([ROGELJ ET AL 2018] nach LUDERER ET AL. 2018). Für die spätere Berechnung der Budgets kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, welche Anteile den Sektoren zugeschrieben werden müssen, da verschiedene Aufteilungen zum gleichen Ziel führen können. Dementsprechend muss beispielsweise auf Basis der aktuellen Situation in einem Land entschieden werden, wie wichtig, aber auch wie einfach dekarbonisierbar dort der Verkehrssektor ist.

2.1.2 Persönliche Voraussetzungen - nationale Perspektive

Gerade Personen mit hohem Bildungsabschluss sind sich zwar der Klimawirkung bewusst und entscheiden sich in skandinavischen Ländern auch häufig für ein E-Auto statt für eines mit Verbrennungsmotor, haben aber dennoch den größeren CO₂-Footprint aufgrund der höheren Mobilität insgesamt und gerade Personen die arbeitstätig sind legen allein durch das Pendeln zum Arbeitsplatz oft größere Strecken im Schnitt zurück ([SOVACOO ET AL. 2018]). Dabei ist in Bezug auf die Alltagsmobilität auch in Deutschland erkennbar, dass gerade Menschen mit hohem ökonomischen Status ein deutlich ausgeprägteres Mobilitätsverhalten als Geringverdiener haben ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Also sind Personengruppen mit einem häufiger gesicherten und höheren Einkommen diejenigen, bei denen die finanzielle Situation auch Investitionen in alternative Transportoptionen ermöglichen könnte, dennoch sind sie auch diejenigen mit dem klimaschädlicheren Verhalten. Auch eine steigende Personenanzahl im Haushalt geht mit einer überproportionalen Steigerung des CO₂-Ausstoßes einher, wenn das Beispiel betrachtet wird, dass Zwei-Personen-Haushalte in einer Studie in nordeuropäischen Ländern die dreifachen Emissionen für Mobilität hatten im Vergleich zu Ein-Personen-Haushalten ([SOVACOO ET AL. 2018]). Auch diese können durch das Aufteilen von Investitionen auf zwei Personen (wenn beide ein Einkommen haben) leichter den Umstieg auf erneuerbare Technologien finanzieren.

Hier schafft innerhalb eines finanziell gut dastehenden Landes wie Deutschland der Budgetansatz der pro-Kopf-Gleichverteilung eine interne Gerechtigkeit und nimmt alle gleichermaßen in Verantwortung: Personen mit Haushaltseinkommen unter 1300 Euro verursachen schon unter 1,5 t CO₂ an Verkehrsemissionen jährlich, was immer noch weit über dem hier berechneten Budget liegt, die Gruppe mit über 2551 Euro überschreitet diese Grenze an 1,5 t CO₂ aber allein schon mit ihren Flugemissionen und liegt mit den Gesamtverkehrsemissionen auf über 3,75 t CO₂ ([FREY ET AL. 2020] nach DLR 2019). An sich wirkt es also zunächst „einfacher“ für Personen mit niedrigerem Einkommen die CO₂-Budgetgrenzen zu unterschreiten,

allerdings ist das Autofahren teils die einzige und oft die günstigste Option in Deutschland, da es hier im europäischen Vergleich relativ günstig ist ([FREY ET AL. 2020]). Es könnte auch argumentiert werden, dass Personen ohne Arbeitsplatz zwar ein geringeres Gehalt haben, aber zumindest die Mobilität zum Arbeitsplatz nicht benötigen, dies trifft jedoch auch auf Vielverdiener im Homeoffice zu. Hier wird im weiteren der gleiche Anspruch an alle Personen gestellt, die persönlichen Treibhausmissionen gleichermaßen unterhalb der vorher berechneten Grenze zu halten, da politische Instrumente zu einem besseren Zugang zu klimafreundlicheren Verkehrsmitteln führen und zum Ausgleich in Form von sogenannten Klimaprämien einen sozialen Ausgleich schaffen können ([FREY ET AL. 2020]). Eine größere finanzielle Beteiligung von Gruppen mit hohem Einkommen am Umstieg auf eine nachhaltige Verkehrssituation ist also unterstützenswert, eine Anpassung des CO₂-Budgets an das Gehalt ist aber nicht nur sehr komplex, sondern wirft deutlich mehr Gerechtigkeitsfragen auf, als es löst.

2.1.3 Klimagerechtigkeit global

Nach der Betrachtung auf nationaler Ebene in Bezug auf ein Land wie Deutschland, das in der Industrialisierung seinen Wohlstand durch eine Wirtschaft mit hohen Treibhausgasemissionen erzeugen konnte, stellt sich nun auch die Frage nach der globalen Gerechtigkeit zwischen den Staaten. Das Pariser Klimaabkommen zielt dabei mit dem Begriff der „equity“ (vgl. [UN 2015] Art.2, Absatz 2) auf eine gerechte Verteilung der Klimabemühungen ab ([ALLEN ET AL. 2018, 1]). Dabei sollen die Bekämpfung von Armut und die Förderung nachhaltiger Entwicklung mit einbezogen und mitgedacht werden ([ALLEN ET AL. 2018, 1]).

Die Klimaziele fordern Grenzen der Emissionen von Treibhausgasen, die global eingehalten werden und auf nationaler Ebene umgesetzt werden sollen (vgl. [BMU 2019, 1]). Eine einfache Umsetzung wäre dabei also die Aufteilung wie sie in Kapitel 2.2 erfolgt. Dabei entsteht jedoch die Gerechtigkeitsfrage, da einzelne Länder und Personen bereits einen deutlich größeren Anteil der globalen Emissionen verursacht haben und die entsprechenden Personengruppen Privilegien dadurch bekämen, während andere z.B. in weniger entwickelten Ländern die Folgen stärker spüren ([MCKINNON 2015], [ALLEN ET AL. 2018, 1]). Nun aber darauf zu schließen, dass den Personen des globalen Südens die restlichen CO₂-Emissionen zur Energiegewinnung zustehen würde jedoch übersehen, dass innerhalb dieses Jahrhunderts die komplette Dekarbonisierung auch dort statt finden sollte um einen weiteren globalen Temperaturanstieg über die 2°C hinaus zu stoppen. Deshalb kann für den Ausbau von erneuerbaren Energien gerade in sich entwickelnden Wirtschaftsregionen plädiert werden.

[MCKINNON 2015] nennt drei Dimensionen der Klimagerechtigkeit in Bezug auf CO₂-Budgets: Verteilung, Ausgleich und Justiz. So solle die Zuteilung der verbleibenden Emissionsbudgets, der Ausgleich von bisherigen Emittenten zu den durch den Klimawandel Schaden nehmenden und die rechtliche Verurteilung von Handeln gegen die Gemeinschaft bei Klimafragen gerecht gestaltet werden.

Auf der zeitlichen Ebene kann keine volle Gleichheit geschaffen werden, da die in der Vergangenheit geschehenen Emissionen nicht einer jeden nachfolgenden Generation in dem Maße zustehen kann, ohne dass die Klimaerwärmung weiter angetrieben würde. Der Nachhaltigkeitsgedanke nach dem Brundlandt Report basiert darauf, die Bedürfnisse der eigenen Generation so zu decken, dass die nächsten Generationen dies ebenfalls noch können ([BOUMA 2014]). In der Vergangenheit wurde jedoch nicht nachhaltig gehandelt, es kann aber auch schlecht rückwirkend

ein Ausgleich statt finden. Was jedoch räumlich ausgeglichen werden könnte, sind die aus den Emissionen hervorgehenden Vor- und Nachteile: also das gemeinsame Tragen der Schäden durch die Erderwärmung und die Beteiligung Benachteiligter an den Gewinnen aus dem Wirtschaften mit hohem Treibhausgasausstoß. Doch bezieht man sich auf [MCKINNON 2015], so ist dies nur eine der drei Dimensionen, während gerade die Verteilungsfrage offen bleibt und auch hier nur schwierig beantwortet werden kann.

Klar bleibt jedoch: für jede Person sollte jedes Jahr ein persönliches Maximum definiert sein, was der jährlich verfügbaren CO₂-Emissionen geteilt durch die Anzahl der Menschen weltweit, denn dies ist die Grenze, die nicht überschritten werden darf. In Ländern, die seit der Industrialisierung schon viele Treibhausgase ausgestoßen haben liegt der Durchschnittsmensch weit über dieser Grenze, sodass dieses gerade ausreichende Ziel schon schwer erreichbar ist (vgl. [BMW 2020]). So emittierte die EU im Jahr 2014 ca. 11% der globalen Emissionen, es würden ihr aber bei dieser pro-Kopf-Gleichverteilung nur noch 6% zu stehen ([SRU 2020] NACH RAUPACH ET AL. 2014). Darüber hinaus sollten durch vergangene Emissionen privilegierte Gruppen besonders den Auftrag darin sehen, den Umstieg auf emissionsneutrales Wirtschaften gerade auch für weniger privilegierte Gruppen zu ermöglichen. Vergangene Emissionen sind nicht einfach wieder rückgängig zu machen, aber der Wandel zu emissionsfreien Technologien sollte von den Nationen stärker getragen werden, die davon in der Vergangenheit profitiert haben. Reduziert man das ökonomische Ungleichgewicht zwischen den Staaten dieser Welt, so kann dadurch ökonomisches Wachstum von einem Wachstum der Treibhausgasemissionen entkoppelt werden, da die ersten Aufstiegsschritte aus dem Niedrigeinkommen für Länder bis jetzt immer mit vielen Emissionen verbunden sind ([ROY ET AL 2018]). Dies ist vergleichbar mit der europäischen Industrialisierung, die bereits für den Aufbau von Wohlstand viel emittierte. Durch gezielte Investitionen kann dieser Schritt aber quasi übersprungen werden. Dies alles erlaubt weiterhin für eine pro-Kopf-Gleichverteilung zu argumentieren, denn würden alle ärmeren Länder jetzt zunächst noch viele Emissionen zulassen, würde dies einen Einstieg in eine wenig zukunftsfähige Industrie bedeuten (starke Abhängigkeit von fossilen Energieträgern führt nach [ROY ET AL 2018] zu größeren Problemen und Auswirkungen der Umsetzung von Klimazielen), während Aufschwung mit nachhaltigeren Methoden möglich sein kann. Die Nationen mit Wohlstand der auf Basis hoher historischer Emissionen entstanden ist, sollten sich aber besonders der Verantwortung einer schnellen Dekarbonisierung verpflichtet sehen und dabei sowohl Vorreiter sein, als auch andere Länder dabei unterstützen.

2.2 Gleichverteilung bei RCP 2.6 bzw. RCP 3PD

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen gibt es feste Emissionsgrenzen von Treibhausgasen, die nicht überschritten werden sollten (vgl. [SRU 2020], [ALCARAZ ET AL. 2018]). Diese Budgets sind meist für einen Gesamtzeitraum definiert (also z.B. bis 2050), was es für die Einzelperson jedoch schwierig zu überblicken macht. Man müsste dann ein jährliches Emissionstagebuch führen um bis zu diesem Zieljahr sein Gesamtbudget nicht zu überschreiten. Stattdessen ist es deutlich übersichtlicher jedes Jahr einzeln zu bilanzieren, was auch viele CO₂-Rechner online so handhaben ([UMWELTBUNDESAMT 2021, 1], [MITCHELL 2009], [CARBON FOOTPRINT 2021]). Zudem spielt die Verteilung der Emissionen über die Jahre auch eine große klimatische Bedeutung: Würde das komplette Treibhausgasbudget innerhalb kürzester Zeit verbraucht, bedeutete dies selbst bei CO₂-Neutralität in den darauffolgenden Jahren eine stärkere Belastung aufgrund der

plötzlich hohen Konzentration auch vieler kurzlebiger Gase und bei einem starken Überschreiten des 1,5°C-Ziels auch den dringende Bedarf an Maßnahmen zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre ([IPCC 2018, 1]). Das RCP 2.6-Szenario bedeutet nicht nur mit hoher Sicherheit, dass am Ende dieses Jahrhunderts das Pariser Klimaziel erreicht wird, sondern auch der Weg dort hin ohne das Überschreiten der Erwärmungsgrenze von 2°C auskommen kann ([VAN VUUREN ET AL. 2011]). Die entsprechenden Modellrechnungen zeigen die Umsetzbarkeit bei einer Beteiligung aller Länder ([VAN VUUREN ET AL. 2011]).

Auf Basis eines solchen Emissionspfades soll nun also der jährlich noch verfügbare Emissionsanteil berechnet werden und weltweit (entsprechend der Bevölkerungsgröße) damit ein pro-Kopf-gleichverteiltes Budget erzeugt werden:

Anhand des mittleren Modells der UN zur Entwicklung der Weltbevölkerung („Medium Variant“, [UN 2019]) kann der jeweilige Anteil einer Einzelperson an der Weltbevölkerung abgeschätzt werden (siehe auch Code in Anhang Abschnitt 7.1). Dies sollte in Zukunft auch an die tatsächliche Entwicklung angepasst werden, da bereits aktuelle Abschätzungen davon ausgehen, dass die UN-Daten eine Überschätzung des Bevölkerungswachstums enthalten([BURGESS ET AL. 2021]), aktuellere Daten liegen allerdings noch nicht vor. Der hier verwendete RCP 3PD Pfad bedeutet dabei einen Verlauf mit „Peak and Decline“([MEINSHAUSEN ET AL. 2011]), also einem Überschreiten des Strahlungsantriebs von $2,6 \frac{W}{m^2}$ der dem RCP 2.6-Pfad zugrunde liegt, aber mit dem gleichen schlussendlichen Ziel im Jahr 2100.

Dies ist ausreichend für die Klimaziele nach Paris, aber gerade im Bereich des „Peaks“ ein Maximum der beim strengen 1,5°C-Ziel verkraftbaren Emissionsmengen.

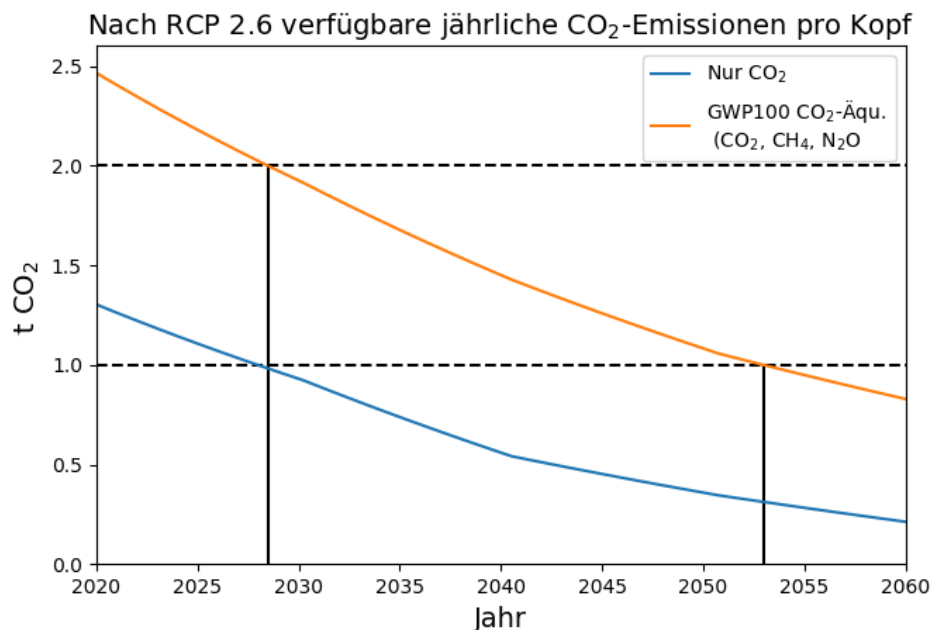


Abb. 8: Emissionsbudget pro Person bei pro-Kopf-Gleichverteilung, eigene Darstellung, Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019]

Nimmt man die Emissionsverläufe nach RCP 3PD ([MEINSHAUSEN ET AL. 2011] nach [VAN VUUREN ET AL. 2007]) sowie die Umrechnungsfaktoren nach GWP100 (GWP100* ist noch nicht mit guter Datenbasis verfügbar) aus dem fünften IPCC Bericht ([MYHRE ET AL. 2013]) als Grundlage

([MEINSHAUSEN ET AL. 2011]) und teilt diese durch die prognostizierte Bevölkerung, so erhält man die in Abbildung 8 dargestellten jährlich noch verfügbaren Emissionen.

	2021	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
t CO ₂	1,26	1,18	1,10	0,92	0,72	0,54	0,44	0,35	0,27
t CO ₂ -Äqu.	2,40	2,28	2,17	1,91	1,66	1,43	1,23	1,06	0,93

Tab. 1: Emissionsbudget (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019]

Die Berechnung folgt grob folgendem Prinzip:

$$proKopfEmissionen = \frac{(CO_2MengenachRCP)}{Weltbevoelkerung}$$

bzw. für CO₂-Äquivalente:

$$proKopfEmissionen = \frac{(CO_2) + (CH_4 \cdot Umrechnungsfaktor_{CH_4}) + (N_2O \cdot Umrechnungsfaktor_{N_2O})}{Weltbevoelkerung}$$

Mit den Daten zur deutschen Bevölkerung ([DESTATIS 2019]) ergibt sich so ein an die Bevölkerungsprognose angepasstes CO₂-Äquivalent-Budget von ca. 5,0 Gigatonnen der Jahre 2021 bis 2060, was mit den Werten der [SRU 2020] vergleichbar ist. Dabei wird allerdings vernachlässigt, dass zum jetzigen Zeitpunkt die RCP-Kurve nicht eingehalten wurde. Diese schon geschehenen Emissionen erhöhen also das Risiko bereits, das 1,5°C-Ziel zu verpassen, lassen sich jedoch nicht so einfach in diese Werte mit einrechnen. Der Anteil, den der Verkehr an den Gesamtemissionen in Zukunft haben darf, ist von vielen Abwägungen abhängig, welche dessen wirtschaftliche Bedeutung, die Wichtigkeit von Mobilität für Einzelpersonen und die Möglichkeiten der Dekarbonisierung, also vollständigen Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern, berücksichtigen muss. Dabei führen verschiedene Ansätze und Aufteilungen zu dem Pariser Klimaziel ([ROGELJ ET AL 2018]).

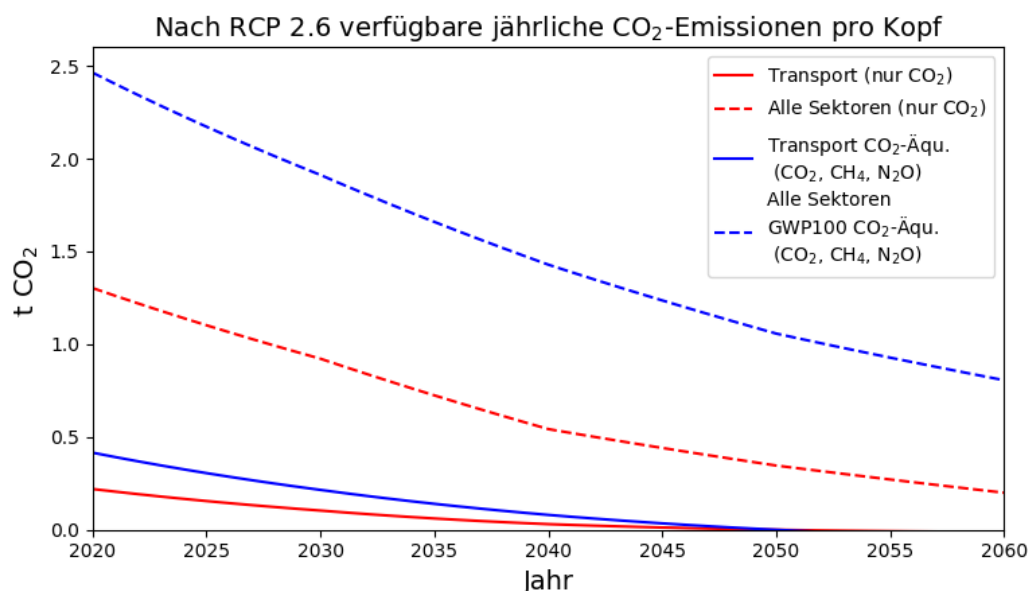


Abb. 9: Transportemissionsbudget pro Kopf bei linearer Abnahme des Transportanteils der Gesamtemissionen, eigene Darstellung, Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [DESTATIS 2019], [SRU 2020]

	2021	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
t CO ₂	0,206	0,179	0,155	0,104	0,061	0,031	0,012	0
t CO ₂ -Äqu.	0,392	0,347	0,305	0,215	0,140	0,080	0,035	0

Tab. 2: Transportemissionsbudget (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [DESTATIS 2019], [SRU 2020]

Hier wird eine eher konservative Abschätzung genutzt, welche sich an den deutschen Klimazielen für 2050 orientiert und auf verschiedenen Berechnungen basiert, welche die Machbarkeit einer emissionsfreien Mobilität bis 2050 bestätigen. Nutzt man also die von [SRU 2020] genannten Ziele bis 2050 die Transportemissionen auf Null zu senken und den aktuellen Anteil von 18%, den der Transport einnimmt um eine lineare Funktion zwischen diese beiden Emissionsanteile zu legen, so erhält man den Anteil der Emissionen, welcher für den Transport zur Verfügung stehen könnte (siehe Abb. 9). Berechnet wird dies parallel zum vorherigen Vorgehen $proKopfEmissionen = f(Jahr) \cdot \frac{(CO_2-MengenachRCP-Kurve)}{Weltbevoelkerung}$ nur wird dies nun mit der linearen Funktion $f(Jahr) = a \cdot Jahr + b$ (mit ca. $a=-0,00563$, $b=11,531$) multipliziert, welche eine lineare Abnahme des Transportanteils berechnet. Dabei bezieht sich dies aber nicht nur auf den Personentransport, sondern den Transport insgesamt. Leider besteht keine gute Datengrundlage in Bezug auf den Anteil der Emissionen des Personenverkehrs an den Gesamttransportemissionen. Dazu kann das Hauptszenario mit deutlicher Emissionsminderung durch Umsetzen verschiedener Maßnahmen von [BLANCK ET AL. 2013] betrachtet werden, das für die Jahre 2020 und 2030 einen Anteil des Güterverkehrs von 33% bzw. 34% (ohne den internationalen Seegüterverkehr) sieht. Im Basisszenario für eine Prognose von geringem Wandel im Verkehrssektor sind es 2010 etwa 29% (67 von 233 Mt CO₂-Äq., echte Daten), 2020 nach Prognose etwa 33% (79 von 241 Mt CO₂-Äq.) und 2030 36% (81 von 225 Mt CO₂-Äq.) ([BLANCK ET AL. 2013]). Dies sieht also insgesamt einen steigenden Trend im Anteil des Güterverkehrs für beide Modelle anhand der wirtschaftlichen und soziale Szenarien vor. Allerdings liegt der Gesamtwert für 2010 weit über den Angaben vom [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2], sodass unterschiedliche Berechnungsgrundlagen und Abgrenzungen der Kategorie beachtet werden müssen. Für 2010 liegen noch andere Daten vor, laut welchen nur in Bezug auf CO₂ 158 Mt im Personenverkehr und 50 Mt im Güterverkehr emittiert wurden ([DESTATIS 2013]), was den Güterverkehr also im Bereich von 24% sieht. Bei letzterer Quelle fehlen jedoch andere Treibhausgase, welche allerdings im Transportsektor weniger relevant sind. Eine Umrechnung anhand der Verkehrsleistung und mit verschiedenen Emissionsfaktoren für die verschiedenen Verkehrsmittel (was für den Personenverkehr noch im nächsten Kapitel erfolgen wird) würde hier aber bei der sehr unterschiedlichen Datenbasis von Personenverkehrsdaten und Güterverkehr mit einem sehr großen Fehler einhergehen. Letztere sind zum Beispiel immer in Tonnenkilometer statt in Bezug auf Personen definiert und der Anteil der verschiedenen Verkehrsmittel an den Kategorien ist sehr unterschiedlich und ebenfalls wenig erfasst. Nutzt man die Durchschnittswerte der CO₂-Emissionen pro Tag und Person nach [SCHELEWSKY ET AL. 2020] und rechnet sie mit den Bevölkerungsdaten von [DESTATIS 2020] um und auf die jährliche Ebene hoch, so erhält man Werte von 2002: ca. 139,9 Mt CO₂, 2008: ca. 141,9 Mt CO₂ und 2017 ca. 144,3 Mt CO₂, wobei auch hier noch die Annahmen unterliegen, dass alle Emissionen der Gewinnung und Produktion der Treibstoffe mit einberechnet werden. Davon könnten, um die für den reinen Personentransport erfolgten Emissionen die

sogenannten „dienstlichen Wege“ mit über 37 Mt CO₂ im Jahr 2017 abgezogen werden, da dies im Gegensatz zu beispielsweise den Wegen zur Arbeit hin oder in der Freizeit die Wege sind, bei denen die fahrenden Personen oft nicht die Wahl haben, sich ein Verkehrsmittel auszusuchen und somit beispielsweise mit dem LKW einen großen Anteil der Emissionen dieser Kategorie ausmachen ([SCHELEWSKY ET AL. 2020], S.47). Der größere Fehler ist bei diesen Abschätzungen vermutlich darin, dass auch im Transport von Waren oder zum Zweck des Erbringens von Dienstleistungen die Emissionen nicht immer eindeutig Kunden zugeordnet werden. Dies ist jedoch sicherlich ein kleinerer Fehler, als die Emissionen des kompletten Güterverkehrs den LKW-Fahrenden oder anderen Personen in diesem Arbeitsbereich auf deren persönliches CO₂-Budget anzulasten.

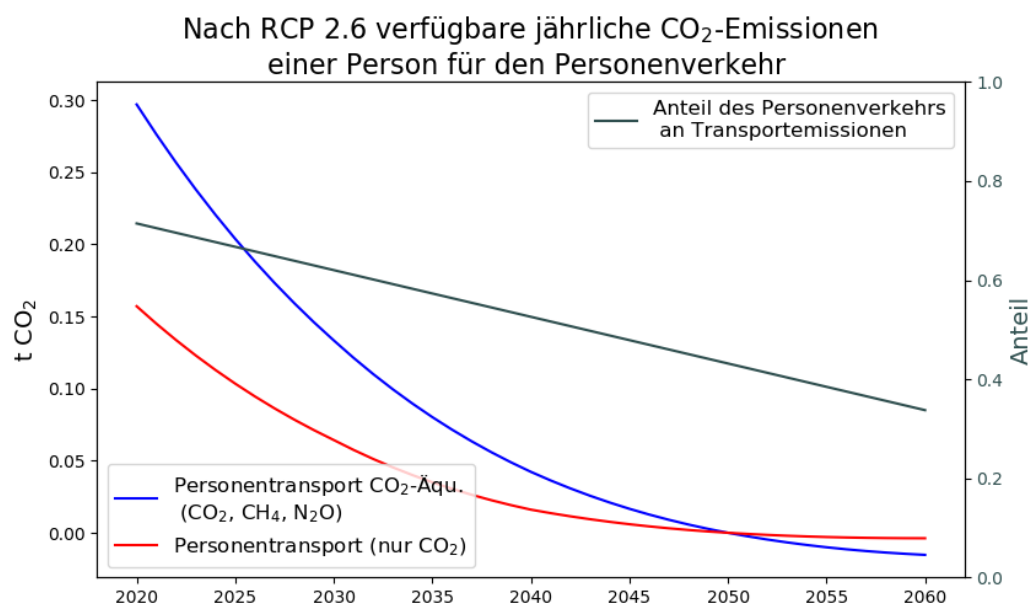


Abb. 10: Persönliches Verkehrsemissionsbudget nach RCP 2.6, eigene Darstellung, Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [DESTATIS 2019],[SCHELEWSKY ET AL. 2020], [SRU 2020]

	2021	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
t CO ₂	0,145	0,123	0,103	0,064	0,035	0,016	0,006	0
t CO ₂ -Äqu.	0,276	0,238	0,204	0,133	0,080	0,042	0,017	0

Tab. 3: Personenverkehrsemissionsbudget (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [DESTATIS 2019],[SCHELEWSKY ET AL. 2020], [SRU 2020]

Nimmt man eine weitere leicht steigende lineare Zunahme des Anteils dieser dienstlichen Emissionen an den Transportemissionen an, da davon auszugehen ist, dass im privaten Bereich auch in Zukunft mehr die Wahlmöglichkeit des Verkehrsmittels besteht und Transport von Lebensmitteln und anderen Gütern einer hohen Priorisierung unterliegen sollten, und berechnet damit den verbleibenden Anteil für den Personenverkehr, bei dem die Wahl des Verkehrsmittel nicht durch Arbeitgebende festgelegt werden kann, so ergibt sich der

Verlauf in Abbildung 10. Dass die Emissionen in CO₂-Äquivalenten die Null unterschreiten liegt an der Annahme, dass Carbon-Capture-Maßnahmen ergriffen werden, sodass jedoch ab ca. 2050 diese Berechnung weniger hilfreich ist, da dann Klimaneutralität erreicht werden sollte. Somit müssen in diesem Zeitraum die Emissionsbudgets an das Potential von Carbon-Capture-Technologien angepasst werden. Die Berechnung (wieder nur am Beispiel CO₂) ist also:

$$\text{proKopfEmissionen} = g(\text{Jahr}) \cdot f(\text{Jahr}) \cdot \frac{(\text{CO}_2\text{-MengenachRCP-Kurve})}{\text{Weltbevoelkerung}}$$

nur wird nun die lineare Funktion $g(\text{Jahr}) = c \cdot \text{Jahr} + d$ (mit ca. $c = -0,0094$, $d = 19,745$) noch daran multipliziert, welche eine lineare Abnahme des Anteils des Personenverkehrs an den Verkehrsemissionen gesamt berechnet und anhand der Datenpunkte von [SCHELEWSKY ET AL. 2020] in einem linearen Fit bestimmt wurde.

2.3 Gleichverteilung nach B2DS

Das Szenario B2DS („Beyond 2°C Scenario“, [IEA 2017, 2]) der [IEA 2017, 1] versucht an das Limit der Machbarkeit mit aktuellen Mitteln zu gehen und damit eine Erwärmung von maximal 1,75°C bis 2100 mit 50% Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Ein zweites Parallelszenario 2DS kommt dabei sogar ohne Phasen mit negativen Emissionen oder der starken Nutzung von Bioenergie verbunden mit CCS-Maßnahmen (Carbon Capture and Storage, Einfangen und Speichern von CO₂) aus ([ROGELJ ET AL 2018]), bedeutet ein Erwärmungsziel von maximal 2°C bis 2100 mit 50% Wahrscheinlichkeit, sodass hier das etwas ambitioniertere B2D-Szenario verwendet wird. Es ist ein Mittelweg zwischen dem strikten Einhalten der 1,5°C-Grenze, welche vom Pariser Klimaabkommen angestrebt wird und einer Verschärfung der aktuellen nationalen Klimaziele, für welche im nächsten Abschnitt das deutsche Beispiel folgen wird. Es bildet also einen aktuell technologisch machbaren, dennoch herausfordernden Pfad. Dieser beruht auf Berechnungen der IPCC und legt den Schwerpunkt auf den Energiesektor sowie die reinen CO₂-Emissionen, berücksichtigt dabei aber die nicht-CO₂-Emissionen anderer Sektoren.

Berechnung auf globaler Ebene Für die Gesamtemissionen des Verkehrs inklusive aller Emissionen der Vorkette, also der Energiebereitstellung, ist das Ziel von B2DS für 2060 Emissionen unter 1,6 Gt CO₂-Äquivalent ([IEA 2017, 1]). Das liegt deutlich unterhalb dem Wert von 2015 mit 14,4 Gt CO₂-Äquivalent, kommt jedoch ohne die vollständige Dekarbonisierung der Bereiche Fliegen und MIV aus ([IEA 2017, 1]).

Für den Transport ist wieder nur ein Gesamtbudget angegeben, das sowohl die Emissionen des Personenverkehrs als auch des Gütertransports mit einschließt. Um daraus den Anteil der persönlichen Mobilität herauszurechnen, wird wie folgt vorgegangen:

$$\text{Personenemissionen}_i = \text{Verkehrsemissionen}_i \cdot \frac{(\text{EnergieverbrauchPersonenverkehr})_i}{(\text{Gesamtverkehrsenergieverbrauch})_i}$$

was je Verkehrsmittel i ausgewertet wird und am Ende zu einem Gesamtwert aller Verkehrsmittel addiert wird. Es wird hier jede Kategorie von Verkehrsmitteln einzeln betrachtet, da im Personenverkehr manche Verkehrsmittel deutlich häufiger oder seltener eingesetzt werden als im Güterverkehr, sodass ein Mittelwert über alle Verkehrsmittel als Gewichtungsfaktor der Emissionen hier den Wert verzerren könnte. Die Gewichtung erfolgt anhand des Energieverbrauchs, da die Angaben über zurückgelegte Strecken schlecht von Personenkilometern in Tonnenkilometer übersetzt werden können, während zwischen verbrauchter Energie und

den resultierenden Treibhausgasemissionen mehr Zusammenhang besteht. Die erhaltenen Daten sind jedoch nur für alle fünf Jahre angegeben, sodass noch eine Fitfunktion der Form

$$f(\text{Jahr}) = a \cdot (\text{Jahr})^3 + b \cdot (\text{Jahr})^2 + c \cdot (\text{Jahr}) + d$$

mit den Werten $a = 0,1362 \pm 0,0015$; $b = -834 \pm 9$; $c = 17 \cdot 10^5 \pm 1,8 \cdot 10^5$; $d = -1,2 \cdot 10^8 \pm 1,3 \cdot 10^8$ verwendet wird, welche mit einem p-Wert von 1,0 die Werte sehr gut beschreibt und damit auch für die Jahre zwischen den angegebenen Datenpunkten die Personentransportemissionen in Mt CO₂-Äquivalent ausgeben lässt.

Das kann wiederum anhand der Prognosen der Weltbevölkerungsentwicklung von [UN 2019] umgerechnet werden auf den pro Person zu Verfügung stehenden Wert (Tabelle 4). Dabei wird jedoch für die gesamte Weltbevölkerung gleichermaßen gemittelt und eine gleiche Priorisierung vom Personenverkehr gegenüber dem Güterverkehr angenommen. Betrachtet man die Daten speziell für die Europäische Union, so zeigt sich innerhalb des dargestellten Zeitraums, dass sowohl in der EU als auch weltweit im Ausgangsjahr 2014 etwa 60% des Energieverbrauchs des gesamten Transports für den Personenverkehr verwendet wird (eigene Berechnung, Daten:[IEA 2017, 2]). Doch für 2060 wird für die EU prognostiziert, dass dieser Anteil bei nur noch 25% liegt, während es weltweit noch fast 50% sind (eigene Berechnung, Daten:[IEA 2017, 2]).

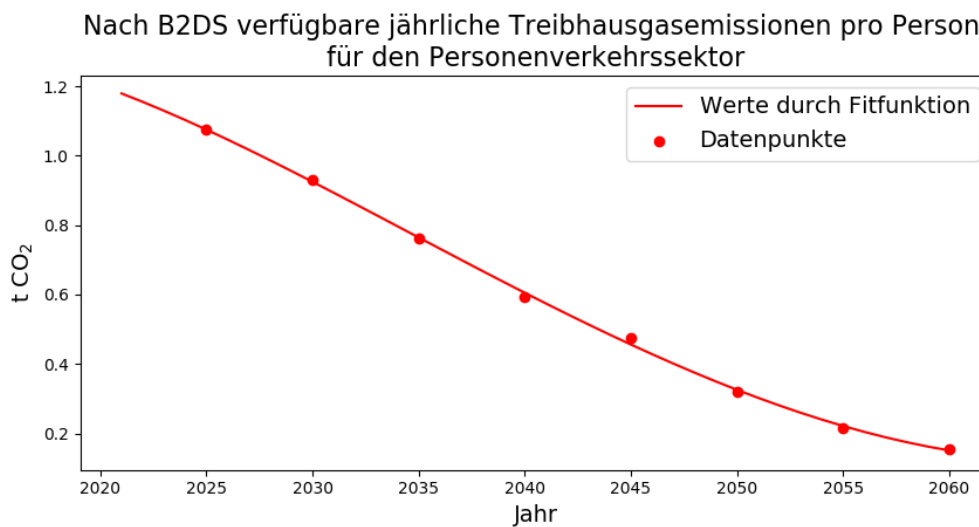


Abb. 11: Personenverkehrsemissionsbudget pro Kopf nach B2DS, eigene Darstellung und Berechnung, Datenquellen: [IEA 2017, 2], [UN 2019]

	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
t CO ₂	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tab. 4: Personentransportemissionsbudget ausgewählter Jahre nach B2DS (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [IEA 2017, 2], [UN 2019]

Das heißt also, dass die Berechnung hier, welche sich auf einen globalen Mittelwert bezieht, den Anteil des Personenverkehrs bei späteren Jahren sogar überschätzt und innerhalb des Modells B2DS als noch kleiner eingeschätzt wird. Da das Modell aber getrennt Daten zur

EU hat (die Länderebene gibt es nicht), wird auf dieser Basis auch im folgenden Abschnitt noch ein Budget berechnet.

Zudem muss einschränkend gesagt werden, dass hier die Emissionen seit dem Jahr der Veröffentlichung der [IEA 2017, 1] nicht explizit mit einberechnet wurden, aber da die Daten einen besonders beschleunigten Rückgang der Emissionen erst in den kommenden Jahren voraussetzen, scheint dies noch aufholbar zu sein. Die bereits getätigten Treibhausgasemissionen hier aber noch abzuziehen würde die Datenunsicherheit hier erhöhen, da dazu auch Werte mit unterschiedlichen Annahmen und sektoralen Aufteilungen mit einberechnet werden müssten.

Berechnung auf EU-Ebene Es wird nach dem gleichen Prinzip vorgegangen, dass über alle Verkehrsmittel i summiert und durch die Gesamtbevölkerung der EU geteilt wird. $Personenemissionen_i = Verkehrsemissionen_i \cdot \frac{(EnergieverbrauchPersonenverkehr)_i}{(Gesamtverkehrsenergieverbrauch)_i}$
Auch hier wird für die Jahre zwischen den 5-Jahres-Schritten noch eine Fitfunktion der Form

$$f(Jahr) = a \cdot (Jahr)^3 + b \cdot (Jahr)^2 + c \cdot (Jahr) + d$$

mit den Werten $a = 0,0064 \pm 0,0008; b = -39 \pm 5; c = 7,8 \cdot 10^4 \pm 1,0 \cdot 10^4; d = -5,3 \cdot 10^7 \pm 7 \cdot 10^6$ angepasst und am Ende der Wert durch die Bevölkerungsprognose der EU geteilt ([EUROSTAT 2021]).

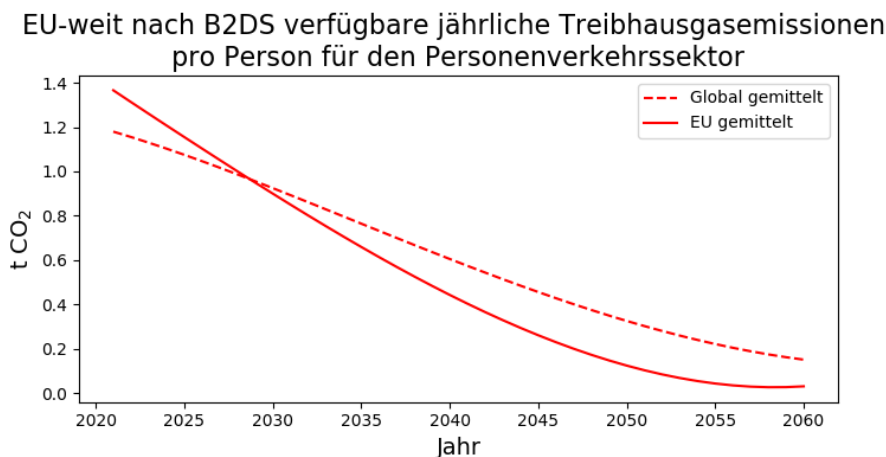


Abb. 12: Personenverkehrsemissionsbudget, europäische Ebene, pro Kopf nach B2DS, eigene Darstellung und Berechnung, Datenquellen: [IEA 2017, 2], [EUROSTAT 2021]

	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
t CO ₂	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tab. 5: Personentransportemissionsbudget nach EU-Daten ausgewählter Jahre nach B2DS (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [IEA 2017, 2], [EUROSTAT 2021]

Dabei ist erkennbar (Abb. 12), dass innerhalb des Modells ein deutlich schnelleres Abnehmen der Emissionen für die EU angenommen wird, was beispielsweise damit argumentativ unterstützt werden kann, dass gerade in den oft reicheren EU-Ländern die Gelder vorhanden

sind, um in den schnelleren Umstieg auf treibhausgasarme Verkehrsmittel zu investieren. Diese Berechnung setzt also auch wie in Abschnitt 2.1.3 gefordert um, dass sich reichere Nationen mehr an einer schnellen Dekarbonisierung beteiligen.

All diese Berechnungen sind auch im Python-Skript unter 7.3 zu finden.

2.4 Gleichverteilung bei Einhaltung der deutschen Klimaziele

2.4.1 Stand 2019

Die Bundesregierung setzte sich in ihrem Klimaschutzprogramm das Ziel einer Reduktion der Emissionen bis 2030 um 55% in den Sektoren „Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft (sonstige)“ ([BMU 2019, 1], S.14). Dies wird nach Quellensektoren aufgeteilt, also Emissionen werden dort angerechnet, wo sie direkt entstehen. Für den Verkehrssektor bedeutet dies also einen Blick allein auf die Emissionen, die beispielsweise aus dem PKW-Auspuff kommen. Zudem wird hierbei nur der Verkehr berücksichtigt, der im Land statt findet und somit werden beispielsweise internationale Flüge nicht mit einberechnet ([BMU 2019, 1]). Das Budget für den gesamten Verkehr nach dieser Begrenzung wird auf maximal 98 Mt CO₂-Äquivalente im Jahr 2030 festgesetzt, also mindestens 40% weniger als noch im Jahr 1990, wobei der Wert von 2018 mit 162 Mt beinahe identisch war mit diesem Ausgangswert ([BMU 2019, 1]) und insgesamt gerade auch im Verkehrssektor in den letzten Jahren kein starker Rückgang erkennbar war (vgl. Abb. 13).

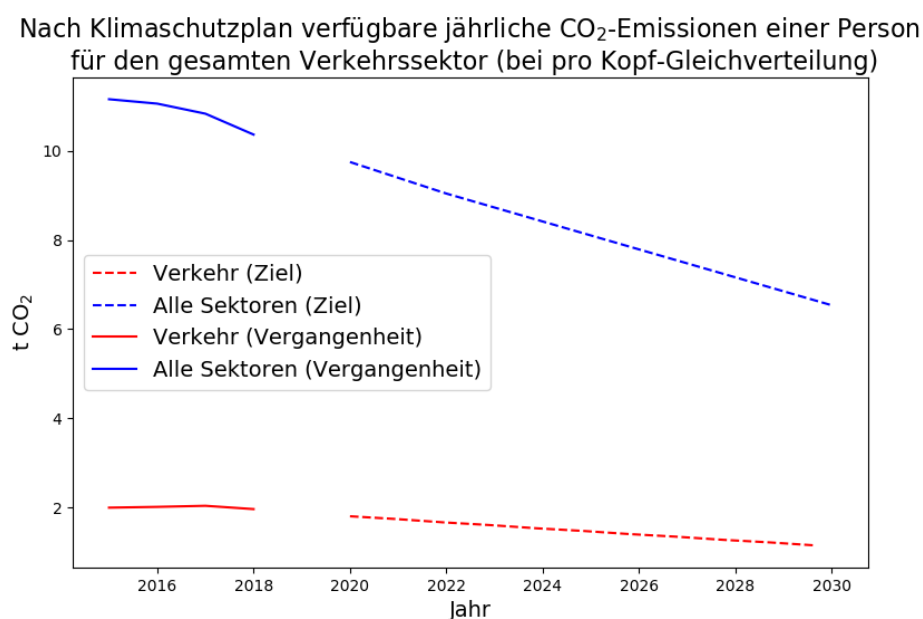


Abb. 13: Verkehrsemissionsbudget pro Kopf nach Klimaschutzplan 2050, eigene Darstellung, Datenquellen: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2], Lücke entsteht durch noch nicht vorhandene Daten

Dies wurde in der Zwischenzeit jedoch von Modellierungen ergänzt, sodass der Projektionsbericht 2019 als Anpassung für das Jahr 2030 einen Wert von 160,3 Mt CO₂-Äquivalenten und im Jahr 2035 von 152,1 Mt angibt ([BMU 2019, 2], S.23). Grund für diese Einschätzung weit über den Zielen sind unter anderem die zunehmende Mobilität insgesamt und beispielsweise

die erwarteten Anstiege im motorisierten Individualverkehr ([BMU 2019, 2]). Das zeigt zwar, dass die aktuellen politischen Maßnahmen und gesellschaftlichen Entwicklungen nicht für das Erreichen der ursprünglichen Ziele ausreichen, dennoch soll dies zum Vergleich mit den anderen und „Paris-kompatiblen“ Budgets hier berechnet werden. Zudem musste nach neueren Verlautbarungen des Bundesverfassungsgerichts im April 2021 ([BVerfG 2021]) die Bundesregierung tätig werden und eine Anpassung des Klimaschutzgesetzes verabschieden, welche über das Jahr 2030 hinaus geht und auch striktere Ziele setzt. Anhand der aktuell noch stehenden Ziele im Klimaschutzplan 2050 und mit dessen Definition des Bereichs „Verkehr“ kann folgendes pro-Kopf-Budget berechnet werden (siehe Abb. 13).

Berechnet wird dies, indem die Emissionsprognose für den Bereich Verkehr nach [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2] durch die Prognose der Bevölkerungszahlen (Variante 1, „moderate Änderungen“, [DESTATIS 2020]) geteilt wird. Dabei handelt es sich jedoch wiederum um die Emissionen für den gesamten Verkehr (aufgrund des Quellenprinzips), sodass daraus der Personenverkehr noch extra berechnet werden muss.

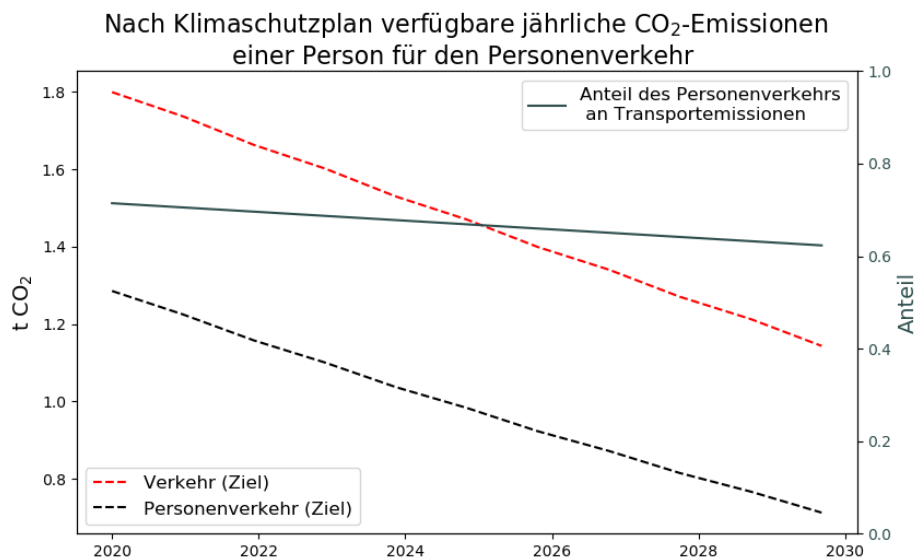


Abb. 14: Emissionsbudget pro Kopf für Personentransport nach Klimaschutzplan 2050, eigene Darstellung, Datenquellen: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
t CO ₂	1,224	1,157	1,099	1,035	0,981	0,920	0,869	0,812	0,764	0,709

Tab. 6: Personentransportemissionsbudget im Klimaschutzplan 2050 (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

Verwendet man den gleichen Anteil wie im vorherigen Abschnitt nach [SCHELEWSKY ET AL. 2020] und als linearen Fit, so erhält man die Ergebnisse in Abbildung 14 und Tabelle 6. Die genaue Berechnung befindet sich als Skript in Abschnitt 7.3, das Prinzip besteht darin, dass noch die lineare Funktion aus der vorherigen Berechnung in Form von $g(\text{Jahr}) = c \cdot \text{Jahr} + d$ (mit

ca. $c=-0,0094$, $d=19,745$) damit multipliziert wird:

$VerkehrsemissionenproKopf = g(Jahr) \cdot \frac{Verkehrs-CO_2-Menge}{Bevoelkerungszahl}$ Es wurde also ganz parallel zu vorhergehenden Budgets berechnet.

2.4.2 Stand 2021

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit musste durch eine Entscheidung des Verfassungsgerichts ([BVerfG 2021]) die Bundesregierung eine Änderung und Anpassung des Gesetzes vornehmen. Im Laufe des Jahres 2021 wurde also ein über 2030 hinausgehender und auch davor, für den Verkehr allerdings ab 2028, strengere Emissionsgrenzen ziehender Plan entwickelt ([BMU 2021]). Für diesen wurde ganz parallel wie im vorherigen Abschnitt das Budget für die aktuellen Ziele berechnet. Diese Anpassung durch das neue Gesetz strebt erst am Ende des Zeitraums 2020 bis 2030 verstärkte Emissionsreduktionen im Vergleich zum ursprünglichen Klimaschutzgesetz an. Ein großer Teil der Reduktionen muss aber weiterhin auch im Zeitraum nach 2030 erfolgen, zu welchen das Gesetz jedoch nur sektorenübergreifende Formulierungen enthält. Mit diesen kann das Gesamtbudget für Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2040 jedoch abgeschätzt werden. Dazu wird im Zeitraum 2022 bis 2030 der Anteil der Energieemissionen, welcher im Gesetz nicht vermerkt ist, als linearer Trend zwischen den beiden Jahren berechnet und ab dem Jahr 2031 die Gesamtemissionsziele anhand der Reduktion im Vergleich zum Jahr 2019 berechnet. Es wurden die Daten für 1990 von [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2] verwendet. Damit ergibt sich für 2021 bis einschließlich 2040 ein Budget von ca. 8,966 Gt CO₂, was weiterhin nahe an als Maximum gesetzten Zielen wie von [SRU 2020] mit 9,7 Gt CO₂ ab 2016 liegt. Beachtet man dabei, dass in den Jahren 2016 bis 2018 in Deutschland schon über 2,6 Gt CO₂ emittiert wurden ([UMWELTBUNDESAMT 2021, 2]), so überschreitet Deutschland auch innerhalb des neu angepassten Gesetzes das nach dem Pariser Klimaziel maximal zustehende Budget.

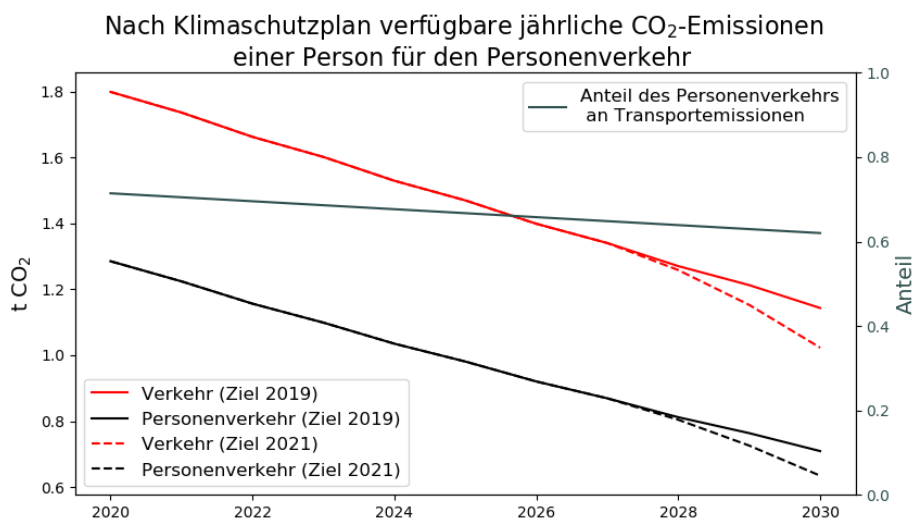


Abb. 15: Emissionsbudget pro Kopf für Personentransport nach Klimaschutzplan 2050, eigene Darstellung, Datenquellen: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [BMU 2021], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
t CO ₂	1,224	1,157	1,099	1,035	0,981	0,920	0,869	0,804	0,726	0,634

Tab. 7: Personentransportemissionsbudget im Klimaschutzplan 2050 (jährlich und pro Person nach eigener Berechnung), Datenquellen: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [BMU 2021], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

2.5 Referenzszenario: Klimaschutz Stand 2017

Um einen Vergleich zu erhalten, wie sich die verschiedenen Budgetmodelle gegenüber dem vorherigen Stand weniger Klimaschutzbeschlüsse verhalten, kann die Berechnung von [KEMMLER ET AL. 2021] verwendet werden, welche Prognosen anhand der Klimaschutzmaßnahmen bis 2017 machten. Die Sektorenaufteilung ist die selbe wie beim vorherigen Abschnitt zum Klimaschutzplan 2050. Bei diesem Szenario existieren für Deutschland jedoch keine festen Budgets oder Grenzwerte der Emissionen und im Bereich Personenverkehr sind folgende Beschlüsse in Umsetzung: Die Elektromobilität wird gefördert durch Steckerstandards, Steuervorteile, Forschungsgelder, mögliche kommunale Bevorteilungen und Informationskampagnen; es wird in innovative Radförderung investiert; ein Teil der Verkehrsfinanzen fließt in den Ausbau der Schiene, wobei auch Straßen weiter gefördert werden; der ÖPNV soll finanziell gestärkt werden und mit mehr alternativen Antrieben ausgestattet werden ([KEMMLER ET AL. 2021]).

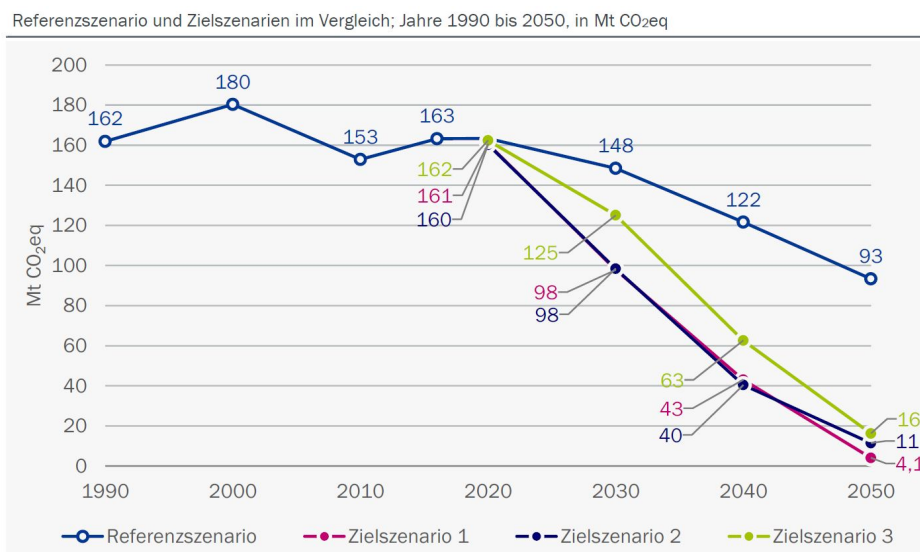


Abb. 16: Referenzszenario 2017, Quelle: [KEMMLER ET AL. 2021], S.251

Diese Maßnahmen haben jedoch in erster Abschätzung keine großen messbaren Auswirkungen (Abnahme unter 1 Mt CO₂ von 2017 bis zum Jahr 2030, [KEMMLER ET AL. 2021]), während beispielsweise der Rückgang der erwerbstätigen Bevölkerung und die durch Innovation günstigere alternativen Antriebe wie bei E-Autos hier wichtig sein können. Die in Abbildung 16 dargestellten Emissionen für den Gesamtverkehr in Deutschland wurden dabei von den AutorInnen berechnet. Dabei ist das Zielszenario an den Klimaschutzplan 2050 aus dem vorherigen Abschnitt angelehnt. Im direkten Vergleich zwischen den Maßnahmen ohne den Klimaschutzplan (blaue Linie, Referenzszenario) und mit diesem Maßnahmenpaket und Emissionszielen (grüne Linie, Zielszenario 3) ist gut erkennbar, dass dieser eine große Einsparung

von Treibhausgasemissionen mit sich bringen kann, wenn er umgesetzt wird. Für die nun folgenden Vergleiche wurde das Budget für das Referenzszenario gleichermaßen wie beim Klimaschutzplan durch die Prognose der deutschen Bevölkerung geteilt und mit dem linearen Fit nach [SCHELEWSKY ET AL. 2020] multipliziert, um den Anteil des Personenverkehrs zu erhalten. Damit sind die gleichen Annahmen für diese beiden Abschnitte getroffen worden und durch parallele Berechnung sollte eine gute Vergleichbarkeit gegeben sein. Dargestellt ist dies in Form von Vergleichspunkten in Abbildung 18.

2.6 Vergleich und Diskussion der Budgets

Die ausführlichen Ergebnisse aller Budgets befinden sich in tabellarischer Form im Abschnitt 7.5. Vergleicht man nun die verschiedenen Budgets miteinander, so fällt zunächst auf, dass die anhand der RCP 2.6-Kurve ermittelten Emissionen weit unterhalb der anderen beiden Methoden liegen. Das strikte Einhalten eines Weges unterhalb der 1,5 °C-Grenze mit der RCP-Kurve bedeutet große Einschränkungen und wird vermutlich schwer erreichbar sein. Für diese Kurve besteht auch noch die Berechnung anhand der Gesamtemissionen in CO₂-Äquivalenten. Dabei wird jedoch die Annahme gemacht, dass Emissionen aller Gase auf alle Sektoren gleichermaßen verteilt werden, obwohl der Verkehrssektor zumindest auf EU-Ebene sich zu ca. 98% in der Klimawirkung auf CO₂ beschränkt ([EEA 2020]). Der deutsche Klimaschutzplan 2050 liegt, wenn der Verlauf der Anteile des Personenverkehrs an den Gesamtemissionen so berechnet wird, tatsächlich eher im Mittelfeld, da die B2DS-Werte bei einer über die EU gemittelten Berechnung noch weit darüber liegen (vgl. Abb. 17 unten, absolute Werte).

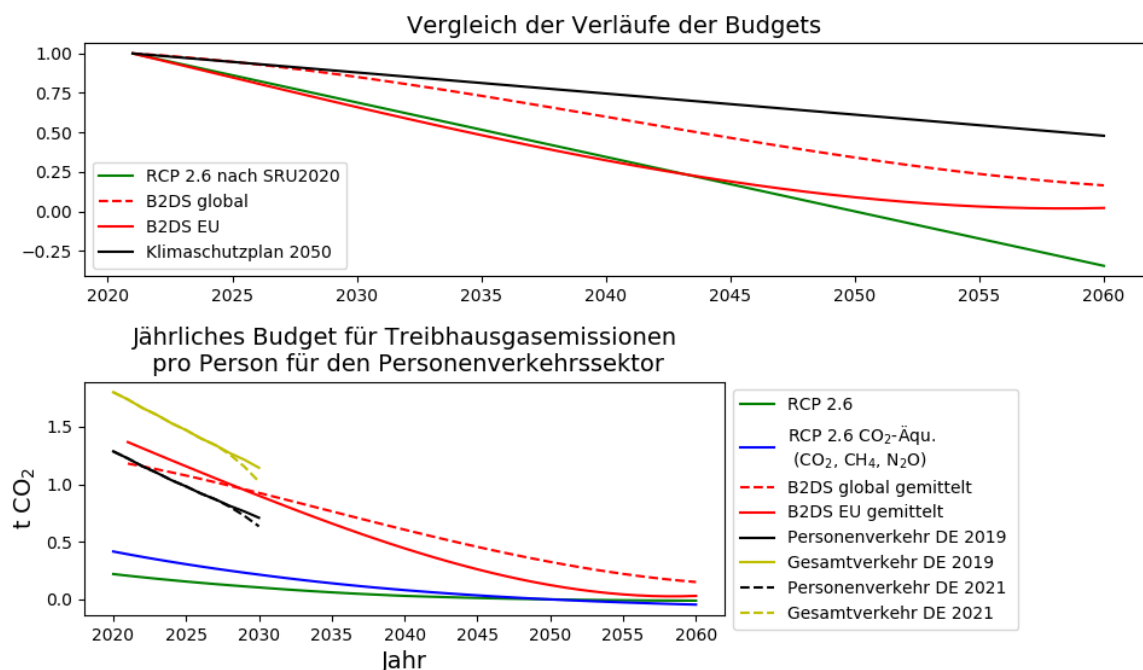


Abb. 17: Vergleich der Personenverkehrsemissionsbudgets; oben: relative Verläufe anhand des Ausgangswerts in prozentualer Abnahme, unten: absolute Verläufe

Das liegt aber vor allem auch daran, dass der Verkehrssektor in den deutschen Klimagesetzen sich lediglich auf die dort direkt entstehenden Emissionen, also beispielsweise die Abgase aus dem Auspuff bezieht. Vergleicht man jedoch die relative Verläufe in Bezug auf den jeweilig

gewählten Ausgangswert (vgl. Abb. 17 oben, relative Werte), so zeigt sich beim Klimaschutzplan als linearer Trend ein nur geringer Abfall der Emissionen, während die B2DS-Kurve für Europa im Jahr 2045 schon weit unter 25% der Ausgangsemissionen dem Verkehr zuordnet.

Annahmen Diese genannten Unterschiede zwischen den Modellen liegen auch daran, dass unterschiedliche Annahmen getroffen werden:

	Vorkette ¹	glob. Gleichverteilung ²	Basisjahr ³
RCP 2.6 (CO ₂)	Nein	Ja	2009
RCP 2.6 (CO ₂ -Äqu.)	Nein	Ja	2009
B2DS-global (CO ₂)	Ja	Ja	2014
B2DS-EU (CO ₂)	Ja	Nein	2014
Klimaschutzplan DE(CO ₂)	Nein	Nein	1990/2018

Tab. 8: Vergleich der Annahmen der Budgetrechnungen

¹: Vorkette umfasst alle Emissionen zur Bereitstellung des Energieträgers (Bei der RCP-Berechnung sowie dem Klimaschutzplan werden die Sektorenaufteilungen nach [BMU 2019, 1] verwendet, bei welchen nach dem Quellenprinzip die Emissionen dort angerechnet werden, wo sie direkt entstehen)

²: globale Gleichverteilung bedeutet, dass weltweit jeder Person die gleiche Emissionsmenge für den Personenverkehr zur Verfügung steht

³: Jahr der letzten in das Modell einfließenden Messdaten, bezieht sich nur auf die Gesamtemissionsdaten; Anpassungen zu den Verläufen/ Anteil der Verkehrsemissionen können neueren Datums sein (Klimaschutzplan 2050 bezieht sich immer auf den Vergleich mit dem Jahr 1990, Daten des historischen Verlaufs waren aber bis 2018 verfügbar)

Nur die Daten der [IEA 2017, 1] beziehen direkt die Emissionen aus der Energiegewinnung mit ein, was bei der Berechnung der Verkehrsmittlemissionen im späteren Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt werden muss. Das bedeutet beispielsweise bei Vergleich eines E-Autos mit einem Diesel-PKW, dass der Erste bei der Betrachtung innerhalb der Klimagesetze quasi als emissionsfrei angenommen wird, während bei der B2DS-Berechnung die Emissionen der Stromgewinnung explizit mit berücksichtigt werden. Die Budgets unterscheiden sich auch sehr darin, welche Klimaziele damit erreicht werden.

	RCP CO ₂	RCP CO ₂ -Aequ.	B2DS	DE 2019	DE 2021
Zeitraum	2021-2060	2021-2060	2015-2100	2020-2030	2020-2040
Gesamtbudget (GtCO ₂) ¹	<200	430	720	675	810
DE Budget (Gt CO ₂)	-	5,0	7,0/5,0	7,5	9,0
Wahrsch.1,5°C ²	66%	66%	<33%	<33%	<33%
Wahrsch.1,75°C ²	>66%	>66%	50%	<33%	<33%
Wahrsch.2°C ²	>66%	>66%	>50%	<50%	<50%
50%-Ziel ³	<1,5°C	<1,5°C	1,75°C	3,2°C	-

Tab. 9: Vergleich der globalen Gesamtbudgets

¹: Gesamtbudget der Treibhausgas- (in CO₂-Äqu.) oder CO₂-Emissionen auf globaler Ebene; im Fall der für Deutschland spezifischen Szenarien wurde anhand der aktuellen Bevölkerungsgröße

*die gleichen Emissionen auf die Weltbevölkerung hochgerechnet; für den Klimaschutzplan DE 2050 anhand [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2] hochgerechnet; für B2DS nur die Energiesektoren umfassend*²: *Anhand des Gesamtbudgets für alle Sektoren wird die Wahrscheinlichkeit für eine Erwärmung unter dieser globalen maximalen Temperaturerwärmung abgeschätzt, wenn alle Menschen der Welt gleich viel emittieren würden wie in dem Budget berechnet wurde; Abschätzung anhand von [SRU 2020] für 1,5 °C und 1,75 °C, [ROGELJ ET AL 2019] für 2 °C und für B2DS Angaben von [IEA 2017, 1]*³: *Mit 50% Wahrscheinlichkeit erreichbares Temperaturziel; für B2DS nach [IEA 2017, 1], für Klimaschutzplan 2050 nach [SRU 2020]*

Die Daten für die RCP-Kurve sind zwar deutlich älter, aber das Gesamtbudget über die Jahre bis 2060 weicht nur gering von neueren Berechnungen ab. Besonders auffällig sind hier die extrem hohen Emissionen, die bereits in einem Zeitraum von 10 Jahren entstehen würden, wenn alle Personen weltweit so viel CO₂ emittieren würden, wie es Deutschland mit dem Klimaschutzplan 2050 anstrebt. Dabei sind in diesem Plan auch teils internationale Flüge und andere grenzüberschreitend entstehende Emissionen noch nicht in diesem Zielbudget enthalten, da diese auf die EU-Ebene übertragen werden, sodass also die echten Emissionen sogar noch darüber lägen. Genauere Aussagen über die Temperaturveränderung sind anhand des eingeschränkten Zeitraums schwer zu treffen. Die Hochrechnung der EU-Klimaziele, welche Deutschland mit dem Klimaplan Stand 2019 anstrebt, würden global hochgerechnet jedoch Emissionen über 3,2°C mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% bedeuten. Das B2DS Szenario mit der Zieltemperatur von 1,75° C erlaubt beinahe das doppelte an Emissionen allein in den damit abgedeckten Sektoren im Vergleich zu RCP 2.6 (in CO₂-Äqu.), welcher unterhalb der 1,5° C-Marke ansetzt. Das um nur 0,25 °C höhere Ziel ist also deutlich einfacher und realistischer noch zu erreichen. Vergleicht man dies mit den Zielen nach [IPCC 2018, 1], welche (allerdings ab 2017) 580 Gt bzw. mit anderer Berechnung 770 Gt für eine 50%-Wahrscheinlichkeit des 1,5°C-Ziel sehen, so liegt einzig die RCP-Berechnung deutlich darunter. Betrachtet man die nur für Deutschland berechneten Budgets und vergleicht den nach [SRU 2020] als oberste Grenze gesetzten Wert von 9,7 Gt CO₂ ab 2016, welcher eine Gleichverteilung des vorherigen IPCC-Werts bildet, so liegen beide B2D-Szenarien (also über die EU bzw. global gemittelt) noch unterhalb dieses Grenzwerts und geben damit genügend Sicherheit, die Klimaziele zu erreichen. Da zudem das B2DS sogar eher konservative Annahmen zu CCS macht, sei damit sogar noch ein 1,5-Grad Pfad mit „overshoot“ möglich, also einem nur knappen über das Ziel hinweg schießen, so der IPCC-Report zum 1,5°C-Ziel ([IPCC 2018, 2]). Bei den deutschen Klimazielen hingegen besteht das Problem, dass schon im Zeitraum 2020 bis 2030 ein großer Teil des Budgets aufgebraucht wäre, bzw. im Fall des Plans Stand 2021 im Zeitraum 2020 bis 2040 und somit in den verbleibenden Jahren kein großer Spielraum mehr bestünde. Dies wurde schon vielseitig bemängelt und führte zu einer erfolgreichen Verfassungsbeschwerde, welche eine Nachbesserung der entsprechenden Ziele überhaupt erst erforderlich machte ([BVerfG 2021]). Die neue Variante des Klimaschutzgesetzes ist aber voraussichtlich immer noch nicht ausreichend, wenn das Gesamtbudget betrachtet wird.

Referenzszenario Nun folgt (siehe Abb. 18) der Vergleich mit dem Referenzszenario von [KEMMLER ET AL. 2021]. Die Budgets liegen alle weit unter der Prognose für einen nur sehr

geringen Maßnahmenkatalog, wie er bei diesem Szenario angenommen wurde. Daraus lässt sich schließen, dass die Emissionsminderungen konkrete Ziele und eine Umsetzung benötigen, da die Abnahme nicht „wie von allein“ geschehen wird. Es bedeutet jedoch auch, dass schon durch die weniger strikten Ziele der Bundesregierung eine deutliche Abnahme der Emissionen möglich ist.

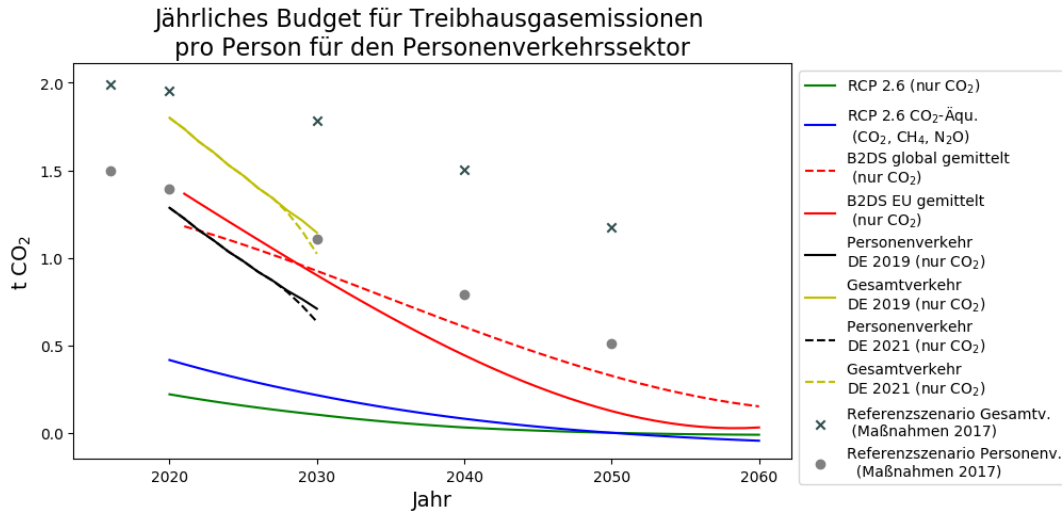


Abb. 18: Vergleich der Budgets mit dem Referenzszenario 2017, eigene Darstellung

Vergleich mit [Agora Verkehrswende 2019] Die Studie von [AGORA VERKEHRSWENDE 2019] bezieht sich ebenfalls auf die Emissionspfade von [IEA 2017, 1], welche an die Emissionen bis 2018 angepasst wurden und gleichermaßen wie im Klimaschutzplan von [BMU 2019, 1] auf den gesamten Transportsektor ohne internationalen Verkehr (Flüge, Schifffahrt) bezogen wurden. Der große Unterschied zu den Berechnungen dieser Arbeit ist, dass darin ein Prozess der Kostenminimierung statt findet, bei welchem anhand beispielsweise eines idealisierten globalen CO₂-Bepreisungssystem dort Emissionen reduziert werden, wo es am günstigsten ist und setzen voraus, dass bis 2050 der Transportsektor CO₂-neutral ist([AGORA VERKEHRSWENDE 2019]). Das Gesamtemissionsbudget für Deutschland liegt dabei bei 9,7 Gt CO₂ von 2016 bis 2050 gleich wie bei den Berechnungen von [SRU 2020] für das 1,75°C-Ziel, wovon 2,6 Gt CO₂ für den gesamten Transport vorgesehen sind ([AGORA VERKEHRSWENDE 2019]). Hier wurde zwar speziell der Personenverkehr betrachtet, dennoch kann damit ein grober Vergleich statt finden, wenn berücksichtigt wird, dass nach [SCHELEWSKY ET AL. 2020] der Anteil am Personentransport bei etwa 60% liegt, was für die Zahlen von[AGORA VERKEHRSWENDE 2019] einen Wert von etwa 1,6 GtCO₂ bedeuten würde.

	RCP CO ₂	RCP CO ₂ -Aequ.	B2DS(EU)	B2DS(Glob.)	DE 2019
Zeitraum	2021-2050	2021-2050	2020-2040	2020-2040	2020-2030
Budget	0,27 GtCO ₂	0,13 GtCO ₂ -Aequ.	1,47Gt CO ₂	1,50 Gt CO ₂	0,90Gt CO ₂

Tab. 10: Vergleich der deutschen Personentransportbudgets

Es wird hierbei klar ersichtlich, dass die RCP-Kurve und Berechnungen dazu ein extrem strenges Ziel setzen, das weder gut erreichbar noch unbedingt notwendig ist. Die Klimaschutzziele

Deutschlands sind zwar nur auf einen kurzen Zeitraum bezogen, bedeuten aber insgesamt ein höheres Budget und sind nicht mit den Pariser Klimazielen vereinbar ([SRU 2020]). Das gilt auch für die neuere Variante des Klimaschutzgesetzes. Die hier anhand der Daten von [IEA 2017, 1] bei einer pro-Kopf-Gleichverteilung berechneten Emissionen liegen nahe der Berechnungen von [AGORA VERKEHRSWENDE 2019], welche auch die wirtschaftliche Machbarkeit mit einbezogen haben, ergeben jedoch insbesondere bei Verwendung der global gemittelten Daten eine Verteilungsgleichheit für alle Menschen und sind hier insbesondere auch auf den Personenverkehr bezogen, den die Einzelperson auch stark beeinflussen kann.

Fazit (Budgets) Durch den Vergleich mit dem Referenzszenario für Deutschland bei der Weiterführung der Ziele von 2017 [KEMMLER ET AL. 2021] ist zunächst festzuhalten, dass alle hier berechneten Budgets, wenn sie eingehalten werden, eine deutliche Verbesserung im Klimaschutz bedeuten. Um jedoch Personen in ihren Mobilitätsentscheidungen eine realistische Einschätzung zu geben, wie das Verhalten zum Erreichen der Pariser Klimaziele, also einem Temperaturanstieg unter 2°C, aussehen sollte, wird hier die Berechnung anhand der B2DS-Kurve von [IEA 2017, 1] weiter verwendet. Diese strebt eine Erwärmung von 1,75°C im Mittel an und berücksichtigt auch Emissionen der Vorkette, also der Energiebereitstellung. Gerade dieser Punkt bringt große Vorteile, da dies bedeutet, dass Mobilitätsentscheidungen der einzelnen Person innerhalb dieses Budgets deutlich umfassender mit einbeziehen, welche Folgen die Entscheidung mit sich bringt. Emissionen aus der Energiebereitstellung und anderen Bereichen werden somit im Blick behalten, da diese ja schlussendlich direkte Folgen der Verkehrsmittelnutzung sind. Zudem wird hier die Variante weiter verwendet, welche sich auf die Daten zur Europäischen Union bezieht, da dabei einerseits auch mehr auf die Situation einer eher reicheren und mobilen Bevölkerung mit einem höheren Ausgangspunkt für das Jahr 2021 eingegangen wird, aber ein beschleunigter Abstieg der Emissionen auch machbar ist, insbesondere weil das Vermögen zu Investition in CO₂-neutrale Technologien vorhanden ist. Insgesamt sind die Werte in Erkenntnisse aus dem vierten IPCC-Report eingebettet ([IEA 2017, 1]) und werden selbst auch im IPCC Special Report von 2018 als möglicher Pfad vorgestellt ([ROGELJ ET AL 2018]). Die Ziele sind im Vergleich zu den aktuellen Emissionen in den nächsten Jahren noch relativ nahe am aktuellen Stand. So lagen 2018 mit 162,3 Mt CO₂-Äquivalent ([UMWELTBUNDESAMT 2021, 2]) die Verkehrsemissionen aufgeteilt auf ca. 83 Millionen Personen ([DESTATIS 2019]) in Deutschland und bei einem Anteil des Personenverkehrs von 60% ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]) bei ca. 1,2 t CO₂-Äquivalent, wobei hier Flüge mit internationalem Ziel sowie die Vorkettenemissionen beispielsweise nicht mit einbezogen wurden. Die ca. 1,4 t CO₂ des B2DS-Personenverkehrsbudgets für 2021 sind also noch in einem erreichbaren Rahmen, auch wenn beispielsweise Flüge vollständig mit einbezogen werden. Dies jedoch im Zeitraum zwischen 2030 und 2035 halbiert zu haben wird ein anspruchsvolleres Ziel. Bis dahin kann sich jedoch noch viel in Bezug auf technologische Weiterentwicklungen und Verhaltensänderungen tun, was in den nächsten Kapiteln nun konkretisiert werden soll.

3 Klimawirkung verschiedener Verkehrsmittel

In diesem Kapitel wird nun für die Verkehrsmittel mit der größten Bedeutung für den Klimawandel jeweils deren Einflussmöglichkeiten auf das Klima genannt und verschiedene Berechnungsmethoden vorgestellt. Damit wird eine Grundlage zur Berechnung der Klima-

wirksamkeit pro Person und Kilometer basierend auf dem aktuellen Forschungsstand gelegt.

3.1 Annahmen

Zunächst müssen ein paar für alle Verkehrsmittel grundlegenden Annahmen getroffen werden, welche die Vergleichbarkeit zwischen den Verkehrsmitteln ermöglichen sollen, aber auch in Bezug auf das Budget Abstimmungen erleichtern.

3.1.1 CO₂, CO₂-Äquivalent

Es gilt zu beachten, dass die Budgetansätze wie sie nach den Emissionspfaden von [IEA 2017, 1] berechnet wurden sich nur auf CO₂ beziehen, also ein angestrebtes Temperaturziel nur in kumulierte Kohlenstoffdioxidemissionen übersetzen, da die betrachteten Sektoren wie der Transport wenig Methan oder andere klimawirksame Gase freisetzen. Um jedoch zu verhindern, dass nun der Verkehrssektor von den CO₂-Emissionen auf andere Treibhausgase ausweicht, wird im folgenden wenn möglich die gesamte Wirkung eines Verkehrsmittel in CO₂-Äquivalente übersetzt, die jedoch den reinen CO₂-Wert des Budgets ebenfalls nicht übersteigen sollte.

3.1.2 Systemgrenzen: Welche Emissionen werden berücksichtigt?

Bei den Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs denkt man zunächst sicherlich an die Abgase aus beispielsweise einem Dieselmotor. Zudem gibt es aber noch die Emissionen, welche jenseits des reinen Verbrennungsvorgangs im Motor entstehen (siehe Abb. 19).

Vom Energieverbrauch im Betrieb unabhängig sind beispielsweise die Treibhausgasemissionen, welche bei der Fahrzeugherstellung entstehen. Aber auch den Energieträger selbst muss man über die Verbrennung hinaus betrachten. Der Begriff „Tank-to-wheel“ (kurz TTW) umfasst dabei die direkten Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb; „Well-to-tank“ (WTT) umfasst die Emissionen, die bei der Herstellung bzw. Gewinnung des Energieträgers und dessen Verarbeitung und Transport bis zum Verbraucher entstehen ([CE DELFT 2014]).

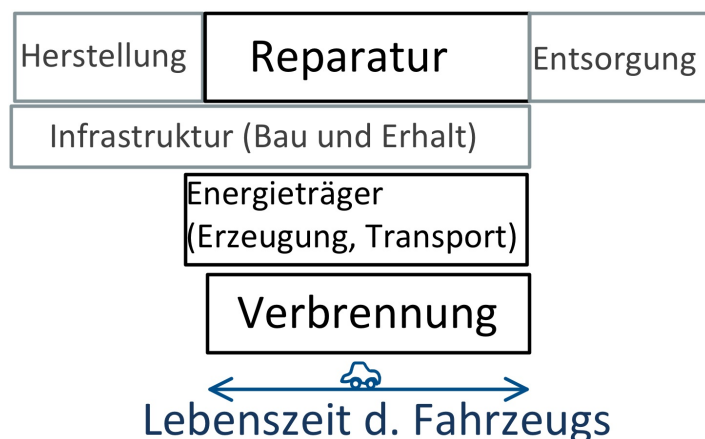


Abb. 19: Betrachtung der Gesamtemissionen eines Transportmittels, eigene Darstellung nach [CE DELFT 2014] nach MIT 2013

Gerade beim Personentransport sind die Informationen zu den WTT-Emissionen weniger zugänglich ([CE DELFT 2014]), was vermutlich auch daran liegt, dass hier kein Großabnehmer

von Treibstoffen vorliegt, sondern beispielsweise an unterschiedlichen Tankstellen getankt wird. Somit können viele Zwischenstufen zwischen der Erdölquelle und dem Tank liegen und dabei müssen dann klare Grenzen gezogen werden, ob beispielsweise der Transport des Kraftstoffs für den Tankwagen selbst noch mit eingerechnet werden muss.

Es gibt also keine eindeutige Lösung und auch die zuvor berechneten Budgets umfassen nur zu einem Teil beispielsweise auch WTT-Emissionen. Es werden im folgenden also, wenn vorhanden, verschiedene Ansätze zur Emissionsberechnung für Verkehrsmittel vorgestellt. Insgesamt ist jedoch das Ziel, möglichst alle der genannten Bereiche, also WTT, TTW, Fahrzeugbau und -reparatur sowie die Infrastruktur mit einzubeziehen, soweit das möglich ist.

Gerade bei alternativen Antrieben wie sie bei E-Autos verwendet werden kann es passieren, dass die neuen Technologien deutlich größere Emissionen bei der Herstellung verursachen, welche erst durch die niedrigeren Betriebsemissionen wieder gut gemacht werden. Das bedeutet also, dass genau wie es schon in Bezug auf die Treibhausgase jenseits CO₂ schon abgewägt wurde beachtet werden muss, dass kein Ausweichen auf Verkehrsmittel geschieht, die zwar weniger WTW-Emissionen (Well to Wheel, enthält WTT und TTW) aufweisen, aber bei der Produktion hoch problematisch sind. Deswegen sollte der Anreiz geschaffen sein, mit den gesamten Emissionen des Lebenslaufs eines Fahrzeugs (den „life-cycle GHG emissions“, [IEA 2017, 1]) innerhalb des Budgets zu bleiben.

3.1.3 Infrastruktur- Bestand und Ausbau

Es besteht eine Persistenz der bestehenden Technologien, da diese nicht nur gewohnt und etabliert sind ([BANISTER ET AL. 2012], sondern in Form von bestehender Infrastruktur sich in unseren Landschaften verfestigt haben. Oft ist zudem der Wechsel zu effizienteren Technologien auch mit höheren Investitionskosten verbunden ([GIROD ET AL 2012]).

Ob Straßen oder Schiene ausgebaut werden ist in Deutschland eine Entscheidung auf politischer Ebene. Deswegen kann argumentiert werden, dass die durch demokratisch gewählte Vertreterinnen und Vertreter getroffenen Entscheidungen durch alle Wählenden und insgesamt durch die Gesellschaft indirekt getragen sind. So lange Personen oder Parteien gewählt werden, die Straßen ausbauen, müssten demnach also auch die dadurch verursachten Emissionen und Einflüsse auf die Umwelt von der Gesellschaft getragen werden. Dennoch verwenden beispielsweise [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] eine Methodik zur Berechnung von Emissionsfaktoren, bei der auch die Infrastrukturemissionen auf die Personenkilometer zurück bezogen werden, schließlich müssten ohne Autofahrende auch keine Autobahnen gebaut werden. Zudem kann man mit dieser Methode den verschiedenen Verkehrsmitteln einen Kostenfaktor zuordnen (vgl. [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]), welcher angibt, welche Umweltkosten dieses Verkehrsmittel verursacht hat und somit ein preisliches Verantworten der Mobilität schaffen. Um Transparenz für die Mobilitätsentscheidung zu schaffen muss vollständig offen liegen, welche Folgen die Verkehrsmittel haben. Dazu gehören bei Beispiel von Autos auch die bereits gebauten oder in Zukunft geplanten Straßen.

3.1.4 Platzfrage: Wer verantwortet den leeren Sitz?

Die Berechnung von CO₂-Emissionen eines Flugs unterliegt der Wahl, ob jedem Sitz in einem Flugzeug eine Emissionsmenge zugeordnet wird, oder nur jeder tatsächlich das Flugzeug betretenden Person, oder jedem transportiertem Kilogramm Fracht. Das trifft auch auf alle anderen Verkehrsmittel zu, da ein Basiswert der Emissionen verursacht wird um das Verkehrsmittel selbst zu bewegen, egal ob Personen darin sitzen oder nicht. Dabei besteht bei der Aufteilung auf die tatsächliche Personenzahl zwar die eigentlich realistischere Einschätzung, aber die persönliche Wahl, mit seiner Entscheidung für diese Emissionen verantwortlich zu sein wird dabei gemindert. Die Aussage "Das Flugzeug fliegt doch, egal ob ich einsteige oder nicht" kann dadurch entkräftet werden, dass jedem einzelnen Sitz eine Emissionsmenge zugeordnet werden. Dass die Verantwortung, die Plätze in einem Flugzeug zu füllen auch mehr auf die Fluggesellschaft angerechnet werden soll, argumentiert [JARDINE 2009]. Ausnahmen sind dabei jedoch besondere Premiumangebote, bei denen beispielsweise der Platz in der Mitte frei gelassen wird, um den Personen die daneben sitzen mehr Komfort zu ermöglichen. Dabei besteht allerdings das Problem, dass die Fluggesellschaft nicht Teil eines pro-Kopf-Budgets ist, sodass die Emissionen der leeren Sitze außerhalb des Budgets und nicht mit berechnet wären. Da auch nicht vollständig gefüllte Flugzeuge die Norm sind und die Betrachtung auf individueller Ebene somit die restlichen Emissionen der leeren Sitze ignoriert würden, wird gerade bei Flugzeugen darauf geachtet wenn möglich auch mit den typischen Besetzungszahlen des Flugzeugs zu rechnen. Eine Entscheidung zwischen den Flügen verschiedener Airlines kann also auch darüber beeinflusst werden, dass die Flugzeuge nur möglichst vollständig gefüllt fliegen. Dies verwendet beispielsweise [ATMOSFAIR 2021] als Auskunft über die Emissionen für Flüge. Diese Überlegungen können auch auf die Fahrt mit PKWs und die Anzahl der darin mitfahrenden Personen übertragen werden. Mitfahrende im Auto sollten also gleichermaßen an den Emissionen der Fahrt beteiligt werden. Auch beim ÖV sollte beachtet werden, wie voll die Verkehrsmittel im Durchschnitt sind, um auch hier keine Emissionen außerhalb des Budgets zu verursachen. Schlussendlich verursacht auch ein leerer Bus bei der Fahrt Treibhausgase, diese können jedoch auf die Nutzer anderer Fahrten umgerechnet werden, da diese von einer durchgehenden Anbindung mit dem ÖV profitieren. Schlussendlich wird also hier vor allem darauf geachtet, dass alle entstehenden Emissionen auf Personen umgelegt werden, welche das Verkehrsmittel nutzen und somit unterstützen.

3.2 Motorisierter Individualverkehr

Hier sollen die relevanten Verkehrsmittel zum individuellen Personentransport beschrieben werden, welche einen motorisierten Antrieb nutzen (wobei Pedelecs dem Abschnitt 3.7 mit den Fahrrädern zugeordnet wurden). Dabei ist der Transport auf Straßen insgesamt für ca. 16% der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich ([DANILECKI ET AL. 2016]) und mehr als drei Viertel der Verkehrsleistung des Personenverkehrs wurde im Jahr 2010 in Deutschland mit dem MIV zurückgelegt ([DESTATIS 2013]). Es handelt sich also um ein Verkehrsmittel mit großer Bedeutsamkeit für die Berechnung von Mobilitätsemissionen.

3.2.1 PKW (mit Verbrennungsmotor)

Personenkraftwägen (enthält auch E-Autos) standen im Jahr 2018 in Deutschland 86,4% der Reisenden in deren Haushalt zur Verfügung, sind somit weiter verbreitet als Fahrräder (57%) und zudem auch für längere Reisedrecken eine Option ([SCHULZ ET AL 2020]). Dies drückt sich in einer Zahl von fast 370 Milliarden gereisten Personenkilometern des deutschen Inlands im selben Jahr aus (vgl. Flugzeug: ca. 290 Milliarden Personenkilometer) ([SCHULZ ET AL 2020]). Damit ist es ein beinahe omnipräsentes Verkehrsmittel, welches zudem auch fast die Hälfte der Klimawirksamkeit der deutschen Mobilität im Jahr 2008 ausmachte ([AAMAAS ET AL. 2013]) und als das klimaschädlichste Transportmittel auf dem Land gilt ([DANILECKI ET AL. 2016]).

Zunächst werden die direkt verursachten Treibhausgasemissionen betrachtet. Dies geschieht wie bei allen weiteren Verkehrsmitteln vor allem anhand von Emissionsfaktoren, welche für ein durchschnittliches Fahrverhalten angeben, wie viele Treibhausgase pro Kilometer und Person freigesetzt werden.

Das Modell HBEFA, welches vom Umweltbundesamt genutzt wird, wurde von [TIETGE ET AL. 2020] an tatsächliche Messdaten angepasst, Faktoren wie Besetzungsgewicht oder Fahrtwind berücksichtigt und für den deutschen Verkehr Durchschnittswerte simuliert. Das Ergebnis dieses Modells für verschiedene PKW-Segmente nach der europäischen Norm ist in Tabelle 11 vermerkt. Dabei fällt auf, dass bei Benzin-PKW zwischen der EURO-3-Norm und den aktuelleren Modellen immerhin eine Abnahme im Bereich von $23 \text{ g } \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$ erfolgte, während es bei Diesel einen Unterschied von nur $8 \text{ g } \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$ zwischen den höchsten und niedrigsten Emissionswerten gab. Das lässt eine geringere technologische Verbesserung oder einen Trend zu schwereren und größeren Fahrzeugen mit Dieselmotor vermuten.

	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6 a,b
Diesel ($\text{g } \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$)	184,8	190,6	182,3	182,3
Benzin ($\text{g } \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$)	198,6	194,7	178,2	175,4

Tab. 11: CO₂-Emissionen verschiedener PKW-Normen im HBEFA 4.1-Modell, Quelle: [TIETGE ET AL. 2020]

Ein häufig in Deutschland verwendetes und regelmäßiges aktualisiertes Modell heißt TREMOD und wurde vom ifeu Heidelberg und dem Umweltbundesamt erstellt und aktualisiert, welche Stand 2017 folgende, deutlich unter den vorherigen Ergebnissen liegende Emissionswerte für durchschnittliche PKW in Deutschland angeben:

	Benzin	Diesel
g CO ₂ pro Personenkilometer	145,67	145,39

Tab. 12: CO₂-Emissionen verschiedener PKW-Normen im TREMOD 6.03-Modell, Quelle: [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

Der Grund für diesen Unterschied zu den vorherigen Zahlen ist vor allem, dass statt Fahrzeugkilometern die Personenkilometer berücksichtigt werden, also die Emissionen auf Fahrende und Beifahrende aufgeteilt werden. Diese Berechnungen verwenden auch nur die WTT- und

TTW-Emissionen ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]) und fokussieren sich auf alle Emissionen, die im deutschen Inland geschehen ([KNÖRR ET AL. 2010]). Die TREMOD-Daten zeigen einen Rückgang der Unterschiede zwischen Fahrzeugen mit Diesel oder Benzin als Treibstoff durch neuere Fahrzeugtypen.

Zusätzlich zum Baustandard des Fahrzeugs müssen aber auch eventuelle Transportergänzungen sowie der Unterschied verschiedener Fahr Szenarien beachtet werden, was ebenfalls mit TREMOD möglich ist (Tabelle 13).

	Innerorts	Außerorts	Autobahn
PKW	226 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$	176 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$	225 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$
PKW mit Dachträger	241 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$ t	212 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$	296 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$
Wohnmobil	333 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$	309 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$	399 g $\frac{CO_2-Aeq.}{km}$

Tab. 13: Treibhausgasemissionen typischer und ausgewählter Fahrten im Straßenverkehr inklusive Emissionen zur Treibstoffbereitstellung in CO_2 -Äquivalenten pro gefahrenem Kilometer, Daten: [SCHULZ ET AL 2020]. Dachträger wurden als eine im Mehrverbrauch ca. mittlere und stellvertretende Zusatzausrüstung ausgewählt.

Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Reisegeschwindigkeiten angesetzt werden müssen. Für PKW in den beiden hier genannten Konstellationen gelten die typischen Beschränkungen von $50 \frac{km}{h}$ innerorts, $100 \frac{km}{h}$ außerorts und $130 \frac{km}{h}$ nur als Richtgeschwindigkeit auf Autobahnen, während Wohnmobile $80 \frac{km}{h}$ außerorts und $100 \frac{km}{h}$ auf der Autobahn als Beschränkungen haben (vgl. [SCHULZ ET AL 2020]). Hier ist klar erkennbar, dass gerade hohe Geschwindigkeiten zu hohen Emissionen führen, aber auch das häufige Anfahren und Abbremsen innerorts einen großen Einfluss haben kann. Zudem ist der Einfluss auf die Geschwindigkeitsbegrenzungen im Straßenverkehr der Bevölkerung zwar nur indirekt über die Wahl politischer Vertreter gegeben, aber gerade auf Autobahnen in Bereichen ohne Tempolimit ist in einem gewissen Rahmen der fahrenden Person freigestellt, die Fahrgeschwindigkeit selbst zu wählen. Die Einführung eines Tempolimits auf Autobahnen von $120 \frac{km}{h}$ würde nach [HENDZLIK ET AL. 2019] zu einer Minderung der deutschen Emissionen um 3 Millionen t CO_2 -Äquivalent führen. Insgesamt ist also dies auch etwas, das Einzelne auch bei der Wahl der eigenen Fahrtgeschwindigkeit umsetzen können. Da aber im Rückblick auf die Emissionen eines ganzen Jahres selten jede einzelne Fahrt noch genau in ihrer Geschwindigkeitsverteilung rekonstruiert werden kann, ist es für eine rückblickende Budgetierung oder im Jahresüberblick als Prognose wahrscheinlich sinnvoll, eher durchschnittliche Daten zu betrachten.

Auch in Hinblick auf die Anhänger oder Wohnwagen zeigen sich deutliche Unterschiede in den Emissionen. Insgesamt machten 2018 PKW ohne Zusatzausrüstung fast 92% der Reisen dieser Kategorie aus, während Wohnmobile bei 1,4 % lagen ([SCHULZ ET AL 2020]), sodass der Fokus weiterhin vor allem auf den einfachen PKW liegen kann.

Bei einer Befragung für den Zeitraum des Jahres 2018 war bei Reisen mit PKW eine durchschnittliche Personenzahl von 2,24 im Fahrzeug ermittelt worden ([SCHULZ ET AL 2020]), während ein entsprechendes Gesamtmodell für Reisen auf eine Besetzungszahl von 1,77 und für des Gesamtverkehr von 1,45 kam ([SCHULZ ET AL 2020]). Teilt man also die Emissionen pro Kilometer durch die Besetzungszahl, so erhält man eine Schätzung für die Emissionen pro Personenkilometer.

Zu den direkten Emissionen für einen typischen Euro-5-Norm-PKW berechneten [FOLEGA, BURCHART-KOROL 2017] nebst direkten Emissionen von über 20 kg CO₂-Äquivalent pro 100 Kilometer noch über 14 kg CO₂-Äquivalent für Wartung, Infrastruktur, Herstellung des Fahrzeugs und Bereitstellung des Benzins. Dies bedeutet also eine Treibhausgaswirkung über die Verbrennungsemissionen hinaus von ca. Zweidritteln mehr.

Dabei kann aber auch der Einsatz von emissionsreicheren aber leichteren Rohstoffen in der Produktion bei einer gewissen Betriebsdauer des Fahrzeugs durch einen geringeren Energieverbrauch beim Fahren wieder gut gemacht werden ([DANILECKI ET AL. 2016]). Mit einer Gewichtsreduktion von 100 kg können je nach Berechnungsgrundlage zwischen 0,15 bis 0,35 Liter Treibstoff auf 100 km eingespart werden ([DANILECKI ET AL. 2016] nach KOFFLER, ROHDE-BRANDENBUGER 2010; HELMS, LAMBRECHT 2007; KRINKE 2011), dennoch ist insbesondere Aluminium als Baumaterial in der Herstellung beziehungsweise Gewinnung mit einem hohen Energieaufwand und hohen Emissionen verbunden ([DANILECKI ET AL. 2016]). Es kann also nicht grundsätzlich gesagt werden, dass ein leichteres Auto immer auch das klimafreundlichere ist.

Abschließend gilt es abzuwägen, ob hier allein auf die CO₂-Emissionen geachtet werden darf. Für Modelle wie TREMOD wird CO₂ mit der geringsten Unsicherheit (kleiner als 0,5 % bei PKW mit Verbrennermotor) angegeben, während für CH₄ die Werte im Bereich von 40% bis 50 % liegen und bei N₂O zwischen 30% und knapp über 50% ([KNÖRR ET AL. 2010]). Das liegt daran, dass CO₂-Werte allein anhand des eher weniger schwankenden Kohlenstoffgehalts der Treibstoffe berechnet werden können, während für die anderen Emissionen weniger genaue Messmethoden und Standards vorliegen([KNÖRR ET AL. 2010]). Die größte Genauigkeit und den größten Anteil an den Emissionen hat CO₂, sodass es grundsätzlich für die direkten Emissionen die ausreichende Größe ist.

3.2.2 E-Autos

Gerade Personen mit hoher Bildung und vor allem akademischen Berufen entscheiden sich in Nordeuropa häufiger für den alternativen PKW-Antrieb ([SOVACOO ET AL. 2018]). Besitzen Personen ein E-Auto, so geht dies mit einer verringerten Nutzung von Fahrrädern und dem ÖPNV, einem erhöhten Mobilitätsbedürfnis und einem niedrigeren Verantwortungsgefühl gegenüber Fragen des Klimawandels einher ([SIMSEKOGLU 2018]). Dass also mit dem Kauf eines elektrischen Autos das Gefühl entsteht, so bereits seinen Beitrag zum Klimaschutz geleistet zu haben, kann anhand der letzten Aussage vermutet werden ([SIMSEKOGLU 2018]). Im Folgenden soll ermittelt werden, inwiefern die E-Technologie ihrem umweltfreundlichen Ruf gerecht werden kann.

Ein großer Nachteil bei elektrisch betriebenen PKW ist das Gewicht der Batterie, welches oft im Bereich zwischen 160 kg und 600 kg liegen kann ([HELMERS, WEISS 2017]) und diese haben auch eine geringe Energiedichte und einen hohen Preis ([BERGK ET AL. 2016]). Wie schon im Abschnitt 3.2.1 in Bezug auf PKW mit Verbrennungsmotoren erwähnt, kann das Gewicht den Energieverbrauch eines Fahrzeugs deutlich steigern, dennoch weisen E-Autos einen bis zu viermal kleineren Energieverbrauch (hier TTW-Ebene) als Verbrenner vor ([HELMERS, WEISS 2017] nach HELMERS, MARX 2012; BAUER ET AL. 2015). Bezieht man die gesamte Elektrizitätsproduktion und Bereitstellung (WTT) mit ein, so sind E-Autos selbst bei Nutzung von Kohlekraftwerken als Stromerzeuger und einem ineffizienten Stromnetz

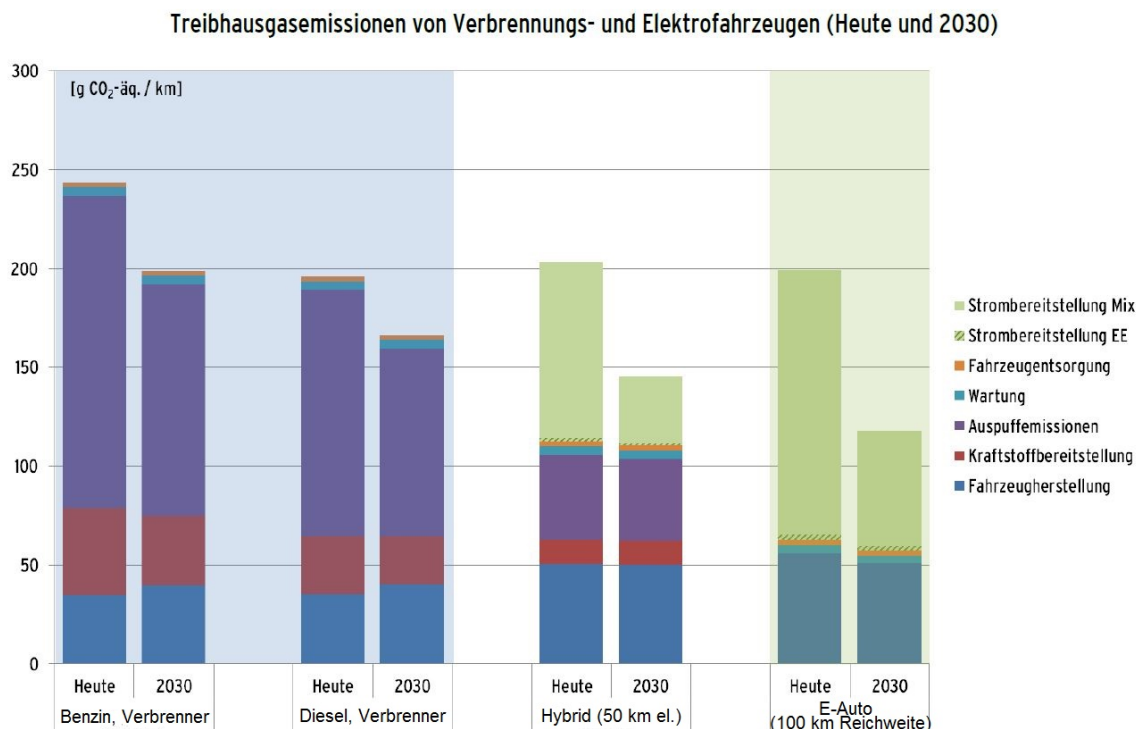


Abb. 20: Vergleich der Treibhausgasemissionen verschiedener PKW 2016 und Ausblick 2030, Quelle (leicht verändert): [HELMERS ET AL. 2016]

um 11% energieeffizienter als die Benzin- und Diesel-PKW, während mit erneuerbaren Energien und einem modernisierten Stromversorgungsnetz bis zu 77% mehr Energieeffizienz erreicht werden kann ([HELMERS, WEISS 2017]). Der Nutzen der Elektromobilität ist also sehr von der Stromversorgung abhängig.

Die Herstellung dieser Fahrzeuge ist aber ebenfalls sehr energieintensiv. So wurden beispielsweise über eine Metastudie Werte von ca. 30 bis 62 g CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde im Betrieb ermittelt, welche allein durch die Herstellung des Fahrzeugs noch zu den Emissionen durch die Stromgewinnung addiert werden müssten ([HELMERS, WEISS 2017] nach HAWKINS ET AL. 2012). Dies wird auch beim Vergleich des Stands in Deutschland erkennbar (Abb. 20). Dabei ist der blaue Balken, also die Emissionen pro Kilometer durch die Fahrzeugherstellung, bei Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb höher als bei den mit Benzin oder Diesel betriebenen PKW. Damit ist (Stand 2016) sogar das Dieselfahrzeug hier mit Hinblick auf die CO₂-Äqu.-Emissionen noch klimafreundlicher als das E-Auto([HELMERS ET AL. 2016]). Gerade die Batterieherstellung macht nach anderen Studien dabei ca. 11 bis 31 g CO₂-Äquivalente pro Kilometer die das Fahrzeug bei typischer Lebenszeit fährt aus, wobei die Emissionen allein durch die Nutzung von Solarstrom in der Batterieproduktion halbiert werden können ([HELMERS, WEISS 2017] nach HELMERS, DIETZ 2017), da knapp 55% der Treibhausgasemissionen durch den Stromverbrauch der Batterieproduktion entstehen ([AGORA ENERGIEWENDE 2019]). Der abnehmende Trend der Emissionen in Abbildung 20 ist aber vor allem erkennbar durch den Wandel des deutschen Strommix hin zu erneuerbaren Energien erklärbar und so entsteht der größte Anteil der Emissionen eines E-Autos in Deutschland aktuell durch den Strom aus Kraftwerken mit fossilen Energieträgern, mit dem diese betrieben werden([HELMERS ET AL. 2016]).

Weitere Technologien existieren bereits in Form von Plug-In-Hybriden (auch siehe Abb. 20), bei denen sowohl ein E-Motor also auch ein Verbrennermotor im Auto verbaut sind, was jedoch somit zu einem hohen Gewicht des Fahrzeugs führen kann, also die Energieeffizienz niedriger werden lässt. Vor allem durch den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung ist der Hybrid nach der Prognose für 2030 vollständig von elektrischen Fahrzeugen überholt ([HELMES ET AL. 2016]). Da aber bei Hybridfahrzeugen weiterhin ein fossiler Energieträger verwendet wird, sehen [PROGNOS, ÖI, WI 2020] dies nur als Übergangstechnologie bei noch nicht vollständig ausgebautem E-Tankstellen- und ÖPNV-Netz, welche ab 2030 von der vollständigen Elektrifizierung abgelöst wird.

3.2.3 Weitere Antriebstechnologien

[PROGNOS, ÖI, WI 2020] sehen bei Brennstoffzellen kein großes Potential aufgrund der hohen Kosten und des hohen Aufwands beispielsweise eines Wasserstofftankstellennetzwerks ([PROGNOS, ÖI, WI 2020]). Dabei ist die Grundidee, statt mit einer Batterie einen schneller betankbaren und energiedichten Stoff mitzuführen und damit Strom zu erzeugen grundsätzlich eine mit vielen Vorteilen ([BERGK ET AL. 2016]). Die Wasserstofffahrzeuge sind aber nur im Bereich von ca. 1,6 bis 2,6 mal mehr energieeffizient als Autos mit Verbrennermotoren, während E-Autos oft den Faktor 3,3 bis 3,6 erreichen ([HELMERS, WEISS 2017]). Dennoch besteht gerade beim Einsatz von Windenergie zur Wasserstoffherzeugung das Potential, statt über 80 Gramm CO₂-Äquivalent pro MJ Energie im Treibstoff bei normalem Benzin Emissionen im Bereich von um die 20 Gramm zu erreichen ([GRANOVSKII ET AL. 2006]), also sind hohe Einsparungen möglich. Wird jedoch Erdgas zur Erzeugung des Wasserstoffs verwendet, bleiben die Emissionen gleich, die Investitionskosten sind jedoch um ein fünffaches niedriger als bei der Verwendung von Windkraft zur Wasserstoffherzeugung ([GRANOVSKII ET AL. 2006]), sodass die Gefahr bestehen könnte, dabei ähnlich klimaschädlich zu fahren, wie mit dem normalen Verbrennermotor. Bei vielen elektrisch betriebenen Fahrzeugtypen sind die fahrenden Personen selbst zu einem großen Anteil fähig, die Emissionen durch die Wahl eines Ökostromtarifs oder durch die Nutzung eigener Solaranlagen zum Laden des E-Fahrzeugs zu senken, während es bei Wasserstofffahrzeugen vermutlich schwieriger wird, die Herstellungsart des Wasserstoffs selbst zu überprüfen. Weitere Technologien sind der Einsatz von Erdgas, welches etwa 0,17% der PKW in Deutschland im Jahr 2018 nutzten oder Flüssiggas mit einem Anteil von ca. 0,85% im selben Jahr ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 3]). Es besteht besonders bei Erdgas das Potential, dass damit weniger Treibhausgase emittiert werden ([BERGK ET AL. 2016]). Dennoch handelt es sich dabei vor allem um eine fossile Energiequelle, welche bei der Verbrennung Emissionen freisetzt und somit nicht zum komplett emissionslosen Fahrzeug wird, selbst wenn nicht fossiles Gas verwendet wird.

3.2.4 Car-Sharing

Statt ein eigenes Auto zu besitzen etablieren sich in manchen Städten Car-Sharing Angebote, bei welchen die PKW von verschiedenen Personen geteilt werden. In einer Studie in den USA sanken die Treibhausgasemissionen pro Haushalt um etwa 800 kg, während eine deutsche Studie Effekte von etwa 150 bis 310 kg CO₂-Einsparungen pro Person maß, die am Car-Sharing teilnahmen ([JUNG, KOO 2018] nach MARTIN, SHAHEEN 2011; FINRKORN, MÜLLER 2011). Dabei ist jedoch zu beachten, inwiefern das Car-Sharing das deutlich umweltfreundlichere Nutzen des

ÖPNV ersetzt, oder dadurch das eigene Auto ersetzt wird und so weniger neue Fahrzeuge produziert werden müssen. Denn in anderen Studien konnten sowohl Zunahmen als auch Abnahmen der Busnutzung durch Car-Sharing-Programme gemessen werden ([JUNG, KOO 2018] nach MARTIN, SHASHEEN 2011). Insgesamt konnten [JUNG, KOO 2018] durch Umfrage und Modellierung anhand einer Nutzergruppe zeigen, dass der Wechsel mancher Teilnehmenden vom Bus zum Car-Sharing den Umstieg vom privaten zum geteilten Autofahren anderer stark in der Wirkung übersteigen konnte, es also insgesamt eine Zunahme der Emissionen gab. Bei all diesen Ergebnissen fließen verschiedene Annahmen in Bezug auf den Weiterbesitz eines privaten PKW parallel zum Car-Sharing, der Emissionsreduktion durch das Beenden der Nutzung von ÖPNV und anderer Bereiche mit ein, sodass hier noch keine klaren Aussagen erkennbar sind. Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Studie in der Stadt München, laut der auf der Reduktionsseite zwar eine Flotte neuerer und kleinerer geteilten Fahrzeuge steht, aber auch hier wird eine Verringerung der Nutzung von Bus und Bahn befürchtet ([SCHREIER ET AL 2015]). Einen wirklichen Unterschied kann man also vermutlich nur dadurch erzielen, dass die Nutzung von Car-Sharing das Ende des privaten Autobesitz bedeutet und damit auch Verhaltensänderungen einher gehen, so auch das Fazit von [AMATUNI ET AL. 2020], sodass insgesamt weniger Kilometer mit den PKW zurückgelegt werden. Dies kann auch dadurch geschehen, dass statt dem Car-Sharing ein „Carpooling“ statt findet. Die PKW werden also auf einer Fahrt mit mehreren Personen geteilt, sodass die Sitzkapazität möglichst voll ausgenutzt wird, welches im Gegensatz zum Car-Sharing signifikantere Ergebnisse erzielen kann ([AMATUNI ET AL. 2020]).

3.2.5 CO₂-Rechner

Um verschiedene Berechnungsgrundlagen zu vergleichen, wurden folgende vier „Testfahrzeuge“ mit verschiedenem Antrieb und Verbrauchsdaten für ein Jahr nahe der im Rechner der [UMWELTBUNDESAMT 2021, 1] angegebenen Standarddaten, in verschiedene CO₂-Berechnungsmethoden eingegeben. Damit soll überprüft werden, inwiefern sich die Ergebnisse der Rechner unterscheiden und welche Angaben die Methoden dazu nutzen.

Auto 1: Mittelklasse, Verbrennungsmotor, Diesel, 8 Jahre alt, Verbrauch: ca. 7 L/100km, ca. 10 000 km Fahrt in einem Jahr

Auto 2: SUV, Verbrennungsmotor, Benzin, 3 Jahre alt, Verbrauch ca. 12 L/100km, ca. 10 000 km Fahrt in einem Jahr

E-Auto: Mittelklasse, rein batteriebetrieben (Deutscher Strommix), 1 Jahr alt, Verbrauch ca. 20 kWh/100km, ca. 10 000 km Fahrt in einem Jahr

Plug-In-Hybrid: Mittelklasse, Benzin und batteriebetrieben (wenn möglich deutscher Strommix), 1 Jahr alt, Verbrauch ca. 17 kWh/100km und ca. 7L/100km, ca. 10 000 km Fahrt in einem Jahr

Die verschiedenen CO₂-Rechner und die hier verwendeten Angaben werden hier verglichen, die Berechnungsergebnisse sind in der Tabelle 14.

Resurgence: Verwendet wurde für Auto 1: „Lower Medium“, Auto 2: „Petrol Duel Purpose 4X4“ und für den Hybrid war nur „Large“ eine mögliche Option. Die Kilometer wurden in Meilen umgerechnet (ca. 6200) und kein Anteil von Biotreibstoffen angegeben. Die Altersangabe ließ nur älter/jünger als 14 Jahre übrig und der Verbrauch war nicht anpassbar. Resurgence berücksichtigt Herstellungsemissionen und der Anteil der Nutzung des Fahrzeugs kann angegeben werden und dadurch indirekt eine Besetzungszahl eingerechnet werden.

	Auto 1	Auto 2	E-Auto	Hybrid	Herstellung ¹	Infrastr. ²	Besetz. ³	Energie ⁴
UBA	2,61 t CO ₂ -Äqu.	3,22 t CO ₂ -Äqu	0,87 t CO ₂ -Äqu	2,62 t CO ₂ -Äqu	Ja	Ja	Nein	(Ja)
Resurgence	2,02 t CO ₂ -Äqu.	3,53 t CO ₂ -Äqu	0,85 t CO ₂ -Äqu	2,60 t CO ₂ -Äqu	Ja	-	Ja	-
Carbon-Footprint	1,78 t CO ₂ -Äqu.	2,6 t CO ₂ -Äqu	0,0 t CO ₂ -Äqu	1,08 t CO ₂ -Äqu	Nein	Nein	Nein	Nein
UK Gov. (nach Treibstoff)	2,32 t CO ₂ -Äqu.	3,50 t CO ₂ -Äqu	0,52 t CO ₂ -Äqu	-	Nein	Nein	Nein	Ja
UK Gov. (nach Fahrzeug)	1,76 t CO ₂ -Äqu.	2,78 t CO ₂ -Äqu	0,59 t CO ₂ -Äqu	2,11 t CO ₂ -Äqu	Nein	Nein	Nein	Ja
Mobitool	2,09 t CO ₂ -Äqu.	2,84 t CO ₂ -Äqu	0,89 t CO ₂ -Äqu	2,16 t CO ₂ -Äqu	Ja	Ja	Ja	Ja

Tab. 14: Vergleich von CO₂-Rechner für PKW (Quellen: [UMWELTBUNDESAMT 2021, 1], [MITCHELL 2009] [CARBON FOOTPRINT 2021], [UK GOVERNMENT 2020], [MOBITOOL 2020])

¹: Emissionen aus der Fahrzeugherstellung sind mit einberechnet

²: Emissionen zum Bau und Erhalt der Infrastruktur werden mit einberechnet

³: durchschnittliche Besetzungszahl (Anzahl Personen in Fahrzeug) kann angegeben werden

⁴: Emissionen für die Bereitstellung des Energieträgers (v.a. bei Benzin/Diesel) werden mit einberechnet

Carbon-Footprint: Dieses Tool rechnet Verbrauchsangaben der Hersteller mit Faktor 1,229 in „reale“ Angaben um und ermöglicht verschiedene Berechnungsmethoden (realer Spritverbrauch, Kilometerzahl,...). Hier wurde jedoch die Verbrauchsangabe allein verwendet. E-Autos waren nur wenige verfügbar, sodass hier der eGolf (2019) verwendet wurde und für den Hybrid das Modell Toyota Yaris Hybrid Active. Strom wird scheinbar als emissionslos angenommen, was in Kombination mit den nicht berücksichtigten Herstellungsemissionen zu einem emissionslosen Ergebnis für das E-Auto führte.

UK Government - Treibstoff (Tabellenblatt „Fuels“): Die Datentabelle gibt Durchschnittswerte aus Großbritannien an, welche sich von denen in Deutschland unterscheiden können. Hier musste die eigene Berechnung anhand von Verbrauch und Kilometerzahl erfolgen. Kein Anteil von Biotreibstoffen wurde angegeben und für den Strom der UK Strommix. Beim Hybrid wäre die Berechnung in je einen Anteil Strom und Benzin aufzuteilen, was hier jedoch nicht klar geschehen konnte, da nicht klar war, wie viele Kilometer rein strombetrieben und welche Strecke mit dem Verbrennungsmotor zurückgelegt wurden. Folgende Kategorien wurden für die anderen Fahrzeuge verwendet: Auto 1: Diesel (100% mineralisch), Auto 2: Petrol (100% mineralisch), Auto 3: im UK-Strommix geladen

UK Government - Fahrzeugspezifisch(Tabellenblatt „Passenger vehicle“, „WTT- pass vehs & travel - land“ und „UK Electricity for EVs“): Auch hier handelt es sich um eigene Berechnungen, allerdings anhand von Fahrzeugtyp und Kilometerzahl. Folgende Fahrzeugtypen wurden verwendet: Auto 1: „lower medium“, Auto 2: „Dual Purpose 4X4“, E-Auto und Hybrid: „lower medium“. Für den Hybrid müssen alle drei Tabellenblätter verwendet werden. Zusätzliche Werte für Besetzungszahl und Infrastruktur etc. könnten aus einer zusätzlichen Datenquelle mit eingerechnet werden. Hier wurde also immer der Wert für die Treibhausgasemissionen zusammengesetzt aus den direkten Emissionen pro Kilometer und dem indirekten Anteil zur Energiebereitstellung aus dem „WTT“-Tabellenblatt.

Mobitool: Die Datengrundlage gibt Schweizer Durchschnittswerte an und ist somit ebenfalls nur begrenzt auf Deutschland übertragbar. Um detailliertere Angaben zu ermöglichen wurde angenommen, dass die Fahrten alle in den Bereich „lokal“ fallen. Folgende Werte wurden für die PKW genommen: Auto 1: aufgrund Alter Euro 5, Verbrauch angepasst, Besetzungszahl und Gewicht bei Voreinstellungen (1,6; 1700kg) belassen; Auto 2: aufgrund Alter Euro 6, Verbrauch angepasst, Besetzungszahl und Gewicht bei Voreinstellungen (1,6; 1380kg) belassen; Auto 3: Verbrauchermix CH als Strommix, Verbrauch angepasst, ansonsten Voreinstellungen übernommen; Auto 4: EURO 6 mit Verbrauchermix CH, Verbrauch angepasst. Die Emissionen von Fahrzeugherstellung und -unterhalt sowie für die Infrastruktur werden als mit dem Gewicht des Fahrzeugs proportional angenommen.

Teils sind die Methodenbeschreibungen dieser CO₂-Rechner nur unzureichend verfügbar, folgende Unterschiede können aber abgeleitet werden:

- Emissionsfaktor für Treibstoffe
- Einbezug von WTT-Emissionen und von Fahrzeugbereitstellung und Infrastruktur
- Annahmen bezüglich Fahrzeugklassen, Gewicht, etc.

Der erste und der letzte Punkt können auf der unterschiedlichen Datenbasis und des unterschiedlichen Alters der Daten basieren. Die indirekten Emissionen wurden bei manchen Rechnern vernachlässigt und gerade die Infrastruktur ist nur bei [UMWELTBUNDESAMT 2021, 1] erwähnt worden, was sich auch darin zeigt, dass die Emissionen dabei etwas höher ausfielen (siehe Abb. 21). CarbonFootprint liegt dabei am eher unteren Ende, da hier nur allein die Emissionen

berücksichtigt werden, die direkt bei der Verbrennung entstehen und das Auto mit elektrischem Antrieb als emissionslos angenommen wurde.

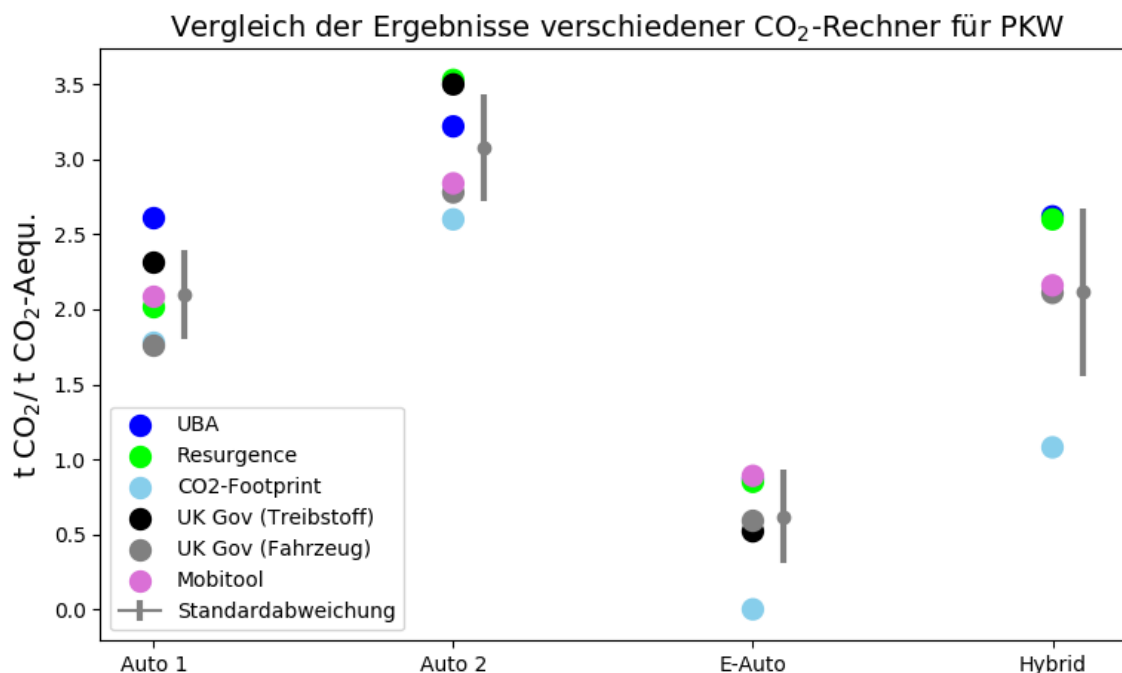


Abb. 21: Vergleich von CO₂-Rechnern für PKW, eigene Darstellung

Das genaue Gegenteil, also das Berechnen dieser indirekten Treibhausgasemissionen auf allen Ebenen führte bei Mobitool aber zu einem eher mittleren Wert, wobei beim E-Auto damit der höchste Wert ermittelt wurde, da die Batterieherstellung mit berücksichtigt wurde. Insgesamt handelt es sich dabei in Bezug auf die verschiedenen Emissionsquellen in Betrieb und Anschaffung des Fahrzeugs um den umfassendsten CO₂-Rechner. Der einzige Nachteil ist die Beschränkung auf Schweizer Daten, was im übernächsten Abschnitt im Fazit aber noch ausführlicher besprochen wird.

3.2.6 Motorräder, Mofas und ähnliches

Diese Fahrzeuge machten 2017 weniger als 1% der Personenkilometer Deutschlands aus ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]), sodass diese hier nur kurz behandelt werden. Mit einem den PKW sehr ähnlichen Prinzip können die Gesamtemissionen berechnet werden, wobei bei größeren Fahrzeugen dieser Klasse 1,1 Personen das Verkehrsmittel 2010 teilten, während es bei Kleinkrafträdern eine einzelne Person war die im Durchschnitt alleine auf dem Fahrzeug saß ([KNÖRR ET AL. 2016]). Auch hier besteht die Möglichkeit der Elektrifizierung, welche in Prognosen für eine Entwicklung des Verkehrssektor unter dem 2°C-Ziel weltweit vor allem in einkommensreicheren Ländern einen nennenswerten Anteil am Verkehr insbesondere als Transportmittel für die letzten Kilometer zur Haustür haben kann ([AGORA VERKEHRSWENDE ET AL. 2020]). Angesetzt wird hier der Emissionsfaktor von 106 g CO₂ pro Fahrzeugkilometer für aktuell verwendete Krafträder und Mofas ([STECK ET AL. 2019] nach dem Modell TREMOD 5.82), was eine Abschätzung anhand von Durchschnittsdaten ermöglicht.

3.2.7 Zusammenfassung und Diskussion MIV

Nach all diesen verschiedenen Annahmen soll nun verglichen werden, welche Vereinfachungen der Emissionsberechnung bei Verbrennermotoren mit dem größten Fehler einhergehen können (sortiert nach Größe). Dazu werden Daten für die höchsten bzw. niedrigsten Emissionsfaktoren die durch ein Kriterium gegeben sind voneinander abgezogen und so anhand dieser Differenz ein möglicher Schwankungsbereich angegeben. So wird beim ersten Beispiel also der Unterschied zwischen dem Emissionsfaktor welcher für Fahrten außerorts angegeben wird von dem Faktor für Fahrten innerorts abgezogen. Je Kategorie habe ich auch eine Lösungsidee angegeben, wie bei der Berechnung der Emissionen diese Schwankungen umgangen werden könnten.

- Außerorts vs. Innerorts: $\Delta\text{Emissionen} \hat{=} 50g \frac{CO_2\text{-Aequ.}}{P_{km}}$ ([SCHULZ ET AL 2020])
→ nebst Mittelwerten tatsächliche Verbrauchsdaten verwenden
- Mit vs. ohne Dachträger: $\Delta\text{Em.} \approx 40g \frac{CO_2\text{-Aequ.}}{P_{km}}$ ([SCHULZ ET AL 2020])
→ nebst Mittelwerten tatsächliche Verbrauchsdaten verwenden
- Mit vs. ohne Herstellung: $\Delta\text{Em.} \hat{=} 37g \frac{CO_2\text{-Aequ.}}{P_{km}}$ ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2])
- EURO 3 vs. EURO 6a,b (Benzin): $\Delta\text{Em.} \hat{=} 23,9g \frac{CO_2}{km}$ ([TIETGE ET AL. 2020])
→ nebst Mittelwerten tatsächliche Verbrauchsdaten verwenden
- Mit vs. ohne WTT: $\Delta\text{Em.} \hat{=} 22g \frac{CO_2\text{-Aequ.}}{P_{km}}$ ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2])
- EURO 4 vs. EURO 6a,b (Diesel): $\Delta\text{Em.} \hat{=} 8,3g \frac{CO_2}{km}$ ([TIETGE ET AL. 2020])
→ nebst Mittelwerten tatsächliche Verbrauchsdaten verwenden
- Mit vs. ohne Infrastruktur: $\Delta\text{Em.} \hat{=} 5g \frac{CO_2\text{-Aequ.}}{P_{km}}$ ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2])
→ evt. vernachlässigbar
- Benzin vs. Diesel (WTT, TTW): $\Delta\text{Em.} \hat{=} 0,3g \frac{CO_2}{P_{km}}$ ([SCHELEWSKY ET AL. 2020])
→ evt. vernachlässigbar

Dabei ist erkennbar, dass allein durch das Verwenden der tatsächlichen Verbrauchsdaten die meisten „Fehlerquellen“ ausgeschlossen werden können. Wenn echte Verbrauchsdaten des genutzten Fahrzeugs verfügbar sind (manche neuere PKW verfügen zusätzlich über eine Verbrauchsanzeige zur Förderung von treibstoffärmerem Fahrstil) werden Annahmen zum Fahrzeug und Fehleinschätzungen von Verbrauchsvariationen im realen Betrieb umgangen. Das Ablesen der Kilometeranzeige kann eine ungenauere Abschätzung anhand von Routenplanern ersetzen und durch das Aufbewahren von Kassenzetteln oder durch Notizen beim Tanken kann der Treibstoffverbrauch genau nachverfolgt werden. Dies ist bei einem alleine genutzten Privatfahrzeug häufig möglich, könnte aber auch bei Carsharing und Dienstfahrzeugen leicht etabliert werden, indem Fahrten- und Tanktagebücher (evt. auch elektronisch) geführt werden. Von [CARBON FOOTPRINT 2021] wird in deren FAQ auch empfohlen für die größte Genauigkeit echte Treibstoffverbrauchsdaten zu verwenden, gefolgt von der Umrechnung anhand der Kilometeranzahl und dem Durchschnittsverbrauch pro Kilometer. Wenn zudem die WTT-Emissionen und die Herstellungsemissionen des Fahrzeugs verwendet werden, verbleiben nur noch geringfügig ins Gewicht fallende Faktoren nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich kann für alle Berechnungen auch allein CO_2 schon als guter Indikator für die Emissionen dienen, wie bereits erwähnt wurde. Leider liegen in Bezug auf alternative Antriebsformen weniger Daten vor, weshalb hier parallel zu den Fahrzeugen mit Verbrennermotoren der Fokus auf dem Verbrauch, den WTT-Emissionen und insbesondere bei Fahrzeugen mit Batterien auch auf der Fahrzeugherstellung liegt.

Weniger häufig in CO_2 -Rechnern möglich, aber sinnvoll ist zudem der Einbezug der durch-

schnittlichen Besetzungszahl des Fahrzeugs, da die Gewichtszunahme durch das Körpergewicht einer weiteren Person meist klein im Vergleich zum Gesamtgewicht des Fahrzeugs ist, sodass deutlich Emissionen eingespart werden können, wenn Fahrten gemeinsam zurückgelegt werden. Für eine möglichst genaue Berechnung sollte also folgendes gelten: **echte Verbrauchsdaten** des Fahrzeugs verwenden, Emissionen für **Fahrzeugherstellung** benutzen und Emissionen zur **Bereitstellung des Energieträgers** (WTT) verwenden.

Dies alles erfüllt der CO₂-Rechner Mobitool, der allerdings Daten aus der Schweiz nutzt, sodass es nicht vollständig auf Deutschland übertragbar ist. Zwar liegt im EU-Vergleich Deutschland mit am nächsten an den stark über EU-Durchschnitt liegenden Emissionen der Schweiz bei neu zugelassenen PKW, weicht aber mit einem Wert der Emissionen eines durchschnittlichen Neuwagens von 134,1 $\frac{gCO_2}{km}$ vom deutschen Wert von 127,4 $\frac{gCO_2}{km}$ im Jahr 2017 dennoch deutlich ab ([DE HAAN ET AL. 2019]). Deshalb werden die Zahlen wie folgt angepasst und können je auch an aktuelle Daten für Deutschland angepasst werden:

Berechnet werden die Emissionen, indem sowohl die direkten Treibhausgasemissionen aus dem Verbrennungsmotor (wenn vorhanden), die Emissionen aus der Herstellung und Wartung des Fahrzeugs und der Anteil aus der Herstellung und Anlieferung des Energieträgers addiert werden. Dabei sind alle Emissionen in CO₂-Äquivalenten angegeben, wobei bei den direkten TTW-Emissionen die Berechnung anhand von ergänzenden Daten speziell für Methan und N₂O erfolgen musste.

$$Emissionen = d \cdot \frac{WTT+TTW+Fahrzeug}{B \cdot 1000} \left(\frac{tCO_2 Aequ.}{Person} \right)$$

mit B: Besetzungszahl, d: gefahrene Strecke in Kilometern

indirekte Emissionen (Energie): $WTT = c_{Sprit} \cdot V_{Sprit} + c_{el} \cdot V_{el}$

mit V_{Sprit} : Verbrauch Benzin/Diesel in Liter pro 100 km,

V_{el} : Verbrauch Strom in kWh pro 100 km

direkte Emissionen: $TTW = c_3 \cdot V_{Sprit} + c_{N_2O} \cdot V_{Sprit} + c_{CH_4} \cdot V_{Sprit}$

indirekte Emissionen (Herstellung, Wartung):

$$Fahrzeug = c_6 \cdot B + c_{Batterie} * \frac{E}{150000km}$$

mit E: Kapazität der Batterie in kWh, 150 000 km entspricht erwartete Lebensfahrleistung
Die Werte für die verschiedenen Energieträger in Tabelle 15 werden dazu verwendet. Bei der Herstellung des Fahrzeugs wird ein Basiswert der Emissionen angenommen, welcher sowohl bei PKW mit Verbrennermotoren als auch mit elektrischem Antrieb entsteht. Zudem wird die Emission zur Herstellung der Batterie bei E-Autos und Hybridfahrzeugen dazu addiert, welche nach [AGORA ENERGIEWENDE 2019] als linear von der Kapazität (also dem Energiespeichervermögen) der Batterie angenommen wird. Dazu liegen sehr unterschiedliche Berechnungen für den Faktor c_4 vor, wobei hier der Berechnung von [AGORA ENERGIEWENDE 2019] gefolgt wird, welche im oberen mittleren Bereich der Vergleichsstudiendaten liegt. Hier wird nicht wie bei [MOBITOOL 2020] durch das Batteriegewicht ein Rückschluss auf die Herstellungsemission gezogen, denn bei den meisten E-Fahrzeugen ist die Kapazität der Batterie ein wichtiges Kaufkriterium und somit leichter erhebbar als das Gewicht.

	Bezin	Diesel	Benzin E10	E-Auto
$c_{Sprit}(\frac{kgCO_2e}{l})(WTT)^1$	0,0046	0,0057	0,0054	0
$c_{el}(\frac{kgCO_2e}{kWh})(WTT)^2$	0	0	0	0,00468
$c_3(\frac{kgCO_2}{l})^3$ (direkt)	0,0236	0,0263	0,0236	0
$c_{N_2O}(\frac{kgCO_2e}{l})^4$ (direkt)	0,0000420	0,000342	(Benzin)	0
$c_{CH_4}(\frac{kgCO_2e}{l})^4$ (direkt)	0,0000777	0,00003163	(Benzin)	0
$c_6(\frac{kgCO_2e}{Pkm})^5$	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365
$c_{Batterie}(\frac{kgCO_2e}{kWh})^6$	-	-	-	145

Tab. 15: Konstanten für Emissionsberechnung für PKW, Hybrid je zusammengesetzt aus Faktoren für E-Mobilität und Bezin/Diesel, Datenquellen:

- 1: [SCHMIED, MOTTSCHALL 2014] (S.26, Differenz aus TTW und WTW)
- 2: [ICHA, KUHS 2020], Strommix DE 2018
- 3:[JUHRICH 2016], [KNÖRR ET AL. 2016]
- 4: [UMWELTBUNDESAMT 2020, 2], [KNÖRR ET AL. 2016] (Umrechnung über Heizwert und Dichte von TJ zu Liter),[MYHRE ET AL. 2013] (Umrechnungsfaktor in Äquival.)
- 5:[ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]
- 6: [AGORA ENERGIEWENDE 2019]

Um diese Berechnung zu überprüfen werden drei eher durchschnittliche Fahrzeuge in [MOBITOOL 2020] eingegeben und durch eine Besetzungszahl von 1 die Emissionen für das Fahrzeug pro 1000 Kilometer ermittelt (siehe Abb. 22).

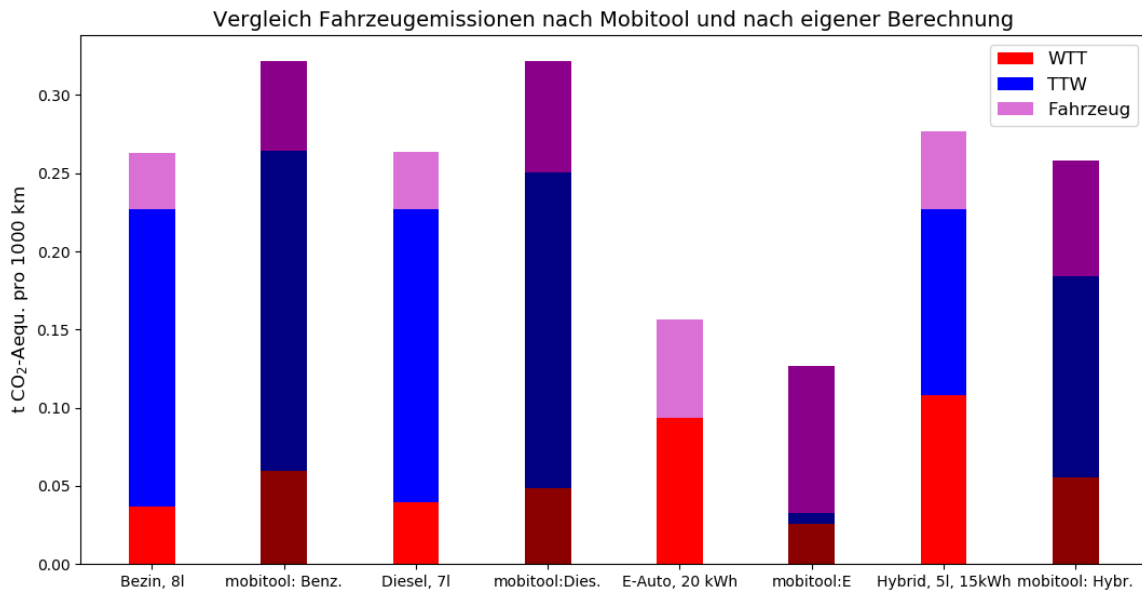


Abb. 22: Vergleich der eigenen Emissionsberechnung (je linker Balken) mit den Werten aus der Berechnung mit mobitool (je rechter dunklerer Balken), eigene Darstellung, Datenquellen: [MOBITOOL 2020],[AGORA ENERGIEWENDE 2019], [ICHA, KUHS 2020],[SCHMIED, MOTTSCHALL 2014], [KNÖRR ET AL. 2016],[JUHRICH 2016]

Im Vergleich mit mobitool ist zunächst erkennbar, dass bei den PKW mit Verbrennermotoren die eigenen Berechnungen unter denen von mobitool liegen, da jedoch nach

[DE HAAN ET AL. 2019] für die Schweiz neu zugelassene Fahrzeuge aufgrund der höheren Emissionen wohl auch im Schnitt eher im Bereich der größeren Fahrzeuge liegen, ist zumindest der größere Anteil der Emissionen für die Fahrzeugherstellung und -wartung erklärbar. Bei den elektrischen Fahrzeugen wird bei mobitool zudem statt der Kapazität das Gewicht abgefragt, sodass die Grundannahmen belassen wurden, während bei der eigenen Berechnung die Kapazität angepasst wurde. Dies ist also schwer vergleichbar, berechnet man jedoch mit den selben Annahmen im Rechner des UBA die Gesamtemissionen, so liegen diese sogar noch niedriger (0,21 t (nur) CO₂ für das Benzinfahrzeug, 0,22 t (nur) CO₂ für Diesel), sodass die Werte der eigenen Berechnung plausibel bleiben. Dies zeigt sich auch im Vergleich mit [MOTTSCHALL, BERGMANN 2013], die für einen PKW im Jahr 2008 Gesamtemissionen inklusive Infrastruktur und Fahrzeugbau pro Personenkilometer von ca. 165 g CO₂-Äquivalent berechneten, während sich bei der eigenen Berechnungsmethode bei gleicher Besetzungszahl von 1,5 Personen und bei 7 Litern Benzinverbrauch (da hier kein Wert angegeben war als Schätzwert) ein Wert von 168 g CO₂-Äquivalent ergab. Auch hier liegt die Größenordnung nah beieinander, ist jedoch an unterschiedliche Verbrauchsdaten und Fahrzeugtypen anpassbarer.

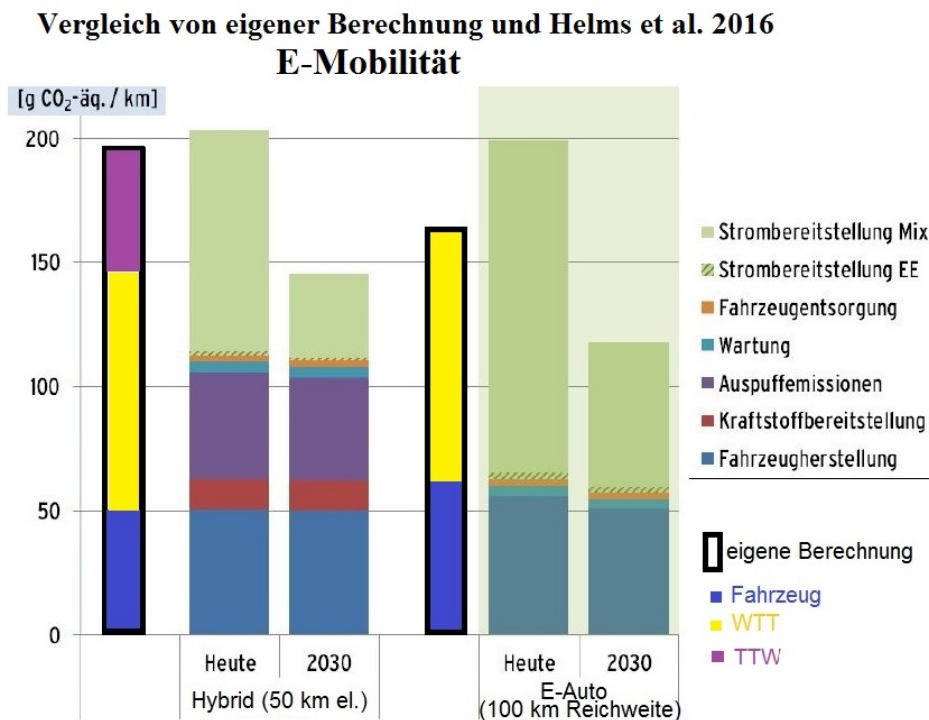


Abb. 23: Vergleich der eigenen Elektromobilität-Berechnung (je linker Balken) mit den Werten aus [HELMs ET AL. 2016], Darstellung bearbeitet nach [HELMs ET AL. 2016]

Dass bei den elektrischen Antrieben durch die Unterschiede der Emissionen im Strommix zwischen Deutschland und Schweiz die größten Unterschiede entstehen ist auffällig. Um eine Überschätzung der Emissionen der beiden Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb ausschließen zu können dient ein Vergleich mit älteren Daten zur E-Mobilität in Deutschland (Abbildung 23). Im Vergleich zu den Daten von [HELMs ET AL. 2016] fällt auf, dass die eigenen Berechnungen gut in die Aussage derer Veröffentlichung passen, da vor allem die etwas neueren Daten zum deutschen Strommix (Stand 2018) auch abbilden, dass der Anteil der erneuerbaren Energien zugenommen hat und dadurch auch die Treibhausgasemissionen der Fahrzeuge durch die

Nutzung des Stroms geringer ausfielen. Die Prognose von [HELMs ET AL. 2016] für 2030 liegt in einem Bereich, der mit einer konsequenten Energiewende erreichbar scheint und die eigenen Werte auf dem Weg dazwischen.

Insgesamt ist die hier vorgestellte eigene Berechnungsweise im Abgleich mit anderen Quellen eine Möglichkeit die Vorteile von mobitool zu nutzen, dabei jedoch auf die Daten für Deutschland zu setzen und so ein realistisches Bild zu erhalten.

3.3 Flugzeuge

Besonders herausfordernd ist beim Versuch die Flugzeugemissionen weltweit zu verringern, dass die Verantwortung schwer zuzuordnen ist. Oft wird der Warentransport mit dem Personentransport kombiniert, also der Frachtraum auch dafür mitgenutzt, während bei z.B. Zügen oft ein unabhängiger reiner Güterverkehr besteht. Betrachtet man die Staatsebene, so wird schnell unklar ob das Land des Starts, des Zielflughafens oder des Luftraums nun diese Emissionen in sein Budget übertragen sollte. Diese Komplexität führte dazu, dass das Kyoto Protokoll für internationale Flüge keine nationalen Emissionszielvorgaben umfasste, diese Emissionen also schlicht weg keine große Beachtung der Regulierung fanden und es bis heute, vor allem vor dem Hintergrund ökonomischer Begründungen, zu keiner nennenswert klimafreundlicheren Gestaltung des Flugverkehrs kam ([BOWs-LARKIN ET AL. 2016]).

Die meisten Reisenden fliegen nicht des Fliegens wegen, sondern weil ihnen das Betreten eines Flugzeugs etwas ermöglicht, dass sie nicht anders erreichen können ([BOWs-LARKIN ET AL. 2016]).

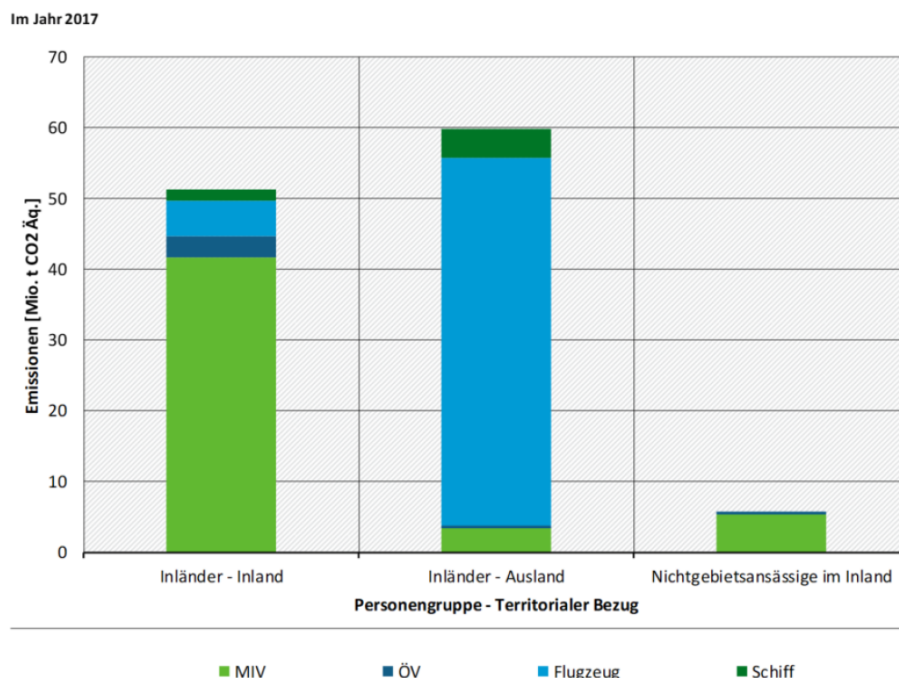


Abb. 24: Emissionen der Reisemobilität nach Zielort und Reisenden, Quelle: [SCHULZ ET AL 2020]

Da also die Dienstleistung des Fluges selbst nicht erstrebenswert zu sein scheint, ist ein Ersatz des Fluges somit gut denkbar. Zudem gaben bei einer Umfrage mit Urlaubsflugreisenden in

Deutschland fast drei Viertel der Befragten ein schlechtes Gewissen bezüglich der Auswirkungen ihres Flugverhaltens auf das Klima an ([FUR 2020]). Es besteht also grundsätzlich kein Interesse am Fliegen an sich und sogar eine gewisse Ablehnung gegenüber diesem Verkehrsmittel. Dabei war in den Jahren 2016 bis 2018 zwar ein Trend zu einer klimabewussteren Einstellung geschaffen worden, was sich jedoch nicht im Verhalten niederschlug und so der Anteil der Flugreisen der deutschen Touristen weiter zunahm ([FUR 2020]). Dieser Unterschied zwischen Klimabewusstheit und einem dem entgegenstehen Flugverhalten konnte auch international gezeigt werden: "Climate awareness does not lead to people not flying" ([BOWS-LARKIN ET AL. 2016], S. 4). Und das zeigt sich auch in den Daten: insgesamt ist das Flugzeug das Verkehrsmittel, das einen Großteil der Emissionen ausmacht, wenn Inländer ins Ausland reisen (Abb. 24). Dass sich noch kein großer Verhaltenswandel trotz des Bewusstseins der Klimaschädlichkeit messen ließ, liegt sicherlich zunächst an den Pull-Faktoren des Fliegens: Sinkende Preise und das Erstarken von Billig-Airlines, einfache Buchungen, globalisiert weltweit verteilte Familien- und Freundeskreise und das gesellschaftliche Veralltäglichen von Flugreisen ([BOWS-LARKIN ET AL. 2016]) können zum häufigeren Fliegen beitragen. Der stetige Trend zu mehr Flugreisen ist dabei eng an die wirtschaftliche Entwicklung gekoppelt. Grob gesagt gilt: wenn es einem Land wirtschaftlich besser geht, so nimmt auch die Nachfrage nach Flügen zu ([BOWS-LARKIN ET AL. 2016] nach INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION, 2014).

3.3.1 CO₂ und weitere Treibhausgase

In über 60 Jahren wird das aktuell emittierte CO₂ im Mittel noch in der Atmosphäre vorhanden sein ([DLR 2007]) und der Flugverkehr hat einen großen Anteil daran: zwischen 1,9 und 2,6 Prozent aller anthropogenen CO₂-Emissionen waren im Jahr 2002 aus dem globalen Flugverkehr ([DLR 2007]).

Komplex wird es bei der Berechnung von Flugreisen aufgrund eines nicht-linearen Zusammenhangs zwischen den geflogenen Kilometern und dem verbrannten Treibstoff, also folglich auch dem emittierten CO₂ ([JARDINE 2009]). Dabei entsteht allein durch den Start des Flugzeugs ein erhöhter Energiebedarf, bei ca. 5000 km Flugstrecke besteht die höchste Effizienz, während ab dann durch den Transport der großen Treibstoffmengen selbst auch wieder mehr Treibstoff verbrannt wird ([JARDINE 2009]).

Die Emissionen eines Flugzeuges sind eng an deren Treibstoffverbrauch gekoppelt, sodass ein bereits bestehendes System des Kostenindex zur Optimierung von Flugkosten auch zur Optimierung der Flugstrecken zur Emissionsminderung zum Einsatz kommen kann ([EDWARDS ET AL. 2016]). Dabei dient (parallel zu den Verbrennungsemissionen bei PKW) ein linearer Umrechnungsfaktor zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes A_{CO_2} in Kilogramm pro Kilogramm verbrauchtes Kerosin $m_{Kerosin}$, mit

$$A_{CO_2} = m_{Kerosin} \cdot c$$

$$c = 3,157 \frac{kg(CO_2)}{kg(Kerosin)} \text{ als Standard und}$$

$c = 0,35 \frac{kg(CO_2)}{kg(Kerosin)}$ für Biokraftstoffe ([EDWARDS ET AL. 2016] nach [JARDINE 2009]). Parallel zu den Emissionen von PKW kann auch beim Flugzeug die Wirkung anderer Treibhausgase, welche ausgestoßen werden, in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden. Zudem gibt es verschiedene Berechnungen und auch die Unterschiede zwischen Ländern, welche zu verschiedenen Ergebnissen für diesen Faktor führten:

Die britische Regierung gab für Berechnungen folgende Werte an:

$c = 3,128 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg}(\text{Kerosin})}$ und $c = 3,219 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2, \text{equ.})}{\text{kg}(\text{Kerosin})}$ für „Aviation spirit“;
 $c = 3,150 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg}(\text{Kerosin})}$ und $c = 3,181 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2, \text{equ.})}{\text{kg}(\text{Kerosin})}$ für „Aviation turbine fuel“
 ([UK GOVERNMENT 2020]).

Insgesamt schwanken diese Daten jedoch wenig, da anhand des Kohlenstoffgehalts des Treibstoffs die zu erwartenden CO₂-Emissionen relativ genau und ohne große Annahmen bestimmbar sind. Bei all dem muss aber auch beachtet werden, dass durch die unterschiedlichen Höhen, in denen sich das Flugzeug befindet eine gleiche Menge von Treibhausgasen andere Wirkungen erzeugen können. So bedeutet die Emission von N₂O in über 9 km Flughöhe einen die Ozonbildung verstärkenden Effekt, welcher zur Erwärmung beiträgt, während diese Stickoxide aber auch den Abbau von Methan verstärken können, sodass diese Emission sich auch kühlend auswirken kann ([DLR 2007]). Die alleinige Wirkung der Treibhausgase ist also eine Funktion von mindestens verbrauchtem Treibstoff und Höhe der Emission.

3.3.2 Andere Effekte

Das Hauptziel von Klimaabkommen wie dem Pariser Abkommen war vor allem die Reduktion der Emission von CO₂ oder anderer Gase, deren Wirkung direkt in CO₂-Äquivalente umgerechnet wird, wobei gerade bei der Betrachtung von Flugzeugen ein großer Anteil derer Klimawirkung nicht berücksichtigt wird ([GÖSSLING, HUMPE 2020]). Die Auswirkungen auf den Strahlungsantrieb durch Gase niedriger Verweildauer in der Atmosphäre oder beispielsweise durch Bildung von Kondensstreifen sind komplex, aber nicht vernachlässigbar. [GÖSSLING, HUMPE 2020] beschreiben nach LEE ET AL (2020), dass Flugzeugemissionen das dreifache an klimaerwärmender Wirkung haben, welche durch CO₂ allein verursacht würde.

Wasser, Wolken, Kondensstreifen Das bekannte Bild von Kondensstreifen nach Flugzeugen am Himmel entsteht dadurch, dass auch Wasserdampf aus den Turbinen in die Luft gelangt. Dieser wird in hohe Schichten mit einem natürlich niedrigerem Wassergehalt eingetragen und kann dort Treibhausgaswirkung entfalten ([UMWELTBUNDESAMT 2019]). Wasserdampf kann zusammen mit Partikeln wie Ruß wochenlang noch in der Atmosphäre verweilen und nimmt auch Einfluss auf die Bewölkung ([DLR 2007]). Die entstehenden Wolken wie Zirren können verschiedene teils erwärmende und teils abkühlende Effekte mit sich bringen, wobei insgesamt die Erwärmung aber den größeren Anteil ausmacht ([DLR 2007]). Besonders bedeutsam wird dieser Effekt aber erst in einer Höhe von ca. über 9 km, welche bei Kurzstreckenflügen selten erreicht wird ([KNÖRR, HÜTTERMANN 2016]). Dies liegt daran, dass sich Wolken erst ab einer bestimmten Konstellation von Kälte und Luftfeuchtigkeit bilden können, was über dem Äquator erst oberhalb von 12 Kilometern der Fall ist, während es in Polarregionen schon etwa 5 Kilometer Höhe sein kann ([ATMOSFAIR 2016]). Nebst dem Breitengrad hat aber auch die Jahreszeit und sogar das aktuelle Wettergeschehen einen Einfluss darauf, inwiefern Wasser und Ruß eine große Rolle spielen. Zudem konnte durch Messungen mit Testflugzeugen auch festgestellt werden, dass die Zusammensetzung des Treibstoffs eine Auswirkung auf die Bildung von Kondensstreifen hat ([VOIGT ET AL. 2021]). Eine Rolle scheinen dabei die Aromaten zu spielen, deren Gehalt gerade bei synthetischen oder den sogenannten Biotreibstoffen verringert werden kann ([VOIGT ET AL. 2021]). Die Bildung von Kondensstreifen kann also insgesamt durch die Airlines selbst stark beeinflusst werden.

Strahlungsantrieb für die Gesamtwirkungen Insgesamt lösen Flugzeugemissionen eine Vielzahl von chemischen Reaktionen und physikalischen Wirkungsweisen aus, welche zur Erwärmung und Abkühlung beitragen können, sodass allein aufgrund der hohen Komplexität die Gesamtwirkung nur schwer bestimmt werden kann ([JARDINE 2009]). Das Zusammenwirken von erwärmenden und abkühlenden Eigenschaften der Flüge wird über den Strahlungsantrieb in einen möglichst alle Faktoren umfassenden Wert zusammengefasst (vgl. Abb. 25). [SANGUINETTI ET AL 2011] verwenden den nach eigener Aussage konservativ gewählten, also eher geringere Auswirkungen der Emissionen annehmenden Wert von $c=1,5$ an um Gase außer CO_2 und Höheneffekte einzurechnen.

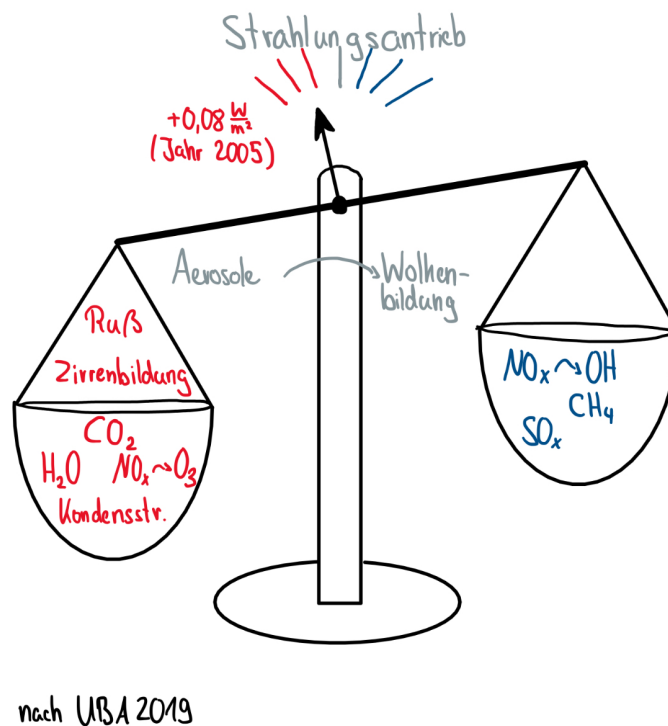


Abb. 25: Einflussgrößen des Flugzeugverkehrs auf den Strahlungshaushalt, eigene Darstellung, vgl. [UMWELTBUNDESAMT 2019]

[AAMAAS ET AL. 2013] schlagen einen Wert von 1,8 bis 2,6 für diesen Faktor für nicht- CO_2 -Wirkungen vor und beziehen sich dabei auch auf den von LEE ET AL. (2010) genannten Bereich von 1,9 bis 4,8, wobei die Unsicherheit sich vor allem auf die Bildung von Cirrus-Wolken und Kondensstreifen bezieht, deren Wirkungsweise noch umstritten und vor allem selbst bei identischen Flugzeugmodellen von vielen Faktoren wie Temperatur, Windverhältnissen und Flughöhe abhängen kann. Mit den Werten in Tabelle 16 wird argumentiert, dass durch verschiedene weitere Emissionen insgesamt ein mehr als doppelt so hoher Effekt als vom CO_2 alleine zu erwarten ist, wobei durch die zusätzliche Wirkung der Zirruswolken schlussendlich Werte von 3 bis 5 für den Strahlungsantriebsfaktor genannt werden ([UMWELTBUNDESAMT 2012]). Insgesamt besteht aber weiterhin ein Diskurs ohne klare und eindeutige Lösung, wie groß dieser Faktor nun ausfallen soll. Um genauer zu sein kann statt einem Mittelwert der verschiedenen Publikationen auch für verschiedene Flughöhen und Strecken ein je angepasster Faktor verwendet werden. Dies wird bei der Betrachtung von CO_2 -Rechnern für Flüge später genauer besprochen.

	Strahlungsantrieb in $\frac{mW}{m^2}$ im Jahr 2005
CO ₂	25,3
Ozon	21,9
H ₂ O-Dampf	2,0
Kondenstreifen	10

Tab. 16: Strahlungsantrieb der durch den weltweiten Flugverkehr emittierten, ausgewählten Gase, Daten: [UMWELTBUNDESAMT 2012] nach LEE ET AL. 2009

3.3.3 Gesamteinfluss

Um die Auswirkungen einfach und vergleichbar darzustellen, nutzen [SANGUINETTI ET AL 2011] eine vereinfachte Funktion zur Berechnung CO₂-äquivalenter Emissionen. Diese entspricht in Grundzügen zusammengefasst:

$$(CO_2)_{aequ.} = V_{Treibstoff} \cdot c_{Strahlungsantrieb} \cdot \frac{c_{Treibstoff} \cdot d}{N_{Personen}}$$

mit

$V_{Treibstoffverbrauch}$: Stark vom Flugzeug, der Strecke und dem Flugverhalten abhängiger Verbrauchsfaktor in kg verbranntem Treibstoff pro geflogenem Kilometer (Durchschnitt über den Gesamtflug)

$c_{Treibstoff}$: Konstante, welche die pro kg verbrannten Treibstoff zu erwartende kg Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten angibt (vgl. 3.3.1)

$c_{Strahlungsantrieb}$: Konstante die sowohl die verstärkenden Faktoren durch die Freisetzung der Gase in höheren Atmosphärenbereichen, als auch alle nicht-CO₂-Emissionen berücksichtigt (vgl. 3.3.2)

d: geflogene Strecke in Kilometern (über tatsächliche Flugstrecke oder Großkreise)

$N_{Personen}$: Anzahl der Passagiere in einem Flugzeug (kontrovers betrachtbar, vgl.: 3.1.4)

Mit dieser Gleichung können also relativ einfach, aber dennoch auf ein Flugzeug abgestimmt die Treibhausgasemissionen bestimmt werden. Die Rechnung ist weiter vereinfachbar, indem typische Durchschnittswerte für $c_{Treibstoffverbrauch}$ und $N_{Personen}$ eingesetzt werden. Dann verbleibt noch die Strecke d, welche aber auch über Durchschnittsgeschwindigkeiten in Flugstunden umgerechnet werden könnte. Bei all diesen Vereinfachungen darf jedoch nicht vergessen, wie unterschiedlich der Treibstoffverbrauch für die verschiedenen Flugphasen ist. Dem könnte mit drei verschiedenen Werten für $c_{Treibstoffverbrauch}$ für Kurz-, Mittel- und Langstreckenflüge entgegengesteuert werden, da die energieintensive Take-Off-Phase bei kurzen Flügen mehr ins Gewicht fällt.

Die Regierung Großbritanniens gibt (in Bezug auf Arbeitsreisen) Gesamtwerte aus, die mit der Personenkilometerzahl multipliziert werden sollen und die in vier Kategorien unterteilt sind (Ausgangspunkt je Vereinigtes Königreich, Economy-Klasse):

$$A_{CO_{2equ.}} = d_{Strecke} \cdot c_i, \quad \text{mit } c_i \text{ aus [UK GOVERNMENT 2020]:}$$

$$c_1 = 0,244 \frac{kg(CO_2)}{Pkm} \text{ (Inland GBR)} \quad c_2 = 0,153 \frac{kg(CO_{2equ.})}{Pkm} \text{ (GBR - EU)}$$

$$c_3 = 0,146 \frac{kg(CO_{2equ.})}{Pkm} \text{ (GBR - Nicht-EU)} \quad c_4 = 0,139 \frac{kg(CO_{2equ.})}{Pkm} \text{ (International)}$$

Bei all diesen Angaben muss eine Annahme mit einfließen, welchen Anteil der Treibhausgasemissionen man dem Gütertransport zurechnet, für welchen Flugzeugfrachträume auch

beim Personentransport mitgenutzt werden können. Die Aufteilung kann entweder nach ökonomischen Kriterien erfolgen, wenn der Personentransport beispielsweise der rentablere Grund für den Flug ist, aber auch nach Gewicht, was dem Gütertransport einen deutlich höheren Anteil zurechnen ließe ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]).

[UK GOVERNMENT 2020] verwendet dabei eine Aufteilung, welche das Gewicht von Sitzen und anderer Ausrüstung speziell für den Personentransport mit einberechnet und dann nach Gewicht die Emissionen zwischen Fracht und Passagieren aufteilt, was jedoch nur auf Langstreckenflügen bedeutsam wurde. Es gibt auch Daten, die sich direkt auf die geflogenen Kilometer pro mitreisende Person beziehen (nach TREMOD-Modell für Deutschland):

Innerdeutscher Flugverkehr:

$$k = 0,218 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2\text{-Aequ.})}{\text{Personenkilometer}} \quad ([\text{ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1}])$$

Internationaler Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung:

$$k = 0,194 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2\text{-Aequ.})}{\text{Personenkilometer}} \quad ([\text{ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1}])$$

Diese Werte bilden aber, genau wie die vorhergehenden Werte nur den Durchschnitt der Flüge ab. Da für viele Personen das Flugzeug jedoch kein alltägliches Verkehrsmittel ist, oft also nur ein bis zwei Flugreisen jährlich in deren Budget mit einfließen, lohnt es sich hierbei auch noch genauere Berechnungsmethoden anzuschauen. Dies geschieht in Abschnitt 3.3.5 bei der Betrachtung verschiedener CO₂-Rechner.

3.3.4 Technologische Lösungen

Die größten Potentiale bei der Verringerung der Klimaschädlichkeiten von Flügen bestehen nach [GIROD ET AL 2012] darin (1) deren Effizienz zu steigern (z.B. durch geringeren Luftwiderstand, effizientere Motoren etc.), (2) Alternativen zum aktuellen Treibstoff zu finden (z.B. durch Biotreibstoffe, Verwendung von Wasserstoff oder potentiell in der Zukunft von Elektrizität) oder (3) mit der größten Wirkung Flüge zu ersetzen, so lange keine CO₂-neutralen Flugoptionen verfügbar sind.

(1) Beim Wechsel zu effizienteren Modellen muss berücksichtigt werden, dass Flugzeuge nur langsam ersetzt werden und deren Weiterentwicklung ein lang andauernder und teurer Prozess ist. [GIROD ET AL 2012] fanden eine Verweildauer eines Flugzeugmodells von mindestens 40 Jahren aufgrund der hohen Lebensdauer und der sich nur langsam wandelnden Produktion. Auf einen schnellen Wechsel zu Flugzeugen mit geringerem Treibstoffverbrauch allein kann man also nicht setzen. [BOWS-LARKIN ET AL. 2016] gehen so weit zu sagen, dass die Industrie akut kaum mehr nennenswerte Verbesserungen liefern kann, während [JARDINE 2009] weiterhin auf die Bestärkung von effizienterer Technologien auch durch ein gerichtetes Konsumverhalten setzt. Die Effizienz kann auch durch die Planung von beispielsweise Flugroute und Geschwindigkeit gesteigert werden. Bei besonders langen Strecken über 5500km kann sogar ein Zwischenstopp zum Tanken von Vorteil sein, um nicht die ganze Kerosinmasse zu transportieren ([UMWELTBUNDESAMT 2019]). Auf all das hat eine Person bei einer individuellen und einzelnen Mobilitätsentscheidung kaum einen Einfluss.

(2) Im Bereich der Biotreibstoffe kann eine deutliche Verringerung der Emissionen erwirkt werden (vgl. 3.3.1) und dies wird oft als Hoffnungsträger genannt

([BOWS-LARKIN ET AL. 2016]). Das Umweltbundesamt sieht dies dennoch kritisch, wenn diese nicht aus Abfall erzeugt werden, sondern Rohstoffe und Flächen dafür wenig nachhaltig und im Interessenkonflikt beispielsweise mit der Nahrungsmittelproduktion verwendet werden

([UMWELTBUNDESAMT 2019]). Bei den alternativen Treibstoffen ist jedoch die Elektrifizierung aktuell noch nicht umsetzbar und der Einsatz von Wasserstoff vermutlich noch längere Zeit zu teuer ([GIROD ET AL 2012]). So gehen Berechnungen davon aus, dass der Treibstoffverbrauch mit H₂ doppelte Kosten im Vergleich zu Kerosin verursachen würde und zudem hohe Kosten für den Technologieumstieg entstehen würden, während sogenannte E-Fuels die aus erneuerbar erzeugtem Strom hergestellt werden die Spritkosten mehr als verachtfachen würden ([JUNG, SCHULTZ 2021]).

(3) Am meisten von Einzelpersonen beeinflussbar ist die Entscheidung, in welchen Fällen das Flugzeug als Verkehrsmittel überhaupt benötigt wird. Problematisch ist gerade bei Kurzstreckenflügen, dass insbesondere der energieintensive Start einen hohen Anteil ausmacht, sodass bei diesen Flügen ein hoher CO₂-Ausstoß pro Kilometer besteht ([ATMOSFAIR 2011]). Gerade in diesem Fall sollten Personen gut informiert sein, welche Alternativen existieren und welchen Einfluss die Wahl des Verkehrsmittel auch bei kürzeren Strecken hat.

Insgesamt bestehen noch keine große Hoffnungsträger für klimaneutrale Flugreisen, schlussendlich verbleibt also vor allem die Reduktion oder sogar der Verzicht auf Flugreisen um die Grenzen des eigenen Verkehrsbudgets nicht zu überschreiten.

3.3.5 CO₂-Rechner

Orientierung, inwiefern Flüge mit dem eigenen Emissionsbudget vereinbar sind, stehen in Form von CO₂-Online-Rechnern zur Verfügung. Dabei wurde jedoch von [BIRNIK 2013] geringe Transparenz, häufige Unterschätzung der CO₂-Fußabdrücke und Ferne der Modelle vom aktuellen Forschungsstand festgestellt. Der Autor fordert eine detaillierte und den Strahlungsantrieb berücksichtigende Berechnung bei Flugemissionen und argumentiert dabei auch mit der hohen Bedeutsamkeit und hohen Individualität der Emissionen durch den Personentransport, da dieser zu einer der größten Emissionskategorien gehört ([BIRNIK 2013] nach DEY ET AL. 2007; HERTWICH, PETERS 2009 u.a.) und aufgrund von Faktoren wie dem Einkommen zwischen Personen stark variiert ([BIRNIK 2013] nach JONES, KAMMEN 2011; KERKHOF ET AL. 2009 u.a.). Gerade bei Flügen ist also eine detaillierte Aufschlüsselung der Emissionen gefordert. Umstritten ist dabei vor allem wie genau der Eingriff des Fliegens auf den Strahlungsantrieb in Rechnungen mit einbezogen werden sollte ([BIRNIK 2013]).

[SANGUINETTI ET AL 2011]) halten Flugsuchmaschinen, bei denen die CO₂-Menge angegeben wird, für sehr nützlich und stellten fest, dass die Bereitstellung von diesen Daten die Entscheidungen von KundInnen beeinflussen konnte, auch teurere Optionen zu wählen, wenn dabei CO₂ eingespart werden kann. Dabei war deren Stichprobe an befragten Personen in simulierten Entscheidungssituationen sogar bereit einen CO₂-Preis von über \$190 (ca. 160 Euro) pro eingesparte Tonne CO₂ zu zahlen ([SANGUINETTI ET AL 2011]). Zum Vergleich: im Oktober 2020 wurde eine CO₂-Bepreisung vom deutschen Bundestag auf 25 Euro ab dem Jahr 2021 erhöht mit einem angestrebten Preis von ca. 55-65 Euro im Jahre 2026 für ein Zertifikat zur Freisetzung von einer Tonne CO₂ ([DEUTSCHER BUNDESTAG 2020]). Da diese Rechner also durchaus auch einen Einfluss auf Flugentscheidungen hatten, werden verschiedene im Folgenden verglichen:

Um die verschiedenen Rechner zu vergleichen wurden drei Strecken ausgewählt und für eine Person (Economy) berechnet. Die Streckendaten wurden durch den Vergleich der Angebote

verschiedener Airlines abgeschätzt.

Die **Kurzstrecke** innerhalb Deutschlands mit ca. 400 km einfacher Strecke (Hin- und Rückflug, Frankfurt Main FRA - Berlin BER, ca. 1h 10min), bei welcher der neue Flughafen BER die Aktualität der Daten überprüfen lässt.

Als innereuropäische Flugstrecke eine **Mittelstrecke** mit einer Flugzeit von ca. 2 Stunden und 55 Minuten (Hin- und Rückflug, Stuttgart STR - Samos SMI (Griechenland), je Strecke ca. 1 800 km), welche regelmäßig befliegen wird, aber nicht zu den Hauptverkehrsachsen Europas zählt, so dass die Genauigkeit der Datengrundlage auch für weniger typische Strecken überprüft werden kann.

Die **Langstrecke** ist über den Atlantik von Zürich nach New York (ZRH nach JFK, Hin- und Rückflug, ca. 9h 10 min hin, ca. 7h 35 min zurück, ca. 6 300km je Strecke), bei welcher die deutlichen Unterschiede zwischen Hin- und Rückweg aufgrund der Westwindzone noch die Rechner auf die Probe stellen können.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Eingabedaten und Details zu den verschiedenen Rechnern folgen hier.

ICAO: In diesem Rechner werden veraltete Flugdaten verwendet, was daran erkennbar ist, dass der BER noch keine auswählbare Option ist, dafür sind aber auch kleinere Flughäfen (SMI) bekannt.

Resurgence: Die Flugzeit muss hier selbst eingegeben werden (statt Flughäfen/Strecke), deswegen kann aber auch ein Unterschied zwischen dem Hin- und Rückflug über den Atlantik erkannt werden, wenn die Flugzeiten entsprechend unterschiedlich eingegeben werden.

Carbon Footprint: Dieser CO₂-Rechner basiert auf Daten der Regierung Großbritanniens (Stand 2020) und es sind nur maximal drei Flüge gleichzeitig einsehbar. Sowohl der neuere BER als auch der kleine Flughafen SMI sind dem Programm bekannt.

Atmosfair: Dieses Programm ermöglicht die selbstständige Eingabe des Flugzeugtyps, sodass teils der Vergleich von Airlines möglich ist (hier wurde der Durchschnitt gewählt für den Vergleich). Ein Faktor für den Strahlungsantrieb scheint im Rechner teils anders als in der älteren Methodenbeschreibung vorhanden zu sein.

UBA: Das Umweltbundesamt nutzt CO₂-Äquivalent als Einheit, bezieht aber erst ab 400 km Nicht-CO₂-Effekte in die Rechnung mit ein und ist nicht komplett transparent.

UK Government Tabelle: Hier ist eine eigene Berechnung auf Basis der zurückgelegten Kilometer und der Tabellenwerte (ähnlich wie bei 3.3.3) möglich und es wurde für die innerdeutsche Strecke der Wert für Reisen innerhalb der britischen Inseln gewählt, der GBR-EU-Faktor für die Mittelstrecke und der GBR-Nicht-EU-Wert für die Langstrecke.

RouteRANK: Das Werkzeug verwendet aktuelle Flugdaten, was hier jedoch auch ein Nachteil war, da aufgrund der Pandemie viele Verbindungen für das ganze Jahr 2021 nicht verfügbar und somit nicht berechenbar waren. RouteRANK gibt tatsächliche Flüge und deren Flugzeiten an, dies scheint aber nicht in der CO₂-Berechnung eine Rolle zu spielen, da diese dadurch nicht variiert. Wenn verfügbar werden aber Daten zur Besetzungszahl der Flüge verwendet. Emissionen umfassen Treibstoffe/Energieträger, deren Gewinnung und Verteilung, Aufbau und Erhalt der Infrastruktur und Erzeugung bis Entsorgung sowie Fahrzeuge ([ROUTE RANK 2021]).

Anbieter	CO ₂ - Faktor ¹	SAF ²	Non- CO ₂ ³	Treibstoff ⁴	Passagier- daten ⁵	Strecke ⁶	Kurzstr.	Mittelstr.	Langstr.	Altantik ⁷
ICAO	3,16	-	-	echt	Ja	korr.	0,118 t CO ₂	0,334 t CO ₂	0,668 t CO ₂	Nein
Resurgence	-	2,0 (Kurz- str.); 3,0 (Langstr.)	Ja	-	-	-	0,404 t CO ₂	1,009 t CO ₂	1,585 t CO ₂	(Ja)
Carbon Footprint	versch.	1,9	Ja	korr.	durchschn.	korr.	0,12 t CO ₂	0,52 t CO ₂	1,76 t CO ₂	Nein
Atmosfair	3,16	3	Ja	korr.	echt	korr.	0,221 t CO ₂	0,656 t CO ₂	2,882t CO ₂	Nein
UBA	versch.	3	ab 400 km	-	-	-	0,16 t CO _{2,equ.}	0,78 t CO _{2,equ.}	2,79t CO _{2,equ.}	Nein
UK Gov. Tabelle	versch.	versch.	Ja	-	-	-	0,194 t CO _{2,equ.}	0,551 t CO _{2,equ.}	1,840t CO _{2,equ.}	Nein
RouteRANK	-	-	-	-	-	-	0,212 t CO _{2,equ.}	-	2,53t CO _{2,equ.}	Nein
EcoPassenger	-	1,3-2,5	-	Nein	Nein	korrigiert	0,253 t CO _{2,equ.}	-	-	-

Tab. 17: Vergleich von Flug-CO₂-Rechnern, Quellen: [ICAO 2018] , [MITCHELL 2009] (Resurgence), [CARBON FOOTPRINT 2021], [ATMOSFAIR 2016],[UMWELTBUNDESAMT 2021, 1], [UK GOVERNMENT 2020], [ROUTERANK 2021], [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016]

¹:Umrechnungsfaktor von verbrannter Treibstoffmenge zu CO₂-Emissionen (beides in kg)

²: Strahlungsantriebsfaktor (Multiplikator der CO₂-Emissionen)

³: Einbezug von anderen Emissionen als CO₂

⁴: Verwendet echte oder korrigierte Treibstoffverbrauchsdaten

⁵: echte/durchschnittliche Passagierdaten

⁶: echte/ korrigierte Flugdistanz ⁷: Hin- und Rückflug über den Atlantik werden unterschiedlich berechnet (Westwindzone)

EcoPassenger: Nebst CO₂ sind auch Energieverbrauch, N₂O und weitere Emissionen angegeben und es kann ausgewählt werden, ob der Strahlungsantriebsfaktor verwendet werden soll (hier wurde er verwendet). Leider sind kleinere Flughäfen nicht bekannt und nur Etappen innerhalb Europas möglich. Es werden Emissionen der Gewinnung und des Transports des Kerosins mit eingerechnet ("Well-to-Tank", [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016]). Zudem wird je nach Distanzklasse ein unterschiedlicher Strahlungsantriebsfaktor verwendet.

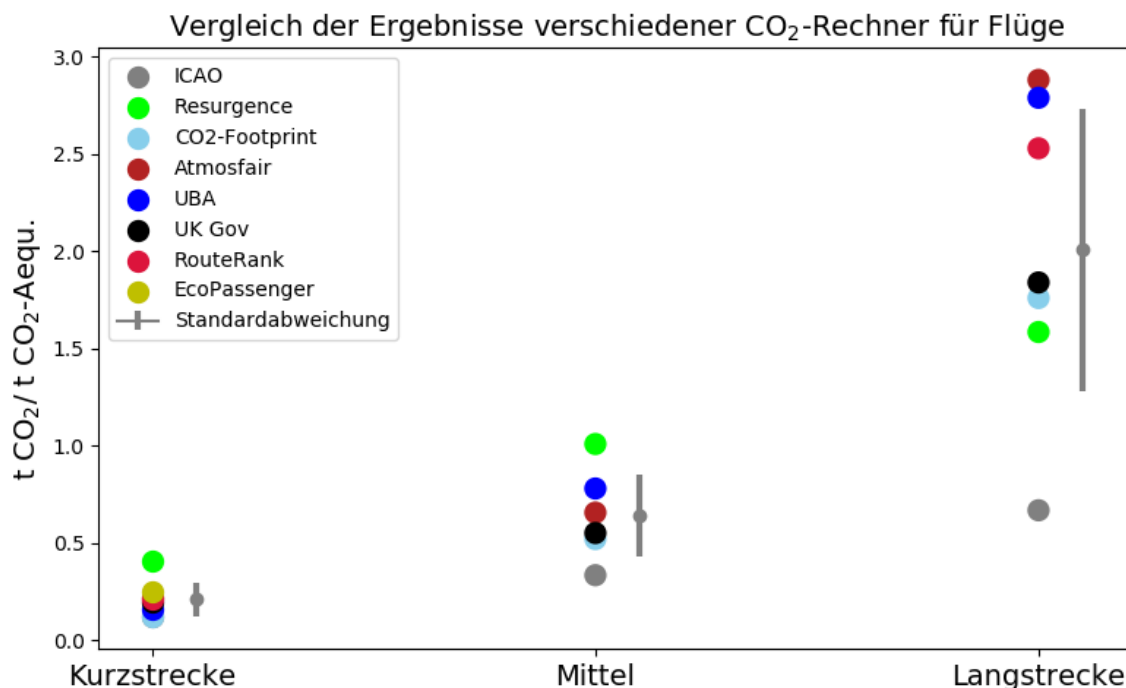


Abb. 26: Vergleich von CO₂-Rechnern für Flüge, eigene Darstellung

Betrachtet man die Ergebnisse fällt vor allem auf, dass es große Unterschiede zwischen den verschiedenen Rechnern gibt, welche zu einer Standardabweichung im Bereich von 30% bis 40% des Mittelwerts führen. Die großen Abweichungen des Resurgence-Rechners können eventuell damit erklärt werden, dass dies der einzige allein auf der Flugzeit basierende Rechner ist. Dass der Carbon-Footprint-Rechner immer im niedrigeren Bereich liegt eventuell daran, dass ein eher niedrigerer Strahlungsantriebsfaktor darin verwendet wird, während Atmosfair mit einem vergleichsweise hohen Faktor auch im oberen Bereich liegt. Insgesamt ist aber kein eindeutiger Trend im Vergleich der Rechner erkennbar.

3.3.6 Fazit: Flugzeuge

Da das Fliegen für viele Personen auf einzelne, wenige Strecken beschränkt bleibt, kann hier durchaus eine genaue und individuelle Auswertung für jede Strecke erfolgen. Die Auswirkungen auf das Klima werden bei Flugzeugen stark durch nicht-CO₂-Effekte geprägt. Deswegen sollten diese auch berücksichtigt werden, was am einfachsten durch einen Strahlungsantriebsfaktor umzusetzen ist, mit welchem die CO₂-Emissionen multipliziert werden. Die genaue Berechnung dieses Werts ist jedoch in der Wissenschaft noch in Diskussion und klärende Forschung wird weiter benötigt. Bisherige Modelle können aber aktuell schon verwendet werden und sollten

dies auch, um die Klimawirksamkeit des Fliegens nicht stark zu unterschätzen.

Bei vielen anderen Faktoren, wie der Effizienz eines bestimmten Flugzeugtyps oder der Flughöhe haben die Passagiere keinen direkten Einfluss und können zu einem großen Teil sich nicht im Vorhinein informieren. Manche Faktoren, wie zum Beispiel die Angabe, wie viel des Treibstoffs fossil gewonnen oder aus Biomaterial hergestellt war, bleiben auch nach dem Flug intransparent. Außer Kontrolle der Einzelperson sind meistens: Besetzungszahl, Flugstrecke und -höhe, Geschwindigkeit, Witterung, Treibstoff, Alter und Effizienz des Flugzeugs. Insgesamt muss auf Durchschnittswerte zurückgegriffen werden, da viele Faktoren für den einzelnen Flug nicht genau erhoben werden können ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]).

Beeinflussbar oder zumindest einschätzbar ist hingegen ob man einen Flug wählt oder nicht, bzw. nur Teile einer Etappe fliegt und die Wahl der Airline, welche entsprechend Unterschiede in der Flotte aufweisen kann.

Für die Entscheidung einer Einzelperson ist also das Rechnen mit Durchschnittswerten nicht nur oft die einzig umsetzbare Option (wer weiß schließlich noch, in welchem Flugzeugmodell man vor einem Jahr saß), sondern auch dahingegen in Ordnung, dass die Einzelperson vor allem mit der Entscheidung, ob sie einen Flug antritt oder nicht, die größte Macht über ihr Emissionsbudget hat.

Insgesamt bildet Atmosfair hier eine relativ gute Wahl für die Berechnungen, da die ergänzende Möglichkeit besteht genauere Daten z.B. zum Flugzeugtyp anzugeben, auf viel beflogenen Strecken auch echte Flugdaten zum Vergleich der verschiedenen Airlines existieren und die Ergebnisse auch detaillierter nach CO₂-Emissionen und weiteren Effekten aufgeschlüsselt werden.

Eigenes Berechnungsmodell Für den Fall, dass das Modell von Atmosfair mit den genauen Flugdaten nicht verfügbar ist, soll hier auch eine eher abschätzende Rechnung erfolgen, welche nach folgender Funktion geschehen kann:

$$Emiss. = (d + d_{korr}) * (EWF * c_{TTW} + c_{WTT}) * B$$

mit d : Strecke in Kilometern; d_{korr} : Streckenkorrekturfaktor; EWF: Emissionsgewichtungsfaktor; c_{WTT} : Well-to-Tank-Emissionsfaktor (Energiebereitstellung) in CO₂-Äqu. pro Personenkilometer; c_{TTW} : direkte Emissionen in CO₂-Äqu. pro Personenkilometer; B: Besetzungszahl (verteilt Emissionen der durchschnittlichen leeren Plätze auf Passagiere)

Verwendet werden die Emissionsfaktoren pro Kilometer für die Energievorkette nach [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] (je unterschieden in den nationalen (36,3 g CO₂-Äqu. pro Pkm) und internationalen (18,1 g CO₂-Äqu. pro Pkm) Flugverkehr) und für die direkten Emissionen pro Kilogramm Kerosin Daten die nach [GRAICHEN ET AL. 2010], welche mit den verschiedenen Verbrauchsdaten zwischen 120,5 g Kerosin pro „Sitzkilometer“ bei sehr kurzen Flugstrecken und 19 g Kerosin pro „Sitzkilometer“ bei Langstrecken von [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016] multipliziert werden. Diese großen Unterschiede im Verbrauch können damit erklärt werden, dass vor allem Start und Landung, welche bei kurzen Flügen einen großen Anteil der Flugzeit ausmachen, energieintensiv sind im Vergleich zum Flug in hohen Luftschichten mit verringertem Luftwiderstand, welche jedoch nur bei längeren Strecken erreicht werden. Letztere werden dann noch aufgrund der Effekte von Kondensstreifen etc. mit einem Gewichtungsfaktor zwischen je nach Distanzklasse 1,27 und 2,5 multipliziert, was in einem mittleren Bereich im Vergleich mit anderen Berechnungsmethoden liegt und berücksichtigt, dass nur bei Langstrecken besonders hohe Atmosphärenschichten erreicht werden und dort mehr zur Erwärmung beitragen (siehe [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016] nach ATMOSFAIR 2008; IPCC 1999).

Strecke	Kerosinverbrauch	Gewichtungsfaktor
<125 km	$120,5 \frac{g}{Pkm}$	1,27
<250 km	$75,7 \frac{g}{Pkm}$	1,27
<375 km	$60,1 \frac{g}{Pkm}$	1,27
<500 km	$42,7 \frac{g}{Pkm}$	1,27
<625 km	$38,4 \frac{g}{Pkm}$	1,47
<750 km	$36,0 \frac{g}{Pkm}$	1,6
<1000 km	$33,2 \frac{g}{Pkm}$	1,87
ab 1000 km	$19,0 \frac{g}{Pkm}$	2,5

Tab. 18: Datengrundlage Kerosinverbrauch und Gewichtungsfaktor, Quelle: [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016]

Zudem wird nach [ICAO 2018] noch je nach Fluglänge ein Streckenkorrekturfaktor hinzuaddiert, welcher eventuellen Anflugstau, Ausweichen vor Wetterlagen oder ähnliches berücksichtigt und auf die „Luftlinie“ auf einem Großkreis noch dazu gerechnet wird. Bei Kurzstrecken sind es zusätzliche 50 Kilometer, zwischen 550 km und 5500 km Flugstrecke werden 100km hinzuaddiert und darüber hinaus sind es 125 km ([ICAO 2018]). Dies liegt in einer ähnlichen Größenordnung, wie es auch anhand von Streckenumwegen in Deutschland gemessen wurde ([ATMOSFAIR 2016] nach AAI 2013). Als letztes muss noch die Besetzungszahl berücksichtigt werden, welche anhand der Daten von [ATMOSFAIR 2016] im Bereich von ca. 1,41 bei Kurzstrecken (unter 375 km), bei Mittelstrecken bei ca. 1,33 und oberhalb der Distanzgrenze von 750 km bei 1,25 liegt. Das bedeutet also, dass gerade bei kürzeren Strecken deutlich mehr Sitze leer bleiben und auf drei Passagiere noch ein leerer Sitz dazu kommt, dessen Emissionen auf die Personen aufteilt wird.

Strecke	Durchschnitt	Atmosfair	eigene Berechnung	ohne Besetzungszahl
Kurz	0,210 t CO ₂ -Äqu	0,221 t CO ₂ -Äqu.	0,248 t CO ₂ -Äqu	0,186 t CO ₂ -Äqu
Mittel	0,642 t CO ₂ -Äqu	0,656 t CO ₂ -Äqu	0,796 t CO ₂ -Äqu	0,637 t CO ₂ -Äqu
Lang	2,008 t CO ₂ -Äqu	2,882 t CO ₂ -Äqu	2,694 t CO ₂ -Äqu	2,155 t CO ₂ -Äqu

Tab. 19: Vergleich der eigenen Flugemissionsberechnungsmethode (je mit und ohne Besetzungszahl) mit Durchschnittswerten von Abschnitt 3.3.5, Datenbasis: [GRAICHEN ET AL. 2010], [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1], [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016], [ICAO 2018]

Die drei Vergleichsstrecken aus dem Vergleich der CO₂-Rechner (vgl. Abschnitt 3.3.5) wurden auch hier wieder verwendet und mit den Durchschnittswerten der CO₂-Rechner sowie aus Atmosfair verglichen (Tab. 19). Die eigenen Berechnungen liegen sehr nahe an den Atmosfair-Werten und sind somit eine gute Alternative, wenn die Berechnungen der Homepage von [ATMOSFAIR 2021] nicht zur Verfügung steht, welche mit tatsächlichen Daten zu Besetzungszahl oder Flugzeugtyp deutlich genauere Angaben machen können. Mit Nutzung der Besetzungszahl werden im Vergleich zu den Durchschnittswerten sehr hohe Werte mit der eigenen Berechnung erzeugt. Im Vergleich zu den Werten von Atmosfair ist dies jedoch nicht besonders auffällig und kann aufgrund der erhobenen Durchschnittsdaten zur Besetzung von Flugzeugen ein etwas realistischeres Bild erzeugen. Im folgenden wird also nur, wenn es im Einzelfall begründet wird, die Besetzungszahl nicht verwendet. Schließlich sorgt diese dafür, dass Emissionen seltener außerhalb der Personenbudgets nicht berücksichtigt werden, da ein Sitz leer blieb.

	Emissionen (pro Pkm)	Kategorie
mobitool		
Bahn DE (Strom&Diesel)	40,82g CO ₂ -Äqu.	4)
ICE DE (Strom & Diesel)	33,39g CO ₂ -Äqu.	4)
UK Government		
UK Gov. (Buisness travel - land)		
International rail (Eurostar)	4,97g CO ₂ -Äqu.	3)
Deutsche Bahn		
Diesel (EC/IC)	17,82g CO ₂ -Äqu.	1a)
Diesel (RE/RB/IRE)	17,82g CO ₂ -Äqu.	1a)
DB Nahverkehr	12,3g CO ₂ -Äqu.	1b)
DB Fernverkehr (Ökostrom)	(0,08 bis 0,11)g CO ₂ -Äqu.	1b)
[Schmied et al. 2013](2009)		
Nahverkehr	82,3 g CO ₂ -Äqu.	2)
Fernverkehr	50,1 g CO ₂ -Äqu.	2)
Nahverkehr	111 g CO ₂ -Äqu.	4)
Fernverkehr	71 g CO ₂ -Äqu.	4)
[Allekotte et al. 2020, 1]		
Nahverkehr	73,69 g CO ₂ -Äqu.	4)
Fernverkehr	46,32 g CO ₂ -Äqu.	4)

Tab. 20: Treibhausgasemissionen für Bahnverkehr in Deutschland, Daten: [MOBITOOL 2020], [UK GOVERNMENT 2020], eigene Berechnung mit Werten von [DB 2020], [SCHMIED ET AL. 2013] nach RICHTER 2010, [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] Kategorien: 1a) Nur TTW-Emissionen, 1b) nur WTT-Emissionen, 2) WTW-Emissionen, 3) WTW und Fahrzeugherstellung und -wartung, 4) WTW, Fahrzeug und Infrastrukturemissionen

3.4 Bahnverkehr

Züge können einen elektrischen Antrieb haben, aber auch einen Verbrennungsmotor besitzen. Bei letzterem fallen direkt Emissionen an, bei ersterem durch die Erzeugung des Stroms. Im Schienennahverkehr war 2017 ca. 80% der Verkehrsleistung mit elektrischem Antrieb erfolgt, während es beim Fernverkehr über 89% war ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]). Insgesamt wird es hier für Einzelpersonen jedoch oft schwieriger abzuschätzen, welcher Anteil der zurückgelegten Fahrten mit welchem Antrieb erfolgt ist. Außerdem ist es auch schwierig diese Person dafür verantwortlich zu machen, an einer der nicht elektrifizierten Strecken der Bahnlinien zu wohnen, weshalb grundsätzlich Durchschnittswerte für ganz Deutschland eine gute Näherung sein können.

Verschiedene Quellen geben teils unterschiedliche Werte zur Berechnung der Emissionen pro Person und Kilometer an (siehe Tabelle 20). Die in der Tabelle gezeigten britischen Zahlen beziehen sich dabei nur auf die Eurostar-Verbindungen von London durch den Tunnel unter dem Ärmelkanal und weichen jedoch um den Faktor 10 von anderen Daten ab, welche das ganze Streckennetz einschließlich der mit Diesellok bedienten Abschnitt mit einberechnen. Insgesamt sind die Werte zwischen den drei Quellen auch deswegen sehr unterschiedlich, weil verschiedene Annahmen getroffen werden, welche direkten und indirekten Emissionen

mit einbezogen werden. Aber auch Annahmen bezüglich der durchschnittlichen Besetzungszahlen können einen großen Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Gerade für die Emissionen betreffend der Energiebereitstellung und eventuellen Verbrennungsmotoren sollten aktuelle Daten verwendet werden, da der elektrifizierte Anteil der Bahnstrecken sich verändern kann. In Bezug auf Bausubstanz und Treibhausgasemissionen beim Bau der Infrastruktur setzten [SCHMIED ET AL. 2013] Zeiträume von 60 Jahren an, für welche der Bau von beispielsweise Tunnel oder Bahnhöfe auf einen jährlichen Wert umgerechnet wird. Das heißt viele der 2008 gebauten Infrastrukturen, was das betrachtete Jahr der Studie war, werden auch auf die heute mit der Bahn zurückgelegten Strecken umgelegt. Die Fahrzeugherstellung kann ebenso auf die Lebensdauer des Fahrzeugs umgerechnet werden (ca. 35-40 Jahre nach [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]). Das bedeutet, dass diese Emissionen über Jahre ähnlich ausfallen können, wenn nicht ein plötzlicher Anstieg der Fahrzeuganschaffung oder im Bau mit berücksichtigt werden muss.

Dennoch sind die indirekten Emissionen (Infrastruktur, Fahrzeuge) von [SCHMIED ET AL. 2013] von 29 g CO₂-Äqu. pro Personenkilometer im Nahverkehr bzw. 21 g CO₂-Äqu. pro Pkm im Fernverkehr, welche vor allem in Bezug auf den Zeitraum 2008/2009 erhoben wurden, weit über den Werten von [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] mit 14,90/ 13,08 g CO₂-Äqu. pro Pkm, welche sich auch auf die Berechnung von [SCHMIED ET AL. 2013] selbst beziehen, aber in Bezug auf die Nutzung der Verkehrsmittel Daten von 2017 verwenden und somit auf gleichen Annahmen und ausführlichen Rechnungen basierend aktuellere Daten liefern ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]). Insgesamt werden also die Daten, welche in der letzten Tabellenzeile von Tabelle 20 stehen, da diese am aktuellsten sind und die wichtigsten Emissionsquellen umfassen.

3.5 Sonstiger ÖV

Straßenbahn, U- Bahn, städtischer Schienenverkehr Ganz parallel zum Schienenverkehr außerhalb der Städte können auch für den städtischen Schienenverkehr die Treibhausgasemissionen bestimmt werden, allerdings sind auch hier unterschiedliche Fahrzeugtypen und Antriebe in einer Kategorie zusammengefasst. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass allein aufgrund der unterschiedlichen Infrastrukturanforderungen große Unterschiede entstehen können. Beispielsweise ist bei der U-Bahn noch der Zusatzaufwand des Tunnelbaus nötig, während Straßenbahnen vor allem nur Schienen und Stromleitungen benötigen. Da es sich jedoch um nur 1,5% der Verkehrsleistung im Personenverkehr Deutschlands 2017 handelte ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]), bringt hier eine genauere Aufschlüsselung nur einen geringen Effekt mit sich. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass viele Städte Nahverkehrstickets anbieten, mit denen zwischen den Bahnen gewechselt werden kann und so die Emissionen innerhalb eines Betreibers gemittelt werden können. Ähnlich wie beim Anteil von Diesellockstrecken im Bahnverkehr ist die Einzelperson schlussendlich auch weniger dafür verantwortlich, ob eine Straßenbahn oder U-Bahn vor der eigenen Haustür hält, sondern mehr ob diese Person sich für diese Verkehrsmittel insgesamt entscheidet.

Manche AutorInnen gehen sogar so weit, im Überbegriff der Schienenfahrzeuge auch Fernverkehr und andere Bahnen zusammen zu fassen ([KNÖRR ET AL. 2010]). Da aber im vorhergehenden Abschnitt zur Bahn sich schon zeigte, dass dabei große Unterschiede herrschen, wird auch hier der regionale Schienenverkehr wenn möglich extra berechnet. Für den städtischen

Schienerverkehr reicht aber ein Faktor aus, welcher in Tabelle 21 zu finden ist.

Nahverkehr: Bus Busse mit Verbrennermotoren haben gegenüber PKW den Vorteil, dass mehr Personen pro verbrauchtem Treibstoff transportiert werden können. Zudem sinken die Treibhausgasemissionen für die Infrastruktur von 8,1 g auf 7,0 g CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer und werden in Bezug auf die Fahrzeugherstellung sogar halbiert (Stand 2008, [MOTTSCHALL, BERGMANN 2013]).

Auch hier existieren elektrische Antriebe und sogar Varianten, welche über Oberleitungen an das Stromnetz angeschlossen werden und mit Energie versorgt werden können. Diese Oberleitungsbusse zeigten sich in Simulationen als wirtschaftlich rentabler und klimafreundlicher, unter anderem auch da die elektrischen Motoren effizienter sind und allgemein durch die Elektrifizierung ohne Batterie auch gegenüber Verbrennungsmotoren Gewicht eingespart werden kann ([AYAZ ET AL. 2011]). Da sich jedoch wenig Beispiele oder gar Daten für Deutschland finden ließen, bleibt dies also eher zu vernachlässigen, kann aber eventuell als neue Mobilitätsoption zur klimafreundlicheren Gestaltung des Nahverkehrs durchaus im Repertoire der Nahverkehrsdienste aufgenommen werden.

Fernbus Dieses Verkehrsmittel hat einen starken Zuwachs erlebt. So lag sein Anteil an der Verkehrsleistung Deutschlands 2013 noch bei unter 2,5%, während es 2014 schon fast 5% erreichte ([SCHÄFER ET AL. 2018]). Der Fernbus ist zwar in einer Befragung im Jahr 2018 von Dreivierteln der damit Reisenden nur wegen dem Preis ausgewählt worden ([SCHÄFER ET AL. 2018] nach BRUNS ET AL. 2018), kann jedoch auch ein Mittel zur Verkleinerung der eigenen Verkehrsemissionen sein, wenn damit Verkehrsmittel mit höherer Klimaschädlichkeit wie das Auto ersetzt werden. Die Vorteile sind dabei sogar größer als bei den Linienbussen im Nahverkehr, da beispielsweise die Emissionen der Fahrzeugherstellung pro Personenkilometer nochmal weniger als halb so groß sind wie bei den Nahverkehrsbussen und auch im Bereich Infrastruktur ist ein deutlich kleinerer Wert zu verzeichnen ([MOTTSCHALL, BERGMANN 2013]).

Fazit ÖV Bei all diesen Verkehrsmitteln existieren wenige freie Daten für Deutschland, insbesondere was die Treibhausgasemissionen jenseits der direkten Auspuffabgase angeht. [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] und andere Publikationen mit TREMOD sind deshalb, weil sie an die aktuellen Daten der Mobilität in Deutschland regelmäßig angepasst werden und sehr umfassend was die Emissionen aus beispielsweise der Fahrzeugherstellung angeht sind, eine gute Möglichkeit mit einem einfachen Faktor für jedes Verkehrsmittel die Treibhausgasemissionen zu berechnen.

	g CO₂-Äquivalent pro Pers.& km
Straßenbahn, S-Bahn, U-Bahn	55
Linienbus (Nahverkehr)	80
Fernbus	29

Tab. 21: Emissionen beim ÖV in Deutschland 2019, Datenquelle:[UMWELTBUNDESAMT 2020, 1]

Diese Daten werden hier noch durch zwei Mischemissionsfaktoren (siehe Tabelle 22) ergänzt, welche einerseits das Nutzen aller öffentlichen Verkehrsmittel und im anderen Fall nur der

regionalen Verkehrsmittel im Durchschnitt darstellen sollen.

Für die allgemeine „Mischnutzung“ des ÖV werden die Emissionsfaktoren für den Bahnverkehr sowie die Daten aus Tabelle 21 verwendet. Um die durchschnittliche Mischung der Nutzung dieser Verkehrsmittel zu gewinnen, wird die Anzahl der täglichen Personenkilometer nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] verwendet, welche jedoch nur eine sehr grobe und gerundete Aufschlüsselung enthalten. Diese Betrachtung kann dann sinnvoll sein, wenn Personen durch Tickets in Verkehrsverbänden oder eine Bahncard-100 Zugang zu vielen öffentlichen Verkehrsmitteln haben und diese durch den Pauschalbetrag des Abonnements alle gleichmäßig unterstützen und nutzen können. Da jedoch viele Personen auch speziell nur den Nahverkehrsverbund nutzen und dort mit Monatsticket oder Verbundtickets die verschiedenen Verkehrsmittel nutzen wird nach dem gleichen Prinzip auch für die speziellen städtischen Bahnen wie Stadtbahn, S-Bahn oder U-Bahn sowie die Linienbusse im Nahverkehr ein gemischter Emissionsfaktor errechnet. Wenn Personen jedoch trotz Abonnement eines Verkehrsverbundes nur ein einziges der Verkehrsmittel nutzen, kann weiterhin auf den speziellen Emissionsfaktor ausgewichen werden.

	g CO₂-Äquivalent pro Pers.& km
ÖV Mischnutzung (Fern und Nah)	59,6
ÖV Mischnutzung (nur Nah ¹)	65,0

Tab. 22: Emissionen beim ÖV in Deutschland 2019, Datenquelle:[UMWELTBUNDESAMT 2020, 1]

¹: enthält Stadtbahn, Straßenbahn, U-Bahn, Nahlinienbusse (Verhältnis Bahnen zur Bus 3 zu 2)

3.6 Schifffahrt

Insgesamt ist die Schifffahrt in Deutschland eher weniger bedeutsam für den alltäglichen Personenverkehr (weniger als 0,5% der Personenkilometer im Jahr 2017, [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]), könnte aber bei Urlaubsreisen im Mittelmeerraum, welcher 2018 mit 7 der Top 10 Auslandsreiseziele der Deutschen vertreten war ([FUR 2019]) potentiell eine größere Rolle spielen.

In Tabelle 24 sind anhand von Daten der typischen Größe und Passagierzahlen aus dem Bereich der Nordsee und aus Skandinavien ermittelte Werte (aus [SCHULZ ET AL 2020], Umweltbundesamt), aus Großbritannien ([UK GOVERNMENT 2020]) und für ein Beispiel einer griechischen Schnellfähre ([PARAVANTIS ET AL. 2008]) die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten vermerkt. Bei [SCHULZ ET AL 2020] beziehen sich die Werte allerdings nur im Fall der Kreuzfahrtschiffe auch auf Hochseestrecken, bei welchen der Flächenaufwand durch die Nutzung von Kabinen und die große Anzahl von Personal zu hohen Emissionen führt. Das Personal selbst sollte keinen Anteil an den Emissionen tragen, da diese nur aus Dienstleistungszwecken dort mit reisen und somit ihren Anteil an den Treibhausgasemissionen auf die Passagiere übertragen. Die Werte aus Großbritannien im unteren der beiden Tabellenabschnitte umfassen sowohl die direkten, als auch die WTT-Treibhausgasemissionen, welche in zwei Tabellenblättern der Quelle aufgelistet und hier in den unteren beiden Werten zu einer Gesamtzahl addiert wurden. Bei dem Wert aus dem Mittelmeerraum handelt es sich um einen aus den in der Publikation genannten und weiteren ergänzenden Daten berechneten Minimalwert, welcher bei voller Besetzungszahl (250 Personen) des Schiffs entstehen würde

	Emissionen pro Person und Kilometer
[Schulz et al 2020]	
Kreuzfahrtschiff	0,43 kg CO ₂ -Äquivalent
Tagesausflugsschiff	0,22 kg CO ₂ -Äquivalent
Seefähre (Passagier)	0,14 kg CO ₂ -Äquivalent
Seefähre (Passagier + PKW)	0,28 kg CO ₂ -Äquivalent
UK (nur direkt)	
Passagier	0,0187 kg CO ₂ -Äquivalent
Passagier+PKW	0,1295 kg CO ₂ -Äquivalent
UK (WTT+direkt)	
Passagier	0,0223 kg CO ₂ -Äquivalent
Passagier+PKW	0,1546 kg CO ₂ -Äquivalent
[Paravantis et al. 2008]	
Schnellfähre	>0,151 kg CO ₂ -Äquivalent

Tab. 23: Treibhausgasemissionen typischer Schiffsfahrten, Daten: [SCHULZ ET AL 2020], [UK GOVERNMENT 2020], [PARAVANTIS ET AL. 2008]

	t CO₂ pro t Treibstoff
[PARAVANTIS ET AL. 2008]	3,179
[EC 2017](Schweröl)	3,206
[EC 2017](Leichtöl)	3,151
[EC 2002]	3,179

Tab. 24: Emissionsfaktoren für Schiffstreibstoffe, Daten: eigene Berechnung mit Daten von [PARAVANTIS ET AL. 2008], [EC 2017], [EC 2002]

([PARAVANTIS ET AL. 2008]). Insgesamt fallen die großen Unterschiede auf, welche bei verschiedenen Annahmen und verschiedenen Untersuchungsgebieten entstehen.

Die Grundannahmen, nämlich in Bezug auf die CO₂-Emissionen pro verbrauchtem Liter Treibstoff variieren dabei nur wenig (siehe Tabelle 24) Darum sind vermutlich die unterschiedlichen Verbrauchsdaten je nach genutztem Schiffstyp und die Annahmen zum Hafenaufenthalt, Streckenführung etc. der Grund für die großen Unterschiede. Gerade des Unterschied zwischen den Arten und Größen der Schiffe wird auch von [SIMS ET AL. 2014] (nach WALSH, BOWS 2012) als Grund dafür genannt, dass Wasserfahrzeuge eine größere Varianz der Emissionen aufweisen als andere Verkehrsmittel. Um dies zu verringern sind jedoch keine aufschlussreichen Daten verfügbar. Deswegen werden hier also die Daten von [SCHULZ ET AL 2020], welche sich auf TREMOD stützen, vorgeschlagen, da diese explizit auch die Energiebereitstellung und verschiedene Schiffstypen berücksichtigen.

3.7 Klimawirkung der nicht-motorisierten Mobilität und Pedelecs

Nebst dem Fahrrad, seinem motorisierten Äquivalent und der Mobilität zu Fuß stehen in dieser Kategorie auch nicht-motorisierte Rollstühle und andere Mobilitätsformen zur Verfügung. Auf 10 deutsche Personen kamen im Jahr 2017 9 Fahrräder, mit welchen täglich 112 Millio-

nen Personenkilometer zurückgelegt wurden. Rund 35% der Deutschen nutzten mindestens wöchentlich ein Fahrrad und tun dies zu 60% auch gerne ([NOBIS 2019]). Im Zeitraum von 2002 bis 2017 stieg die Verkehrsleistung in Personenkilometern für Fahrräder um 37% und der Anteil zu Fuß um 6%, während dies insgesamt über alle Verkehrsmittel um 18% zunahm ([NOBIS 2019]). Der Anteil der Nutzung eines Fahrrads für Beruf, Ausbildung und dienstliche Fahrten ist dabei gestiegen ([NOBIS 2019]). Herausfordernd beim langfristigen Umstieg auf dieses quasi CO₂-neutrale Verkehrsmittel ist, dass vor allem starke Steigungen auf den Wegen und die Witterungsverhältnisse vor allem im Herbst und Winter zu einer starken Abnahme der Fahrradnutzung führen, wobei die Jahreszeit den Anteil für die Freizeit am meisten betrifft ([NOBIS 2019]). Für dringend erforderliche Wege wie zur Arbeit scheint der Einfluss der Witterung geringer auszufallen, sodass die Möglichkeit besteht, dass im Sommer nur zusätzliche Strecken mit dem Fahrrad zur Erholung zurückgelegt werden, welche nicht im Winter zwangsläufig durch motorisierte Verkehrsmittel ersetzt werden müssen ([NOBIS 2019]). Nebst einer flachen Topographie ist die Zufriedenheit mit der Infrastruktur für Fahrräder auch ein Faktor, der zu einem höheren Anteil von Radfahrern führen kann ([NOBIS 2019]).

Die elektromotorisierte Variante des Fahrrads ist eine Möglichkeit den Radius der bequem erreichbaren Orte zu vergrößern (von 10,4km mit dem Fahrrad zu 16,6km mit Pedelec täglich für typische Nutzer zwischen 30 und 80 Jahren, [NOBIS 2019]). Dabei steigen die Emissionen jedoch an, wenn statt eines Fahrrads ein Pedelec verwendet wird. Während es ohne Motor ca. **9,2 g CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer** sind, so steigen aufgrund der benötigten Elektrizität, aber auch wegen der Herstellung von zusätzlich Motor und Batterie die Emissionen nach [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] auf **15,2 g CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer**. Das ist aber immer noch weniger als das Zehntel der Treibhausgasemissionen, wenn ein PKW mit Verbrennungsmotor verwendet wird ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]). Diese beiden Emissionswerte werden auch für weitere Berechnungen angenommen, da sie eine auf Deutschland bezogene und sehr umfassende Abschätzung sind.

Das zu Fuß gehen wird von [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2] als emissionsfrei angenommen, da ein leicht erhöhter Nahrungsmittelbedarf und eine Abnutzung von Kleidungsstücken sowohl schlecht zu messen, als auch von nur geringem Ausmaß ist. Die Infrastruktur für sowohl Fahrräder als auch das zu Fuß gehen ist schlecht erfasst und könnte aber auch durch die Umnutzung oder Mitnutzung bestehender Straßen oder sogar auf unbefestigten Wegen umgesetzt werden. Die hauptsächlichen Emissionen aus dieser Klasse erfolgen deswegen aus der Herstellung der Fahrräder. Wird ein Rollstuhl verwendet, kann dies ohne großen Fehler, wenn dieser von Hand voranbewegt wird, als emissionsfrei oder höchstens mit dem Fahrrad vergleichbar angenommen werden, da zur Herstellung des Rollstuhls schätzungsweise ähnlich viele Materialien wie für das Fahrrad verwendet werden. Dazu konnten jedoch leider keine passenden Daten gefunden werden. Ein eher neueres Verkehrsmittel sind Tretroller mit elektrischem Antrieb, welche in vielen Städten zum Verleih angeboten werden. Bei diesen konnten sehr kurze Lebensdauern zwischen 3 und 18 Monaten festgestellt werden ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] nach UBA 2019; BAUMANN 2019). Zusammen mit den hohen Emissionen die durch das regelmäßige Transportieren der Roller zum Aufladen oder zur Reparatur entstehen, können je nach Transportfahrzeug und der Lebensdauer Emissionen zwischen 70,5 und 399,5 g CO₂ pro Personenkilometer entstehen ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]). Für viele Abschätzungen kann der für mittlere Situationen angegebene Wert von 232,9 g CO₂ pro Personenkilometer verwendet werden ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]). Insgesamt sind Fahrräder oder Pedelecs die deutlich klimaf-

reundlichere Wahl im Vergleich zu den E-Tretrollern und können ebenfalls durch Verleihsysteme gut zugänglich gemacht werden.

3.8 Zusammenfassung und Vergleich der Verkehrsmittel

Bei verschiedenen Transportmitteln müssen unterschiedliche Emissionsquellen berücksichtigt werden, welche sich bei den bereits im Einzelnen ausführlicher betrachteten Optionen wie folgt zusammen setzen können:

	Infrastruktur	Herstellung ¹	Energieherst. ²	Verbrennung ³	Zusatz
Zu Fuß	-	-	-	-	-
Fahrrad	-	X	-	-	-
PKW, Bus	X	X	X	X	-
E-Auto	X	X	X	-	-
Flugzeug	-	-	X	X	X ⁴
Schiene	X	X	X	X	-

Tab. 25: Zur Emissionsberechnung zu beachtende Prozesse für verschiedene Verkehrsmittel

¹:Herstellung und Wartung des Verkehrsmittels

²:Gewinnung, Speicherung und Transport des Energieträgers (z.B. Raffinerien, Öltanker,...)

³: Verbrennungsemissionen des Energieträgers (z.B. Benzin, Gas,...) oder weiteres durch Fahrzeugbetrieb direkt verursachte Emissionen

⁴: Strahlungsantriebsfaktor sollte Kondensstreifenbildung etc. beinhalten

Dabei entstehen je Verkehrsmittel und Prozess Emissionen ganz unterschiedlicher Größenordnungen und Gewichtungen. Die Auswirkung der einzelnen Bereiche wird nun in folgender Tabelle aufgezeigt, bei welcher anhand einheitlicher Annahmen gut verglichen werden kann, welche jedoch nicht die in den einzelnen vorhergehenden Abschnitten resultierenden Ergebnisse repräsentiert (Tab. 27). PKW.

g CO ₂ -Äqu. pro Pers.& km	Infrastruktur	Herstellung	Energieherst.	Verbrennung
Luftverkehr (Internat.)	2	0	18	177
Luftverkehr (Nat.)	2	1	36	179
PKW	5	37	22	131
Bahn (Fernverkehr)	12	0	32	1
Bahn (Nahverkehr)	14	1	43	16
Bus (Fernverkehr)	0	2	4	25
Bus (Nahverkehr)	2	7	12	69
Pedelec	1	11	4	0
Fahrrad	1	8	0	0

Tab. 26: Zur Emissionsberechnung zu beachtende Faktoren in g CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer für verschiedene Verkehrsmittel (Werte kleiner 1 g wurden vernachlässigt), Deutschland 2017, Quelle: [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]

Dabei sind gerade bei Schienenfahrzeugen große Emissionen bei der Bereitstellung der Infrastruktur vermerkt, was mit dem vergleichsweise großen Aufwand des Baus von Brücke, Schienen, Tunneln und Bahnhöfen erklärt werden kann. Besonders fällt die Herstellung bei den PKW ins Gewicht, da sich oft nur wenige Personen über einen eher kürzeren Zeitraum dieses Fahrzeug teilen, was also gerade für Personen, die selten Auto fahren, Konzepte wie Carsharing sinnvoll erscheinen lässt, da dann die großen Herstellungsemissionen über mehr Personen und potentiell vor allem auch mehr Kilometer geteilt werden, als bei einem vor allem in der Garage stehenden Fahrzeug. Die besonders klimaunfreundlichen Verkehrsmittel PKW und Flugzeug sind beide auch in der Kategorie der direkten Emissionen (TTW) führend. Grob lässt sich also direkt durch das, was aus dem Auspuff bzw. den Turbinen kommt schon abschätzen, ob ein Fahrzeug sehr hohe Emissionen hat.

Dies alles kann um die Transportmittel auf einen Blick zu vergleichen zu einem Emissionsgewichtungsfaktor zusammengesetzt werden, der „die Strahlungswirkung einer Emission für die ersten 100 Jahre nach dem Zeitpunkt der Emission“ ([UMWELTBUNDESAMT 2019], S.33) angibt und mit welchem auch alle Effekte außer der CO₂-Emissionen mit einberechnet werden können. [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] berechnen dabei die spezifische Emissionen anhand der Nutzung des Fahrzeug, der Energiebereitstellung, der Herstellung des Fahrzeugs und der Bereitstellung der Infrastruktur. Die in Tabelle 27 vermerkten Faktoren sind durch deren Berechnung insgesamt entstanden.

g CO₂-Äquivalent pro Pers.& km	Stand 2017	Stand 2018	Stand 2019
Luftverkehr (Internat.)	198		-
Luftverkehr (Nat.)	218	214 ¹	214
PKW	194	140 ²	143
Bahn (Fernverkehr)	46	38	29
Bus (Nahverkehr)	89	75	80
Bus (Fernverkehr)	32	32	29
S-Bahn, U-Bahn	78	65	55

Tab. 27: Klimawirkung nach Verkehrsmitteln (durchschnittlich, in Bezug auf Deutschland 2017/ 2018/ 2019, alle in entsprechend aktuellem Modell „TREMOD“), Daten: [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1], [SCHÄFER ET AL. 2018],[UMWELTBUNDESAMT 2020, 1]

¹: mit Emissionsgewichtungsfaktor 2 (Strahlungsantrieb), ²: 1,5 Personen Auslastung

Hier gilt es zu berücksichtigen, dass von den AutorInnen nicht genügend transparent gemacht wurde, ob bei den Werten von 2018 die selben Annahmen gemacht wurden, da dort das Einberechnen von Emissionen der Infrastrukturbereitstellung nicht explizit erwähnt wurde. Dabei wird für die Flüge auch ein Faktor zur Berücksichtigung von Kondensstreifen und anderer weiterer Faktoren verwendet, wobei hier nur aus Deutschland startende Flüge beachtet werden. Insgesamt fällt als Trend auf, dass die meisten Verkehrsmittel mit der Zeit geringere Emissionen pro Person und Kilometer freigesetzt haben. Beim Luftverkehr sind die Zahlen eher stagniert, was mit der geringen technologischen Weiterentwicklungsfähigkeit erklärbar ist, wie schon im entsprechenden Abschnitt 3.3.4 gezeigt wurde. Bei den Schienenfahrzeugen kann vermutet werden, dass eine fortschreitende Elektrifizierung und ein höherer Anteil erneuerbarer Energien am Strom für den sinkenden Trend verantwortlich sind.

Andere Modelle nutzen statt der Treibhausgasmenge die Umrechnung in Temperaturänderungen (vgl. [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010]), welche in Tabelle 28 in Bezug auf die globalen Emissionen im Jahr 2000 und zur Vergleichbarkeit auch auf Personenkilometer umgerechnet dargestellt sind. Nach Tabelle 28 kann also die Auswirkung auf die weltweite Durchschnittstemperatur durch direkt verursachte Emissionen für jedes Verkehrsmittel pro im Jahr 2000 zurückgelegten Kilometer einer Person zurückverfolgt werden. Dies könnte die direkte Verantwortung für eine Temperaturveränderung in die Hand der mobilen Person legen und ein klares Temperaturbudget zur Erreichung von beispielsweise dem 1,5 Grad-Ziel als Vergleichspunkt geben.

	Temp.änderung pro Personenkilometer nach 50 Jahren
Luftverkehr	$4,89 \cdot 10^{-14} mK$
PKW	$6,69 \cdot 10^{-14} mK$
Zug	$2 \cdot 10^{-14} mK$
Bus	$2,1 \cdot 10^{-14} mK$

Tab. 28: Temperaturänderungen nach Verkehrsmitteln (globaler Durchschnitt, in Bezug auf 2000), Datengrundlage: [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010]

Grob überschlagen wären bei einer Erderwärmung von ca. 1°C im Jahr 2019 also noch 0,5 K Temperaturanstieg global im Rahmen des Pariser Klimaabkommens erlaubt ([BMU 2019, 1]). Dabei entsteht jedoch das Problem bei der Berechnung individuell innerhalb dieses Bereichs zulässiger Temperaturbeiträge, dass die Auswirkungen der Emissionen durch Transportmittel auf verschiedenen Zeitskalen sehr unterschiedlich sein können. So berechnen [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010] eine negative Temperaturänderung durch den Zugverkehr nach 5 Jahren aufgrund der Sulfataerosole (z.B. aus der Stromgewinnung) und deren abkühlenden Effekt auf das Klima, welche jedoch nach 50 Jahren von den lang wirkenden Treibhausgasen überholt werden und eine erwärmende Gesamtbilanz ergeben.

Vergleicht man dies mit den Daten zu den Treibhausgasemissionen mit GWP100-Umrechnung, also CO₂-Äquivalenten, welche die Klimawirkung auf die nächsten 100 Jahre beziehen, so fällt vor allem auf, dass bei den Werten von [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010] PKW die Flüge überholen (siehe Abbildung 27).

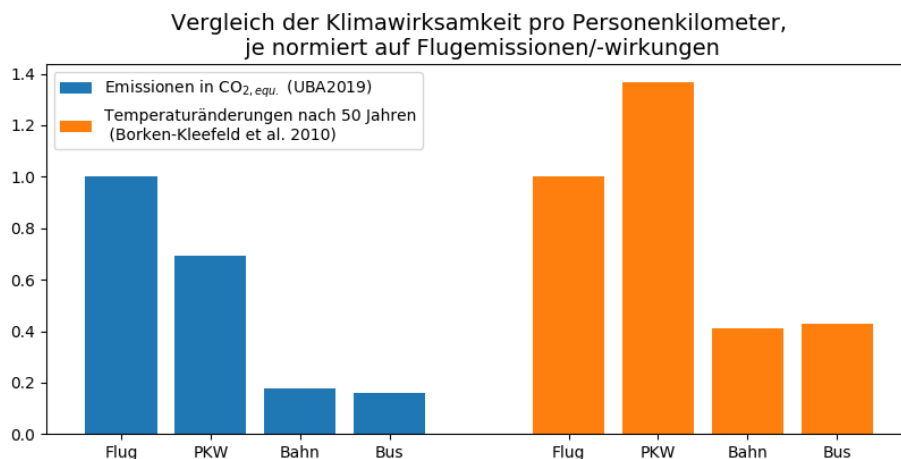


Abb. 27: Vergleich der Berechnungsmethoden der Klimawirksamkeit, eigene Darstellung, Datenquellen: [UMWELTBUNDESAMT 2019], [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010]

Insgesamt ist aber hieraus vor allem erkennbar, dass es sehr sinnvoll ist eine Standardmethodik zu nutzen, wie es sich mit GWP100 etabliert hat um die langfristige Wirkung der Treibhausgasemissionen zu vergleichen. Die Angabe als Temperaturänderung kann zwar etwas näher an der tatsächlichen Auswirkung des Handelns liegen, aber die Angaben in Kilogramm CO₂ kann auch greifbar sein, da die Vorstellung von einer große Gaswolke die frei wird auch gut vorstellbar und bildlich vergleichbar sein kann.

4 Emissionsprofile

In den folgenden Kapiteln zu den Emissionsprofilen und Indikatoren werden nun die Ergebnisse der Budgetberechnungen und die verschiedenen Emissionsfaktoren der Verkehrsmittel verwendet und angewandt. Das alles mündet in einem Gesamtfazit in Kapitel 6.

4.1 Alltagsmobilität in Deutschland

Die Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ schlüsselte verschiedene Personengruppen nach deren Mobilitätsverhalten auf :

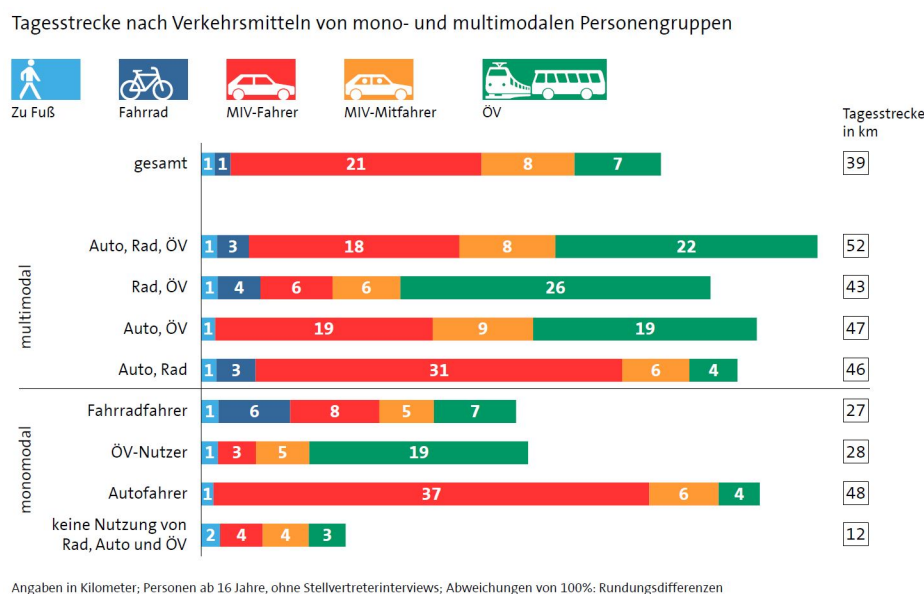


Abb. 28: Mobilitätsmodi Deutschland 2017, Quelle: [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]

Dabei wird die befragte Personengruppe anhand des typischen Mobilitätsverhalten nach den genutzten Verkehrsmitteln gruppiert. Auf Basis dieser Mobilitätsinformationen können nun die jährlichen durchschnittlichen Emissionen dieser verschiedenen Personengruppen berechnet werden (siehe Anhang 7.7). Dazu wurden hier zunächst die Emissionsfaktoren von [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] verwendet, da sich diese ebenfalls auf Deutschland beziehen und selbst auch auf den Daten von [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] basieren (vgl. Berechnungsgrundlage in [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]). Somit ist sichergestellt, dass ähnliche Annahmen getroffen wurden und auch anhand der selben Daten Mittelwerte bezüglich der Emissionen der verschiedenen Verkehrsmittel gebildet wurden. Vergleicht man die Ergebnisse (Abb. 29) mit dem B2DS-EU-Budget für 2021 von 1,366 t CO₂, so liegen nur ÖV-NutzerInnen und

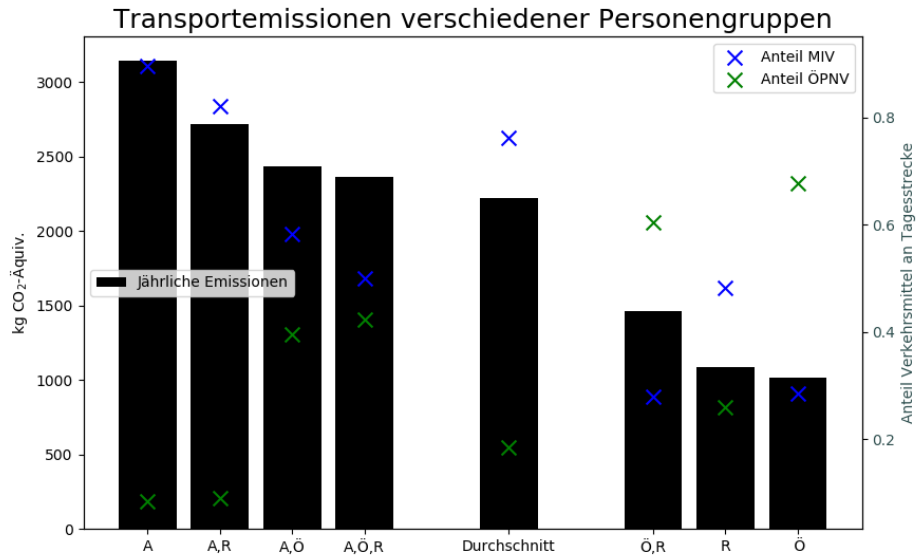


Abb. 29: Emissionsgruppen mit jährlichen Emissionen Deutschland 2017, eigene Darstellung, Datenquellen: [NOBIS, KUHNIMHOF 2019], [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]; Abkürzungen: A:Auto, R: Fahrrad, Ö: Öffentliche Verkehrsmittel

RadfahrerInnen mit ihren Alltagsemissionen unterhalb des Jahresbudgets für den gesamten Personenverkehr, wobei hier ja Reisemobilität noch nicht mit eingerechnet ist. Dabei ist auch klar erkennbar, dass vor allem der Anteil der Nutzung des motorisierten Individualverkehrs (blaue Markierungen in Abb. 29) und die täglich zurückgelegte Gesamtstrecke (vgl. Abb. 28) einen hohen Einfluss auf die jährliche Gesamtbilanz der Alltagsmobilität hat. Das lässt sich auch mit der Korrelationsanalyse zeigen (Tabelle 29), bei welcher untersucht wurde, inwiefern ein höherer Anteil der Nutzung eines Verkehrsmittels mit steigenden Gesamtemissionen einher geht.

Radfahren	MIV	ÖV	Gesamtstrecke
-0,81	0,96	-0,32	0,74

Tab. 29: Pearsons R für Zusammenhang zwischen Gesamtemissionen und Mobilitätsverhalten

Es lässt sich ableiten, dass bei einer groben Abschätzung der Klimaschädlichkeit des Alltagsmobilitätsverhalten einer Personengruppe der Fokus vor allem auf den Transport mit PKW und anderem MIV gesetzt werden sollte, während viele mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecken hier mit einem geringeren Emissionsverhalten einher gingen, sodass die Gegenspieler PKW-Nutzung und Fahrradfahren durchaus als Indikatoren nützlich sein können. Das bestätigt auch die Auswertung von [SCHELEWSKY ET AL. 2020], welche die Einstellung zum Autofahren untersuchten und anhand der MiD 2017 Studie messen konnten, dass Personen die angaben gerne Auto zu fahren die dreifachen Verkehrsemissionen verursachten im Vergleich mit Personen, die dieser Aussage widersprachen. Beim ÖPNV zeigte sich ein leicht gegenläufiges Bild, während bei den nicht motorisierten Verkehrsmitteln kein Trend erkennbar war.

Die zurückgelegte Gesamtstrecke spielt dabei in den hier ausgewerteten Daten eine geringere Rolle als die Nutzung des motorisierten Individualverkehrs, sodass also nicht zwangsläufig weniger Mobilität das Ziel sein muss, sondern vor allem der Modus eine sehr entscheidende Rolle spielen kann. Einschränkend beachtet werden muss, dass es sich hierbei jedoch um

gruppenweise gemittelte Daten handelt und die Gruppengrößen ebenfalls nur grob abschätzbar sind. Dennoch liegt der Durchschnittswert von ca. 2,2 t CO₂-Äqu. nah an dem für den deutschen Durchschnitt angegebenen Wert des CO₂-Rechners der UBA von ca. 2,1 Tonnen für Mobilität ([UMWELTBUNDESAMT 2021, 1]).

[SCHELEWSKY ET AL. 2020] verwendeten die Mobilitätsstudie auch dazu um nach der Angabe aufzuteilen, wie häufig ein Verkehrsmittel genutzt wird und kategorisierten Personen vor allem anhand deren PKW-Nutzung. Dabei lagen knapp 43% der Personen in der Gruppe der täglichen PKW-Nutzer und es wurde zudem bei der ÖPNV-Nutzung danach unterteilt, ob ein Führerschein, also damit die potentielle Alternative der PKW-Nutzung vorlag [SCHELEWSKY ET AL. 2020].

Angaben in CO₂-Emissionen pro Person und Tag

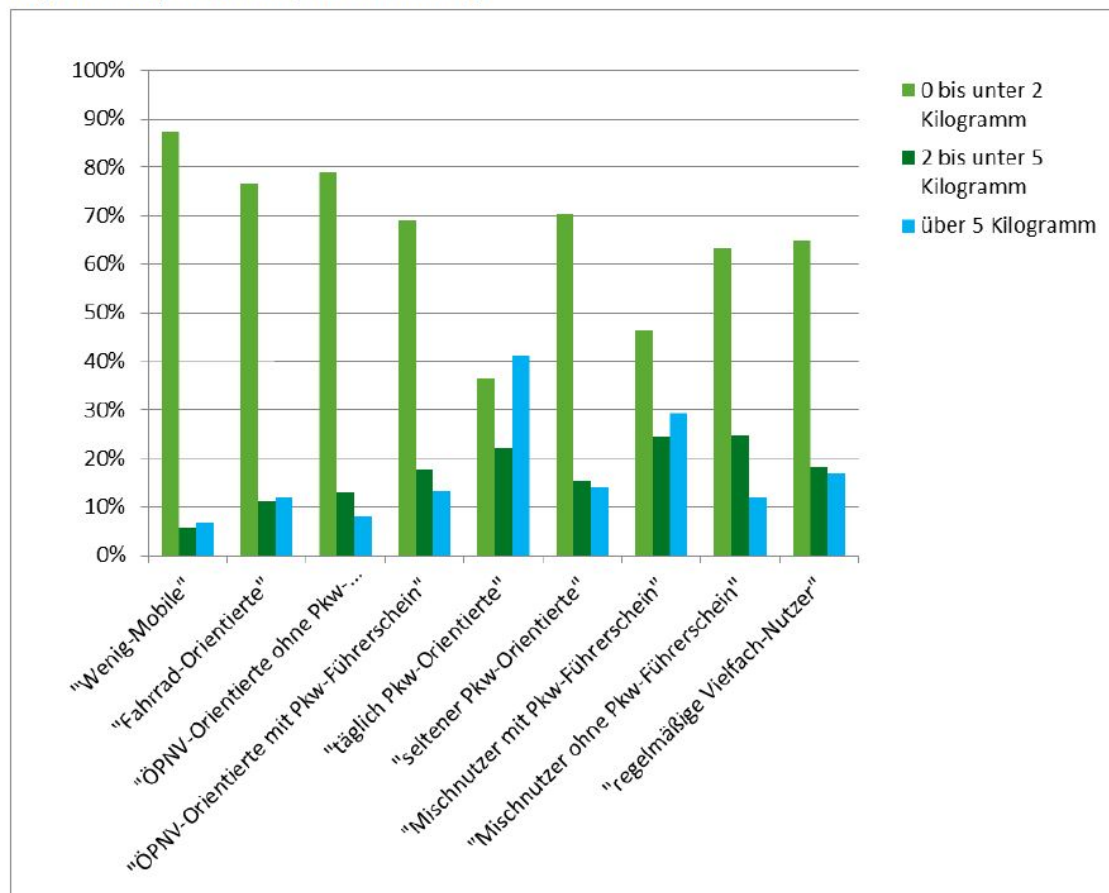


Abb. 30: CO₂-Emissionsklassen nach verschiedenen Mobilitätstypen Deutschland 2017, Quelle: [SCHELEWSKY ET AL. 2020] nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019], TREMOD 6.03

Es ist erkennbar (vgl. Abb. 30), dass auch innerhalb der meisten Gruppen über 60% der Personen unter dem Wert von 2 kg CO₂ pro Tag lagen, nur in der Gruppe der täglichen PKW-Nutzer und der sogenannten Mischnutzer ist dies nicht der Fall, wobei auch in diesen Gruppen deutlich weniger als die Hälfte der Personen in der höchsten Emissionsklasse lagen. Innerhalb aller Gruppen ist es also nur ein oft kleiner Anteil der Personen, die besonders hohe Emissionen verursacht, sodass nebst den regelmäßigen PKW-Nutzenden auch innerhalb der anderen Gruppen dennoch Ausreißer vorhanden sind. Das bedeutet also, dass eine alleinige

Kategorisierung anhand von Merkmalen wie dem häufigen Fahrradfahren oder dem täglichen Benutzen eines PKW keine eindeutige Aussagen in Bezug auf die zu erwartenden Emissionen zulässt. Schließlich gab es auch bei den Fahrrad-Orientierten über 10% Personen, welche mehr als die unteren 50% der täglichen PKW-Nutzer emittierten.

Die vorherigen Berechnung betrachteten nur die Alltagsmobilität, sodass beispielsweise Flugzeugemissionen keine eigene Berücksichtigung fanden. Dies soll aber bei den späteren Berechnungen noch mit einbezogen werden.

4.2 Theoretische Mobilitätsprofile innerhalb des Budgets

Anhand des B2DS-EU-Budgets und den verschiedenen Emissionsberechnungen für Verkehrsmittel, die bereits in den früheren Kapiteln erläutert wurden, können Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Mobilität exemplarisch auch innerhalb des Budgets möglich sein kann. Orientierung bietet auch hier weiterhin die Studie von [NOBIS, KUHNIMHOF 2019], da Prognosen für ein klimaneutrales Deutschland wie [PROGNOS, ÖI, WI 2021] etwa konstant bleibende Leistungen des Personenverkehrs annehmen. Hier sollen also Beispiele errechnet werden, bei welchen teils ähnlich viel Mobilität wie heute möglich ist, allerdings mit oft anderen Verkehrsmitteln.

4.2.1 Urlaubsflieger

Diese hypothetische Person ist bis auf den jährlichen Urlaubsflug nur zu Fuß, also emissionsfrei unterwegs. Die Berechnung erfolgt anhand der eigenen Berechnungsmethode (siehe 3.3.6), da das Zurückrechnen mit [ATMOSFAIR 2016] nur durch wahlloses Ausprobieren und weniger allgemeingültig sondern nur für spezielle Zielflughäfen möglich wäre.

Angenommen wurde, dass sowohl der Hin- als auch der Rückflug die gleiche Strecke umfassen und somit dies für zwei Flüge gleicher Distanz berechnet wurde. Zudem wurde ein voll besetzter Charterflug angenommen (Berechnung ohne Besetzungszahl), da dies die umweltfreundlichste, aber auch tatsächlich mögliche Flugreise darstellen würde. Wenn nur der Hinweg geflogen und der Rückweg zu Fuß zurückgelegt würde (was hier bei diesen Distanzen allerdings unwahrscheinlich erscheint) wäre insgesamt eine größere Strecke als eine Verdopplung des Hinwegs erlaubt, da bei verschiedenen Distanzen unterschiedliche Faktoren für die Streckenkorrektur und den Strahlungsbilanzfaktor verwendet werden. Das Ergebnis ist hier also eine Art Flugradius, in welchem sich der Zielort dieses jährlichen Urlaubsflugs befinden könnte, wenn vom großen deutschen Flughafen Frankfurt am Main, welcher sich zudem relativ mittig im Land befindet, gestartet wird. Welche erreichbaren Ziele dies für eine Person mit dem Startpunkt Frankfurt für diese Jahre bedeutet ist in der Karte 31 dargestellt. Selbst wenn der Flug die einzige Mobilitätsemission einer Person in einem Jahr ist, würde dieses Budget schon viele Bereiche der Welt ausschließen und im Jahr 2035 auch schon Portugal und Griechenland weitestgehend unerreichbar machen. Dieses Beispiel wird wahrscheinlich für die wenigsten Personen zutreffend sein, soll hier aber vor allem der Veranschaulichung dienen, was für einen Rahmen das Budget bedeutet.

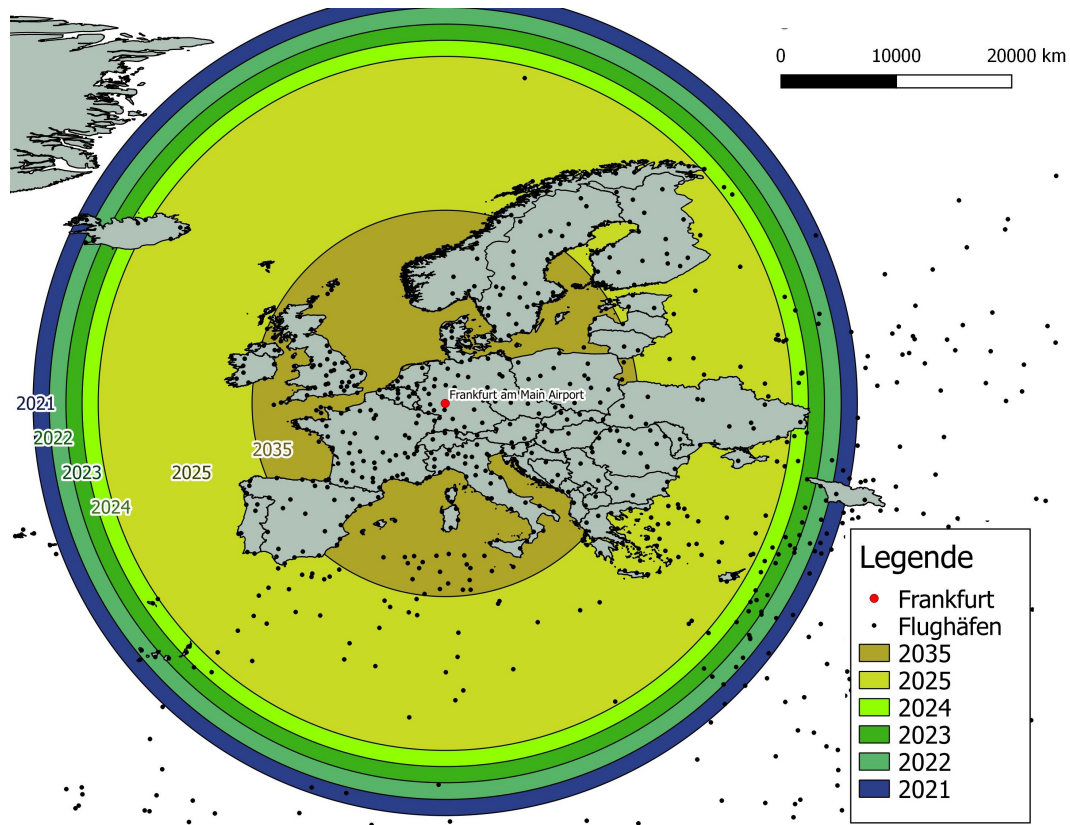


Abb. 31: Flugdistanzen innerhalb des jährlichen Budgets B2DS-EU, Geodatenquellen: [ESRI 2019], [ESRI 2020]

Jahr	Budget B2DS-EU	Distanz Zielort
2021	1,366 t CO ₂	3574 km
2022	1,313 t CO ₂	3434 km
2023	1,260 t CO ₂	3289 km
2024	1,208 t CO ₂	3149 km
2025	1,156 t CO ₂	3009 km

Tab. 30: Mobilitätsprofil: Urlaubsflyer, mögliche Distanz zum Zielflughafen

Da bei Flugzeugen aufgrund der langen Betriebsdauer eines Modells eher weniger deutliche technologische Verbesserungen zu erwarten sind ([GIROD ET AL 2012]), ist durchaus auch der Ausblick bis auf das Jahr 2035 hier möglich, wobei klar erkennbar ist, wie sehr der Radius der erreichbaren Ziele innerhalb dieses Zeitraums schrumpft.

4.2.2 AutoenthusiastIn

Ein weiteres sehr vereinfachendes, aber schon eher mögliches Profil ist das einer Person, welche nebst dem emissionsfreien zu Fuß gehen nur einen PKW verwendet. Hier soll nun für verschiedene PKW vergleichbar gemacht werden, was für jährliche Strecken damit innerhalb eines Jahres möglich wären. Herangezogen wurde der durchschnittliche bzw. exemplarische Energieverbrauch von Mittelklassewagen: Benzin-PKW mit 7,6 Litern, Diesel mit 5,7 Litern,

E-Auto mit 17,3 kWh pro 100km (Batteriekapazität: 30 kWh) ([WIETSCHTEL ET AL. 2019] nach HELMS ET AL. 2016, ADAC 2018).

Jahr	Budget B2DS-EU	Benzin (Jahr)	Diesel (Jahr)	E-Auto (Jahr)
2021	1,366 t CO ₂	5 420 km	6 172 km	9 327 km
2022	1,313 t CO ₂	5 210 km	5 933 km	8 965 km
2023	1,260 t CO ₂	4 999 km	5 693 km	8 603 km
2024	1,208 t CO ₂	4 793 km	5 458 km	8 248 km
2025	1,156 t CO ₂	4 587 km	5 223 km	7 893 km
2035	0,660 t CO ₂	2 619 km	2 982 km	4 506 km

Tab. 31: Mobilitätsprofil: AutoenthusiastIn

Für das Jahr 2021 bedeutet dies also auf den Tagesdurchschnitt heruntergerechnet 14,8 km mit dem Benzinfahrzeug, 16,9 km mit Diesel und mit einem E-Auto sogar eine Strecke von täglich 25,6 km. Gerade zwischen dem Benzin-PKW und dem E-Auto liegen also deutliche Unterschiede. Vergleicht man dies mit den Daten aus der Mobilitätsstudie für Deutschland 2017, so war die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines PKW in Deutschland beim Benzinfahrzeug mit ca. 14 700 km etwa 2,7 mal so hoch, beim Dieselfahrzeug mit jährlich 20 600 km das über 3,3fache und bei Elektro-PKW mit etwa 13 000 km im Faktor 1,4 über dem Budget ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Das bedeutet, dass beim Elektrofahrzeug mit einer durchschnittlichen Besetzungszahl von über 1,4 Personen die aktuelle durchschnittliche Nutzung noch im Budget liegt, während bei den PKW mit Verbrennungsmotoren knapp 3 Personen im Fahrzeug sitzen müssten, um die Emissionen so aufzuteilen, dass noch alle Personen ihr Emissionsbudget einhalten. Die aktuellen durchschnittlichen Besetzungszahlen werden mit ca. 1,45 angegeben, wobei für die reine Alltagsmobilität der Wert noch niedriger liegen kann, nämlich bei 1,33 ([SCHULZ ET AL 2020] nach BMVI 2018, MiD2017).

4.2.3 ÖV-NutzerIn

Zwar haben zu Fuß gehen und Radfahren die niedrigsten Treibhausgasemissionen pro Kilometer, aber bei langen Strecken sind sie oft zu langsame und beschwerliche Optionen. So machten 2017 diese beiden Kategorien zwar 33% der Wege aus, aber durch eher kurze Strecken nur 6% der Personenkilometer ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Somit verbleibt nebst einem überwiegenden Anteil des MIV nur noch der ÖV mit 19% der Strecke ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) auch als Option für lange Wege mit geringen Emissionen.

Als „Mischnutzung“ des ÖV werden die Emissionsfaktoren, welche in den entsprechenden Abschnitten 3.4 und 3.5 beschrieben wurden, mit der Aufteilung der täglichen durchschnittlichen Personenkilometer nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] gewichtet und somit ein Wert von 59,6 g CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer verwendet. Selbst bei den Werten für 2025 ist davon auszugehen, dass die Elektrifizierung weiter fortgeschritten ist, sodass die Strecken dann auch länger ausfallen können. Darum sollte bis dahin eine Neuberechnung anhand aktualisierter Daten erfolgen. Im Jahr 2017 lag die durchschnittlich zurückgelegte Strecke von Personen in Deutschland bei 32 km (ohne dienstliche Fahrten [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]), was im Jahr 2021 selbst für das emissionsreichste Verkehrsmittel dem Bus im Nahverkehr mit 47 km im Budget gut möglich ist.

Jahr	Bahn (Nah)	Bahn (Fern)	Misch-ÖV	SB ¹	Bus (Nah)	Bus (Fern)
2021	18 537 km	29 491 km	22 909 km	24 836 km	17 075 km	47 103 km
2022	17 818 km	28 346 km	22 020 km	23 873 km	16 413 km	45 276 km
2023	17 099 km	27 202 km	21 131 km	22 909 km	15 750 km	43 448 km
2024	16 393 km	26 079 km	20 259 km	21 964 km	15 100 km	41 655 km
2025	15 687 km	24 957 km	19 387 km	21 018 km	14 450 km	39 862 km

Tab. 32: Mobilitätsprofil: ÖV-NutzerIn¹: Stadtbahnen wie Straßenbahn, S-Bahn, U-Bahn

¹ Straßenbahn, S-Bahn, U-Bahn

Da auch nur etwa ein Prozent der Bevölkerung mehr als 50 km an den Wochentagen als Pendler zurücklegte ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) bedeutet dies, dass dieses Budget in den meisten Fällen für den Weg zu Arbeit ausreicht. Die über 60 km täglich, welche mit einer ÖV-Mischung wie sie die durchschnittliche Nutzung in Deutschland 2017 repräsentiert möglich sind, sollten also weit ausreichend sein.

ÖPNV und Fernzugreise Für viele Personen kann für die alltägliche Mobilität allein der öffentliche Nahverkehr ohne Züge ausreichend sein und nur für Reisen wird auch der Fernverkehr genutzt. Die Gruppe der monomodalen ÖV-Nutzer legten im Jahr 2017 ca. 19 der insgesamt 28 täglichen Personenkilometer mit dem ÖV zurück, wobei der Rest mit PKW oder zu Fuß zurückgelegt wurde ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Um den Verzicht auf PKW mit einzuberechnen muss also durchaus mit zusätzlichen ÖV-Fahrten gerechnet werden. Deshalb soll hier wieder die Tagesstrecke von 32 km verwendet werden, welche ohne dienstliche Fahrten vom Durchschnitt zurückgelegt wird und damit etwa 760 kg CO₂-Äqu. des Budgets verbraucht. Übrig bleibt dann noch die Möglichkeit für weite Reisen mit dem Fernverkehrs.

Jahr	Bahn Fern (km)
2021	13 100
2022	11 956
2023	10 812
2024	9 689
2025	5 566

Tab. 33: Mobilitätsprofil: ÖPNV und Fernzug; außerhalb des alltäglichen öffentlichen Nahverkehrs noch verbleibende Strecke im Fernzug

Das bedeutet also, dass neben der Alltagsmobilität mit öffentlichen Verkehrsmitteln noch gut Reisen mit dem Fernverkehr innerhalb des Budgets möglich sind. Über die nächsten Jahre würde es jedoch bei dem aktuellen technischen Stand der Bahn auch über die nächsten Jahre einen deutlichen Rückgang der Strecken bedeuten. Dies könnte durch effizientere Bahnen und insbesondere eine vollständige Elektrifizierung mit erneuerbarem Strom aber insofern abgemildert werden, dass die Technologien bei gleichen Emissionen weitere Strecken ermöglichen.

4.2.4 Pendeln und Einkaufen mit Auto, Rest mit ÖV

Für die Fahrt zur Arbeit und Ausbildung sowie Einkauf legte die deutsche Durchschnittsperson 2017 täglich 13 km zurück, während der Rest (ohne die dienstlichen Fahrten, da diese über die erbrachte Dienstleistung oder das gelieferte Produkt auf die Kundschaft übertragen werden) bei etwa 20 km liegt ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]).

Für die Fahrten mit PKW zur Arbeit/Ausbildung und zum Einkauf wird wieder je das Durchschnittsfahrzeug aus Abschnitt 4.2.2 verwendet und eine Besetzungszahl von 1 angesetzt, da bei Alltagsmobilität wie bereits beschrieben die Fahrten alleine einen großen Anteil ausmachen. Das bedeutet aber, dass dabei noch Potential zum Senken des eigenen Anteils am Emissionsbudget besteht

Jahr	Budget B2DS-EU	Rest (Benzin)	Rest (Diesel)	Rest (E-Auto)
2021	1,366	0,170	0,316	0,671
2022	1,313	0,117	0,263	0,618
2023	1,260	0,064	0,210	0,565
2024	1,208	0,012	0,158	0,513
2025	1,156	-	0,106	0,461

Tab. 34: Mobilitätsprofil: Auto und Rad; außerhalb der Autofahrt noch verbleibende Emissionen in tCO₂

Bereits im Jahr 2025 ist dies mit dem aktuell durchschnittlichen Benzin-PKW nicht mehr möglich, aber in den Jahren davor existiert noch ein verbleibendes Budget, das nun in die möglichen ÖV-Kilometer übersetzt wird:

Jahr	Rest (Benzin)	Rest (Diesel)	Rest (E-Auto)
2021	2 852 km	5 302 km	11 258 km
2022	1 963 km	4 413 km	10 369 km
2023	1 074 km	3 523 km	9 480 km
2024	201 km	2 651 km	8 607 km
2025	-	1 779 km	7 735 km

Tab. 35: Mobilitätsprofil: Auto und Rad; außerhalb der Autofahrt noch verbleibende Strecken mit Misch-ÖV

Die jährlich durchschnittlichen 7 300km welche mit Erledigungen, Freizeit und Begleitung von anderen zurückgelegt werden können damit also auch nicht immer abgedeckt werden, wobei davon der Anteil ohne die Freizeit mit 2 555 km ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) zumindest 2021 noch mit dem ÖV möglich werden könnte.

4.2.5 Mallorca-Flug und Rest

Ein sehr typisches Reiseziel der Deutschen ist die spanische Insel Mallorca, welche hier als Beispiel herangezogen wird. Mit der Website atmosfair wird für den Hin- und Rückflug von Frankfurt am Main nach Palma de Mallorca im Durchschnitt 0,568 t CO₂ berechnet ([ATMOSFAIR 2021]). Somit verbleiben für 2021 noch 0,798 t CO₂ im Budget, welche für

die alltägliche Mobilität verwendet werden können. Das sind hier im Jahr 2021 immer noch nennenswerte Mengen, sodass mit dem ÖV eine durchschnittliche Alltagsmobilität im Bereich von 32 km wie sie von [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] genannt wird täglich möglich ist. Trotz Urlaubsflug kann also ein relativ normales Alltagsleben noch geschehen. Bei den Autos muss sich deutlich mehr eingeschränkt werden. Mit einem PKW mit Verbrennungsmotor sind nur noch etwa 8 km täglich möglich.

Jahr	ÖV	Benzin-PKW	Diesel-PKW	E-Auto
2021	13 238 km	3 131 km	3 565 km	5 387 km
2022	12 500 km	2 956 km	3 366 km	5 087 km
2023	11 611 km	2 746 km	3 127 km	4 725 km
2024	10 738 km	2 539 km	2 892 km	4 370 km
2025	9 866 km	2 333 km	2 657 km	4 015 km

Tab. 36: Mobilitätsprofil: Mallorca-Flug; außerhalb des Mallorca-Flugs noch verbleibende Mobilität

4.2.6 RadfahrerIn, Urlaub mit ÖV

Zwar lagen die durchschnittlichen Fahrradkilometer pro Person in Deutschland bei 1,4 km pro Tag, aber bei den befragten Personen, welche an dem Tag der Befragung mit dem Fahrrad gefahren waren, wurden durchschnittlich 9 km mit dem Fahrrad zurückgelegt ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Gruppe der Personen, deren Schwerpunkt auf dem Fahrrad als Verkehrsmittel liegen 2017 nur 5% der deutschen Bevölkerung ausmachten ([NOBIS 2019]). Dass überhaupt Emissionen angenommen werden, welche mit der zurückgelegten Strecke zunehmen liegt vor allem an der Abnutzung des Fahrrads und der Infrastruktur.

Jahr	Bahn Fern (km)	Bahn Nah (km)
2021	27 2241	17 112
2022	26 079	16 393
2023	24 935	15 674
2024	23 813	14 968
2025	22 690	14 262

Tab. 37: Mobilitätsprofil: Rad und ÖV; außerhalb des Fahrradfahrens noch verbleibende Strecke im ÖV

Die täglichen 32 km Gesamtfahrstrecke des deutschen Durchschnitts würden nur etwa 105 kg CO₂-Äquivalenten bedeuten ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019], [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]), sind jedoch vermutlich nur von wenigen bis jetzt erreicht, da nur 4% der Wege zwischen 5 und 20 km mit dem Fahrrad zurückgelegt werden. Dennoch kann dies als realistisch erreichbarer Weg angenommen werden. Denn wenn der nach eigener Erfahrung erreichbare Wert einer Durchschnittsgeschwindigkeit von $18 \frac{km}{h}$ gehalten wird und die durchschnittliche Zeit, welche Personen für Mobilität verwenden (ca. 80 Minuten pro Tag, [NOBIS ET AL. 2019]) verwendet wird wären es immerhin noch 24 km, welche ohne zeitlichen Mehraufwand zurückgelegt werden

könnten, in Metropolen ist diese Fahrgeschwindigkeit sogar schneller als das Mittel aller Verkehrsmittel ([NOBIS ET AL. 2019]).

Mit diesem verbleibenden Strecken, die noch zurückgelegt werden können, sind gut innereuropäische Reisen möglich. Grob geschätzt ist zum Beispiel eine Urlaubsfahrt ins ca. 2500 km entfernte Lissabon von Deutschland aus eine gut zurücklegbare Strecke. Da dabei noch so viel Strecke verbleibt, kann abgeschätzt werden, ob nebst der Urlaubsfahrt auch noch andere Alltagsmobilität noch mit dem ÖV möglich ist:

Anteil der Alltagsmobilität im ÖV Vergleicht man die Verkehrsleistung im Jahr 2017 nach Wegzweck zwischen den Personen die sehr regelmäßig Fahrradfahren und Personen die es seltener tun, so fällt auf, dass das Fahrrad bei der regelmäßigen Nutzung seltener für die Freizeit und häufiger für die Fahrt zur Arbeit genutzt wird ([NOBIS 2019]). Daraus kann abgeschätzt werden, dass für Personen die schon viel auf dem Rad sitzen beispielsweise das Erledigen von Einkäufen mit dem Fahrrad kein großes Problem darstellt. Tatsächlich macht es dabei auch 11% der Wege aus und steht dort nur in den dienstlichen Fahrten zurück, die hier nicht erfasst werden ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Stattdessen kann aber ein anderer Effekt erkannt werden, in dem sich ÖV und Fahrrad gut ergänzen, nämlich der Effekt der Jahreszeiten. So nimmt durch die Zunahme des Fahrradverkehrs wie es im Sommer typisch passiert grundsätzlich der Anteil der Öffentlichen Verkehrsmittel ab ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]). Die Klimadaten geben dabei aber die gleiche Anzahl der Regentage in Deutschland gemittelt für die drei Sommermonate bzw. Wintermonate an, wobei der Juni die meiste Niederschlagsmenge erbrachte ([WETTER.DE 2021]), sodass der Verzicht auf das Fahrradfahren wohl weniger allein am Niederschlag liegen kann, sondern eher an den Temperaturen. Betrachtet man dann die Frosttage, so sind dies im linearen Mittel aktuell 80 Tage im Jahr, an denen Temperaturen unter 0°C erreicht werden ([DWD 2020]).

Würde eine Person also nur an Frosttagen mit dem ÖV fahren und ansonsten alle Mobilität mit dem Fahrrad zurücklegen, so wären dies 280 Tage im Jahr für die 32 täglichen Kilometer mit dem Fahrrad. Das Resultat sind 81 kg CO₂-Äqu. für das Fahrradfahren und 153 kg CO₂-Äqu. für eine ÖV-Mischnutzung wie sie bereits in Abschnitt 4.2.3 verwendet wurde. Folgende Möglichkeiten verbleiben dann noch für Reisen mit dem Zug:

Jahr	Bahn Fern (km)	Bahn Nah (km)
2021	24 439	15 362
2022	23 294	14 642
2023	22 150	13 923
2024	21 028	13 218
2025	19 905	12 512

Tab. 38: Mobilitätsprofil: Rad und ÖV; außerhalb des Fahrradfahrens und ÖV bei Frosttagen noch verbleibende Strecke im ÖV

Das heißt, dass selbst bei dem unregelmäßigen ÖV-Nutzen bei Frosttagen immer noch gut mindestens eine Urlaubsreise mit der Bahn möglich ist.

4.2.7 PedelecfahrerIn mit ÖV

Bei der Befragung von Personen in Deutschland 2017 legten die Personen, welche am Befragungstag ein Pedelec nutzten, im Schnitt 16 km damit zurück ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) und hatten mit 6,1 km eine deutlich höhere durchschnittliche Weglänge als das Fahrrad mit 3,7 km ([NOBIS 2019]). Wenn die komplette private Mobilität einer deutschen Durchschnittsperson von 32 km damit zurückgelegt würde, wären dies etwa 175 kg CO₂-Äquivalente im Jahr ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019], [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]).

Jahr	Bahn Fern (km)	Bahn Nah (km)
2021	25 708	16 160
2022	24 564	15 440
2023	23 420	14 721
2024	22 297	14 015
2025	21 174	13 310

Tab. 39: Mobilitätsprofil: Pedelec und ÖV; außerhalb des Pedelecfahrens noch verbleibende Strecke im ÖV

Der Nutzungsgrund war 2017 bei Pedelecs jedoch vor allem die Freizeit und das Einkaufen ([NOBIS 2019]). Der Weg zur Arbeit wird anteilig deutlich seltener mit einem Pedelec zurückgelegt als mit dem Fahrrad, was jedoch auch daran liegen kann, dass gerade Senioren häufig ein solches Fahrzeug besitzen ([NOBIS 2019]). Dennoch erfolgt hier die Annahme, dass ein ganz durchschnittliches Mobilitätsverhalten an den Tag gelegt wird. Für den Urlaub mit dem Zug verbleiben die Strecken in Tabelle 39. Hier sind zwar erkennbar weniger Kilometer im ÖV möglich als wenn das Fahrrad im Alltag genutzt wird, dennoch sind das noch nennenswerte Strecken mit denen gut innereuropäische Zugfahrten möglich sind. Für viel mehr Alltagsverkehr mit dem ÖV ist hier allerdings wenig Raum für Möglichkeiten, dafür steht jedoch mit dem Pedelec genügend Unterstützung mit dem Motor, dass damit auch sehr gut Einkäufe erledigt werden könnten.

4.2.8 LangstreckenpendlerIn

Bei den bisherigen Berechnungen wurde oft auch der Abgleich mit durchschnittlichem Mobilitätsverhalten gezogen. Dabei gibt es jedoch auch viele Personen, für die besonders der Weg zur Arbeit eine deutlich längere Strecke bedeutet. So waren 2017 rund 45% der Erwerbstätigen mehr als 10 km zur Arbeitsstätte unterwegs und lagen somit über dem Durchschnitt, welcher zuvor auf Basis der Gesamtbevölkerung gewählt wurde ([TK 2018] nach DESTATIS 2017). Gut Dreiviertel der Erwerbstätigen liegen dabei unterhalb der Grenze von 25 km Pendelentfernung (einfache Strecke, [TK 2018] nach DESTATIS 2017), sodass dieser Wert nun hier verwendet wird um einen guten Vergleichswert für Personen zu bilden, die eine große Strecke pendeln. Über das Jahr gerechnet mit 30 Urlaubstagen sowie 5 Arbeitstagen in der Woche wären dies im Jahr ca. 230 Tage an denen gependelt wird, also 11 500 km zurückgelegte Strecke. Dies mit dem Auto zurückzulegen ist (vgl. Abschnitt 4.2.2) keine Option innerhalb des Budgets. Es ist jedoch mit allen öffentlichen Verkehrsmitteln möglich (vgl. Abschnitt 4.2.3) oder natürlich theoretisch auch mit dem Fahrrad, wobei letzteres bei dieser Distanz und der damit verbundenen Zeit wohl eher selten der Fall ist.

Jahr	Bahn (Nah)	Bahn (Fern)	ÖV	ÖPNV	SB ¹	Bus (Nah)
2021	518,6	833,3	680,6	618,5	733,5	446,0
2022	465,6	780,3	627,6	565,5	680,5	393,0
2023	412,6	727,3	574,6	512,5	627,5	340,0
2024	360,6	675,3	522,6	460,5	575,5	288,0
2025	308,6	623,3	470,6	408,5	523,5	236,0

Tab. 40: Mobilitätsprofil: LangstreckenpendlerIn, verbleibende Emissionen in kg CO₂-Äquivalent je nach Pendelverkehrsmittel, ¹ Straßenbahn, S-Bahn, U-Bahn

Mit allen öffentlichen Verkehrsmitteln ist das Pendeln auch über längere Strecken möglich. Es verbleiben jedoch beim Beispiel des Busfahrens nur noch geringere Mengen für die restliche Mobilität. Mit dem Fahrrad sind dabei bei allen Verkehrsmitteln quasi unbegrenzt noch Fahrten möglich (mindestens ca. 50 000 km), eine Urlaubsfahrt mit dem PKW ist aber nur im Rahmen von ca. 2 300 km bis 4 400 km möglich (siehe Tab. 41).

Jahr	Bahn (Nah)	Bahn (Fern)	ÖV	ÖPNV	SB	Bus (Nah)
2021	2 058	3 307	2 701	2 454	2 911	1 770
2022	1 847	3 097	2 490	2 244	2 700	1 560
2023	1 637	2 886	2 280	2 034	2 490	1 349
2024	1 431	2 680	2 074	1 827	2 284	1 143
2025	1 224	2 473	1 867	1 621	2 077	937

Tab. 41: Mobilitätsprofil: LangstreckenpendlerIn, verbleibende PKW-Strecke (durchschnittliches Benzinfahrzeug) in Fahrzeugkilometern je nach Pendelverkehrsmittel

Bei diesen verbleibenden Strecken ist oft noch ein innerdeutscher Urlaub zum Beispiel an die Nordsee gut möglich. Betrachtet man als möglichen Durchschnitt den Wert für die ÖV-Mischung sind es sogar bis zu 1 300 km bis zum Urlaubsziel. Da hier die Besetzungszahl von 1 angenommen wurde besteht durch Mitfahrende auch die Möglichkeit die Strecke deutlich zu verlängern.

4.2.9 Ausformulieren der Mobilitätsprofile für 2021

Für alle diese Profile gilt, dass zusätzlich unbegrenzt Strecken zu Fuß zurückgelegt werden können, da dies hier als emissionsfrei angenommen wird.

- 1) **Flug** Sie können im Jahr 2021 nur zu Fuß gehen und keinerlei andere Verkehrsmittel nutzen, dafür aber eine Flugreise (Hin- und Rückflug) mit einem Ziel in 3 574km Entfernung machen.
- 2) **PKW** Sie können im Jahr 2021 5 420 km (14,8 km täglich) mit einem Mittelklasse-Benzin-PKW oder 6 172 km (16,9 km täglich) mit einem Diesel-PKW der Mittelklasse oder 9 327 km (25,6 km täglich) mit einem Mittelklasse-E-Auto zurücklegen und ansonsten nur noch zu Fuß gehen.
- 3) **ÖV I** Sie nutzen 2021 nur den ÖV, aber diesen quasi unbegrenzt (knapp 23 000 km mit einer Mischung der ÖV-Verkehrsmittel)
- 4) **ÖV II** Sie nutzen 2021 nur den Nahverkehr für die alltägliche Mobilität (max. 32km pro Tag) und haben darüber hinaus noch Reisen mit dem Fernverkehr der Bahn mit einer Gesamtstrecke von ca. 13 000 km als Möglichkeit.

- 5) PKW, ÖV** Sie fahren zur etwa 7 km entfernten Arbeit oder Ausbildungsstelle mit dem PKW und können ansonsten ca. 50 km wöchentlich oder jährlich 2852 km noch den ÖV nutzen (bei Benzin PKW). Für Diesel-PKW: 5302 km (ca. 95 km wöchentlich), E-Auto: 11258 km (ca. 205 km wöchentlich).
- 6) Mallorca-Flug und PKW** Einmal im Jahr fliegen sie auf die Insel Mallorca und können sonst noch täglich entweder alle Mobilität mit dem ÖV zurücklegen (32 km täglich), oder müssen bis auf 8 km täglich mit dem PKW bzw. 14 km mit dem E-Auto den Rest zu Fuß gehen.
- 7) Rad, ÖV I** Alle alltägliche Mobilität wird mit dem Fahrrad zurückgelegt und Sie können bis zu zwei auch sehr große innereuropäische Reisen Ihrer Wahl mit dem Zug zurücklegen (maximal 27000km gesamt mit Fernzügen).
- 8) Rad, ÖV II** Alle alltägliche Mobilität wird mit dem Fahrrad zurückgelegt außer an Frosttagen (maximal 80 Tage im Jahr), an denen Sie alle Wege mit dem ÖV zurücklegen können. Sie können bis zu zwei auch sehr große Reisen Ihrer Wahl mit dem Zug zurücklegen (maximal 24000km gesamt mit Fernzügen).
- 9) Pedelec, ÖV** Sie legen alle alltägliche Mobilität mit dem Pedelec zurück und können einmal im Jahr eine auch sehr große Zugreise ihrer Wahl machen (maximal 25000 km).
- 10) Langstreckenpendeln mit ÖV, Urlaub mit PKW** Sie pendeln mit öffentlichen Verkehrsmitteln zur maximal 25 km entfernten Arbeitsstätte, fahren einmal im Jahr mit dem PKW in den Urlaub (maximal ca. 1300 km entferntes Ziel) und legen sonstige Strecken nur zu Fuß zurück.

5 Indikatoren der Klimawirksamkeit von Mobilität

Um einen Einblick in die Klimafreundlichkeit von Verhalten zu gewinnen kann es hilfreich sein Indikatoren aufzustellen. Das sind Messwerte, welche eine Auskunft über die Mobilitätsemissionen einer Person geben sollen, ohne dabei alle Details erfassen zu müssen. Die in dieser Arbeit an die Indikatoren gestellten Ansprüche sind, dass sie einfach und möglichst allgemein gültig sind. Einfachheit ermöglicht einem breiten Anteil der Bevölkerung die Kriterien zu verstehen und somit die Schwelle zum klimafreundlicheren Handeln gering zu halten. Wird dieses Kriterium nicht erreicht, kann eine noch so umfassende und genaue Einschätzung der Wirkung einer Entscheidung dennoch ihren Einfluss nicht erreichen. Durch ein allgemeine Gültigkeit wird sicher gestellt, dass eine Orientierung an dem Indikator nicht regelmäßig zu einer falschen Aussage führt, da einerseits dann klimaschädliches Verhalten gefördert werden könnte, andererseits aber auch das Vertrauen in die Leitlinien verloren werden kann.

5.1 Big-Five, lexikalischer Ansatz

Ein häufig genutzter Ansatz der einfachen Kategorisierung von Persönlichkeitseigenschaften sind die sogenannten „Big-Five“, welche auf fünf Faktoren basieren und sich historisch aus einer Vielzahl von beschreibenden Wörtern herauskristallierten ([GOLDBERG 1990]). Es wurde also klar, dass statt 60 Adjektiven auch nur 5 Faktoren schon zufriedenstellend die wichtigsten Eigenschaften darstellen und dass diese fünf Faktoren orthogonal zueinander sind, also die je aufgespannten Dimensionen sich nicht überschneiden ([GOLDBERG 1990]). Das heißt die fünf Faktoren sind ausreichend für die Beschreibung und überschneiden sich in ihren Aussagen nicht.

Um für die Klimawirksamkeit der Mobilität einer Person ebenfalls eine möglichst kleine Anzahl von Indikatoren herauszufinden, soll hier also zunächst parallel vorgegangen werden: Es werden viele Faktoren herausgesucht und später anhand deren Schwankungsbereich und möglichen Auswirkungen gegeneinander abgewogen werden.

5.1.1 Vergleich mit Websites

Bei der Erstellung der psychologischen Big-Five wirkten sehr verschiedene Personen mit ([GOLDBERG 1990]). Um hier also viele Vorschläge abzufragen und zu vergleichen wurden im folgenden Websites durch das Nutzen einer Internetsuchmaschine geöffnet und deren Einsparempfehlungen für CO₂ betrachtet.

	↓ Flüge	↑Rad	Auto→Rad	Auto→ÖV	↓ Strecken
OroVerde	X		X	X	
Smarticular	X		X	X	X
Quarks	X	X	X	X	X
Greenpeace	(Kurzstrecken)		X	X	
CO2Online	X				
Klimakollekt ¹ e	X	X	X	X	
Weltwunderer ²	X	X	X	X	X

Tab. 42: Empfehlungsvergleich: Suche nach „CO₂ einsparen Tipps“, Symbole: ↓: sinkend, ↑: steigend, →: Wechsel zu; Quellen: [OROVERDE 2021], [SMARTICULAR 2021], [DÖBBELT 2020], [GREENPEACE 2021], [HAKENES 2020], [KLIMA KOLLEKTE 2018], [WELTWUNDERER 2020]

¹: weitere Vorschläge: Fahrgemeinschaften, spritsparender Fahrstil, CarSharing

²: weitere

Vorschläge: u.a. Langsamer fahren, Reifendruck anpassen, Laufen, Autobeladung anpassen

Dabei ist quasi Konsens, dass Flüge reduziert werden müssen und vom Auto auf andere Optionen umgestiegen werden sollte. MIV und Flüge sind hier also die meist genannten Verkehrsmittel die beachtet werden sollten, was auch später in der Indikatorenauswahl mit behandelt wird.

5.1.2 Vergleich Wahlprogramme

Um einen weiteren Einblick in häufig gewählte Ansätze zur Gestaltung der Mobilität zu gewinnen werden im folgenden Wahlprogramme der aktuell im Bundestag vertretenen Parteien verglichen. Diese sind zwar auf Bundesebene gedacht, können aber dennoch Zielvorgaben enthalten die die ganz persönliche Ebene betreffen. Dabei wurden die bei Verfassen der Arbeit aktuellsten frei verfügbaren Fassungen aller Programme verwendet.

	↓ Flüge	↑ Schiene	Tempolimit	E-PKW	↑ Rad	↑ ÖPNV	Ende Verbrenner
CDU	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Grüne	Ja	Ja	130km/h		Ja	Ja	2030
SPD		Ja	130 km/h	Ja		Ja	
FDP	Nein	(Ja)	Nein		(Ja)		Nein
Linke	Ja	Ja	u.a.120km/h	Ja	Ja	Ja	2030
AFD	Nein	Ja	Nein	Ja		Ja	Nein

Tabelle 43: Wahlprogramme im lexikalischen Ansatz, Quellen: [CDU UND CSU 2021], [BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN 2021], [SPD 2021], [FREIE DEMOKRATEN 2021], [DIE LINKE 2021], [ALTERNATIVE FÜR DEUTSCHLAND 2021]

Auch bei den Wahlprogrammen zeichnete sich ab, dass relativ ähnliche Bereiche angesprochen wurden, allerdings mit teils widersprüchlichen Zielen. Gerade PKW standen oft im Fokus, während die Reduktion der Mobilität wenig behandelt wurde. Dabei kann vermutet werden, dass die Einschränkung der Mobilität an sich für wenige Personen erstrebenswert ist. Einzige Einigkeit zwischen den Parteien bestand darin, dass grundsätzlich mehr Förderung für die Schienenfahrzeuge möglich sein sollte. Deswegen wird das ÖPNV-Verhalten auch mit bei der Vorauswahl der Indikatoren berücksichtigt.

5.1.3 Stand der internationalen Forschung

Die bis jetzt gesammelten Ideen werden nun mit dem Forschungsstand aus dem Ausland verglichen.

In Großbritannien konnten bei einer Haushaltsbefragung von ca. 130 Haushalten vor allem folgende Faktoren für hohe Mobilitätsemissionen ausgemacht werden: Besonders deutlich war ein Zusammenhang zwischen einem hohen Einkommen und Emissionen aller Verkehrsmittel, sowie dem damit oft auch einhergehenden Faktor, dass die Person arbeitet ([BRAND, BOARDMAN 2008]). Auch das Geschlecht spielte eine Rolle, wobei die Nutzung von Verkehrsmittel an sich weniger betroffen war, sondern mehr die Gesamtmenge der Mobilität ([BRAND, BOARDMAN 2008]). Frauen fuhren z.B. auch oft Auto, aber über weniger lange Strecken als Männer. In Bezug auf das Alter war vor allem die Gruppe der 36 bis 65 Jahre alten und auch Personen in Singlehaushalten diejenigen, welche deutlich mehr Flüge vorwiesen und mit einem deutlich höheren CO₂-Wert aus der Studie hervorgingen. Standen mindestens zwei Autos im Haushalt zur Verfügung, so lagen die Treibhausgasemissionen 75% über dem Durchschnitt und noch 50% über Haushalten mit nur einem Auto ([BRAND, BOARDMAN 2008]). Eine neuere Studie widerlegte einen Teil dieser Angaben. So kamen [BUECHS, SCHNEPF 2013] zur Aussage, dass Singlehaushalte sogar eher niedrigere Emissionen für den Transport im Vergleich mit Haushalten mit zwei Personen hatten. Sie konnten jedoch bestätigen, dass ein höheres Einkommen, das männliche Geschlecht der Person, das Alter zwischen 36 und 64 oder ein Arbeitsplatz mit einem höheren zu erwartenden Treibhausgasausstoß für den Verkehr einherging. Besonders deutlich waren die Zusammenhänge mit einer langen Bildung (mehr als 16 Jahre) oder auch dem Wohnen im ländlichen Raum und zwar letzteres auch vom Einkommen unabhängig ([BUECHS, SCHNEPF 2013]).

In Spanien konnte für die Kategorie des Transports und der Kommunikation vor allem in Haushalten in dicht besiedelten, städtischen Gebieten eine hohe Nachfrage und somit hohe

Emissionen nachgewiesen werden ([DUARTE ET AL. 2012]).

Für Irland kamen [LYONS ET AL. 2012] zum Schluss, dass in ländlichen Regionen durch mehr Nutzung von PKW die Emissionen mancher Treibhausgase höher lagen und mit einem höheren gesamten CO₂-Ausstoß auch ein höheres Einkommen einherging.

In Montreal in Kanada als Beispiel einer Großstadt hatten Personen die am Stadtrand wohnten die höchsten Mobilitätsemissionen, wobei hier keine Treibhausgase sondern Gase die die Luftqualität betreffen erhoben wurden ([SIDER ET AL. 2013]). Es ist aber davon auszugehen, dass eine höhere Emission von NO_x und anderen Schadstoffen an sich auch mit einer erhöhten Emission von CO₂ einhergeht, wenn ähnliche Verkehrsmittel verwendet werden. Der Besitz eines Autos und auch ein erhöhtes Einkommen wurden von [SIDER ET AL. 2013] als wichtige Faktoren genannt.

Für die Schweiz wurde gezeigt, dass dort im ländlichen Raum ebenfalls höhere Transportemissionen bei der größeren Mobilitätskategorie, nämlich dem Transport auf Land vorlagen, während die stadtbewohnende Bevölkerung mehr mit dem Flugzeug unterwegs war, was jedoch die großen Unterschiede in der ersten Kategorie nicht ausgleichen konnte ([PANG ET AL. 2020]). Im ländlichen Raum wurden insgesamt mehr Kilometer und diese vermehrt mit dem PKW zurückgelegt ([PANG ET AL. 2020] nach FROEMEL ET AL. 2018).

Für Deutschland konnten wenige umfassende Studien zu diesem Thema gefunden werden, aber der Vergleich mit diesen Ländern kann dennoch nützlich sein, da insbesondere mit europäischen Nachbarländern viele Ähnlichkeiten zu erwarten sind.

5.1.4 IPCC-Bericht

Nun soll noch eine global wissenschaftliche Sicht aufgezeigt werden. [SIMS ET AL. 2014] nennen vor allem folgende Bereiche, welche eine wichtige Rolle für die Verringerung der Emissionen im Transportsektor spielen: Die Menge der Mobilität (im Bezug auf den Personenverkehr also die gesamten Personenkilometer), die Entscheidung zwischen Verkehrsmodi, sowie technische Eigenschaften von Treibstoffen und Fahrzeugen. Gerade die ersten beiden Punkte sind auf der individuellen Entscheidungsebene wichtig und beeinflussbar. Um den Transport nachhaltiger zu gestalten müsse zum Beispiel der Sektor von (Erd)Öl und der Nutzung des MIVs unabhängiger werden ([SIMS ET AL. 2014]). Im Vergleich zwischen den Emissionen pro Kopf ist dies nicht immer vom Wohlstand des Landes direkt abhängig, da es auch Ausnahmen gibt, insgesamt ist aber im Vergleich innerhalb und zwischen Ländern die finanzielle Lage stark mit den Treibhausgasemissionen korreliert ([SIMS ET AL. 2014] nach IEA 2012). Eine sehr aufschlussreiche, aber teils schwer zu erhebende Zahl ist der Erdölverbrauch pro Kopf ([SIMS ET AL. 2014]), welcher Mobilität auf dem Land, Wasser und in der Luft umfassen könnte und damit mit den direkten Emissionen schon einen nennenswerten Anteil der Treibhausgasemissionen umfassen kann.

5.1.5 Vorauswahl

Anhand der bisherigen Vorschläge der verschiedenen Websites und Wahlprogramme und auf Basis der bisherigen Kapitel dieser Arbeit ergaben sich folgende mögliche Indikatoren. Dabei wird anhand der internationalen Forschungsergebnisse und insbesondere in Bezug auf die dazu einen Vergleich ermöglichenden Daten über Deutschland deren Bedeutsamkeit je erörtert.

1. Gesamtstrecke (jährlich/täglich/Wege) Es erfolgte bereits eine Berechnung der Emissionen verschiedener Mobilitätsgruppen nach deren Hauptverkehrsmitteln und dabei konnte eine nicht besonders deutliche Korrelation zwischen der Gesamtstrecke und den Emissionen der Gruppen gefunden werden (vgl. Tabelle 29). ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]) konnten zeigen, dass Personen die wenig mobil sind am seltensten in den Bereich der Emissionen über 2kg CO₂ fielen und die geringsten Treibhausgasemissionen hatten. Zudem ist auch auf globaler Ebene eine von der IPCC mit als wichtigste genannte Mitigationmethode die Reduktion der Verkehrsleistung insgesamt ([SIMS ET AL. 2014]). Auf der individuellen Ebene besteht jedoch ein großer Unterschied in Bezug auf Treibhausgasemissionen zwischen einem Flug zu einem 3 650 km entfernten Ziel oder den täglichen 10 km auf dem Fahrrad, auch wenn es sich dabei um die gleichen Personenkilometerzahlen handelt.

2. Entfernung zum Arbeitsplatz Die Fahrt zur Arbeit oder Ausbildung machen ca. 34% der Emissionen einer Durchschnittsperson (ohne dienstliche Fahrten) aus ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Hinzu kommt, dass diese Kategorie auch die höchsten Emissionen pro Weg bedeutete und stark durch den MIV geprägt war ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Damit ist also allein durch diesen Weg ein nennenswerter Teil des klimawirksamen Mobilitätsverhalten abgedeckt.

3. Wohnort (Stadt, Land,...) Bei der Aufteilung von Personen in verschiedene Raumtypen war grundsätzlich bei ländlicheren Räumen eine höhere tägliche durchschnittliche Emissionsmenge erkennbar ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Die GroßstädterInnen lagen im Bereich unter 4 kg CO₂, bei mittleren/ zentralen Städten sind es ca. 4,5 kg CO₂ gewesen während der dörfliche Raum sogar die 6 kg im ländlichen Raum übersteigt ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Bei diesen Emissionen war aber immer der Anteil des MIV besonders ausschlaggebend, sodass eine Überschneidung mit der PKW-Nutzung vorliegt. Der Unterschied beträgt dabei ca. 65% der niedrigsten Kategorie ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Diese Effekte wurden auch in den meisten der vorher genannten internationalen Studien gezeigt, wobei [BUECHS, SCHNEPF 2013] sogar zeigten, dass die höheren Emissionen im ländlichen Raum auch vom Einkommen unabhängig gefunden werden konnten. Auch hier war aber genau wie am Beispiel von Irland ([LYONS ET AL. 2012]) die höhere PKW-Nutzung der Grund dafür.

4. Ökonomischer Status ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]) zeigt einen durchgehend steigenden Trend der Treibhausgasemissionen über die Haushaltsstatusgruppen, wobei dies stark durch einzelne Untergruppen wie die unter 14 Jahre alten Personen verzerrt werden kann. Die Aussagen können zwar über den Durchschnitt der Gruppe getroffen werden, haben aber zum Beispiel altersabhängig sehr stark abweichen können. Zwischen den äußersten beiden der fünf Statusgruppen besteht ein Unterschied von über 100% des niedrigsten Werts ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Ein Zusammenhang mit dem Einkommen war auch beispielsweise in Großbritannien ([BRAND, BOARDMAN 2008]), Irland ([LYONS ET AL. 2012]) und Kanadas Hauptstadt ([SIDER ET AL. 2013]) der Fall.

5. Bildung Personen mit einem höheren Bildungsgrad zeigten bei einer Studie von [WADUD, CHINTAKAYALA 2019] eine geringere Bereitschaft Emissionen einzusparen. Dabei kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt häufig auch mit einem damit einhergehenden erhöhten ökonomischen Status einhergeht. Somit ist dies zwar ein messbar bedeutsamer Faktor, welcher auch von anderen AutorInnen gezeigt wurde ([WADUD, CHINTAKAYALA 2019] nach AKTER, BENNETT 2011), aber mit der vorhergehenden Kategorie zusammengefasst werden kann.

6. Freizeitmobilität Mit knapp 32% der Emissionen einer Durchschnittsperson (ohne dienstliche Fahrten) macht die Freizeitmobilität einen großen Anteil aus und besteht zu 85% aus den MIV-Emissionen ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]).

7. Einstellung/Wissen zum Klimaschutz Dazu liegen Daten vor, dass dies nicht unbedingt mit einer Verhaltensänderung einhergehen muss. So wurde trotz steigendem Bewusstsein für den Klimawandel oder sogar schlechtem Gewissen eine steigende Nutzung des Flugzeugs nachgewiesen ([FUR 2020], [BOWS-LARKIN ET AL. 2016]). Das Wissen oder sogar eine emotionale Reaktion führen also nicht direkt zu klimafreundlicherem Verhalten.

8. Geschlecht Personen, die anhand einer CO₂-Besteuerungssimulation angeben sollten, inwiefern sie bereit wären Emissionen aufzugeben waren deutlich mehr dazu bereit, wenn sie weiblich waren und dieser Effekt wurde auch schon vorhergehenden Studien gezeigt ([WADUD, CHINTAKAYALA 2019] nach DIETZ ET AL. 2002). Schätzt man anhand der Verkehrsleistung nach Geschlecht in Deutschland ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) die Emissionen ab, so ergibt sich ein Unterschied von ca. 45% zwischen den Geschlechtern im Durchschnitt (ca. 4,6 bzw. 6,7 kg CO₂-Äqu.). Männer emittieren im Personenverkehr also nennenswert mehr Treibhausgase als Frauen.

9. Vorliebe für ein Verkehrsmittel Hier liegen Daten vor, dass es für den MIV und den ÖV es einen großen Unterschied machen kann, welche Einstellung eine Person zu dem Verkehrsmittel hat, während nicht-motorisierte Verkehrsmittel von Vorlieben eher unabhängig waren ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]).

10. Nutzung eines PKW Die Emissionen aus dem MIV machen einen sehr großen Anteil in Deutschland aus und zeigten sich beim Vergleich der Gruppen verschiedener Verkehrsmodi als stark mit den Gesamtemissionen korreliert (vgl. Abschnitt 4.1). Aber gerade die Personengruppe, die täglich PKW nutzt zeigte eine fast homogene Verteilung über die drei Emissionsklassen zwischen niedrig und hoch ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Hier sollte also nicht die Häufigkeit der Nutzung, sondern die Strecke erfasst werden, um gute Aussagen machen zu können.

11. Besitz eines PKW-Führerscheins Zwischen Nutzern vieler Verkehrsmittel mit bzw. ohne Führerschein sank durch den Führerschein der Anteil der Personen im Bereich der Emissionen unter 2 kg CO₂ pro Tag von über 60% auf etwa 40%, während vor allem der Anteil der höchsten Emissionsklasse von knapp über 10% auf über 25% stieg ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]). Bei der Gruppe der ÖPNV-Orientierten zeigte sich jedoch nur ein leicht höherer Wert bei den beiden höheren Emissionsklassen wenn Personen einen PKW-Führerschein besaßen ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]).

12. Besitz eines PKW/Fahrrad/.... Haushalte mit einem PKW legen auch deutlich mehr Strecken damit zurück ([NOBIS ET AL. 2019]), was jedoch auch bedeutet, dass dies gut über die Gesamtstrecke erfasst werden kann und dann auch Car-Sharing mit einschließt. Im Fall von Großbritannien war jedoch durch den Besitz eines zweiten PKW im Haushalt noch ein deutlicher Sprung in der Zunahme der Emissionen gefunden worden ([BRAND, BOARDMAN 2008]). Zwar besaßen die deutschen Haushalte 2017 auch rund 0,9 Fahrräder pro Kopf, dennoch gab die Hälfte der Befragten an, weniger als monatlich oder sogar nie Fahrrad zu fahren und die Verkehrsleistung des Fahrrads stieg von 2002 bis 2017 mehr als vier mal so stark an wie die Anzahl der Fahrräder ([NOBIS 2019]). Der reine Besitz des Fahrrads scheint also wohl weniger aussagekräftig zu sein und mit dem Nutzungsverhalten nicht direkt im Zusammenhang zu stehen.

13. Nutzung des nicht-motorisierten Verkehrs In Bezug auf das zu Fuß gehen fanden

[NOBIS, KUHNIMHOF 2019] in allen Mobilitätstypen eine ähnliche Häufigkeit. Sowohl beim zu Fuß gehen als auch dem Radfahren zeichnete sich ein Trend in Deutschland von 2002 bis 2017 ab: die Anzahl der damit zurückgelegten Wege nahm ab, aber deren Strecke zu ([NOBIS 2019]). Das zu Fuß gehen kann bei längeren Strecken keine anderen Verkehrsmittel ersetzen, ist aber immer teilweise vorhanden und damit kein guter Indikator für die Gesamtemissionen einer Person. In Bezug auf das Fahrradfahren konnte in Abschnitt 4.1 ein stärkerer Zusammenhang gefunden werden. Dabei fahren allerdings knapp 18% der Befragten in Deutschland 2017 (fast) täglich Fahrrad, während allerdings nur knapp 5% der Gruppe der monomodalen Fahrradfahrer zugeordnet werden, welche also wenig andere Verkehrsmittel nutzen [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]. Wenn das Fahrrad allerdings nur die Nutzung des PKW ergänzt und nicht ersetzt, können weiterhin hohe Emissionen entstehen.

14.Nutzung des ÖV Hier konnte in 4.1 kein besonders starker Zusammenhang gefunden werden zwischen häufiger ÖPNV-Nutzung und den Treibhausgasemissionen der Mobilität einer einzelnen Person.

15.Nutzung des Flugverkehrs Wie bereits in vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, ist die Klimawirksamkeit bei Flugreisen hoch und kann durch einen einzigen Flug mit außer-europäischem Ziel das Treibhausgasbudget einer Person sprengen. Zudem gibt es dabei eine starke Ungleichverteilung, da beispielsweise in den USA knapp die Hälfte der Bevölkerung keinen Flug innerhalb des Jahres machte, während 12% der Erwachsenen für fast 70% der Flüge verantwortlich waren und das obere einzelne Prozent der Personen nach Flughäufigkeit knapp 50% der Passagierflugemissionen verursachte ([GÖSSLING, HUMPE 2020] nach ICCT 2019). Sowohl die Anzahl als auch die Strecke der Flüge sind also ein wichtiger Faktor um Auskünfte über die Klimawirksamkeit einer Person zu erhalten. Die Strecke sollte möglichst mit erhoben werden, da zwischen einem Flug von London nach Singapur (ca. 8 t CO₂ nach [ATMOSFAIR 2021]) oder von Frankfurt (Main) nach Hamburg (ca. 0,2 t CO₂ nach [ATMOSFAIR 2021]) sehr große Unterschiede liegen können. Gerade bei kürzeren Flügen ist aber auch die Addition der Gesamtstrecke deutlich fehlerbehafteter, als wenn Hin- und Rückflug als Einzelflüge berechnet werden (ca. 10% Fehler bei Kurzstrecke Frankfurt-Hamburg, ca. 3% bei Langstrecke London-Singapur). Hier lohnt sich also wirklich die Auflistung aller einzelnen Flüge und deren geschätzter Flugstrecke.

16.Erfassung am Stichtag Große Mobilitätsstudien wie [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] setzen auf die Erfassung der Mobilität zu einem gewissen Stichtag um über die große Stichprobe dann auf das durchschnittliche Verhalten zu schließen. Dieser Ansatz ist allerdings für das Emissionsverhalten einer Einzelperson eher weniger aussagekräftig, da der Urlaub oder andere einmalige Reisen, sowie die oft in der selben Studie gezeigten großen Verhaltensunterschiede zwischen Wochentagen und Wochenende ([NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) schlecht erfasst würden.

5.1.6 Hauptauswahl

Viele der genannten Indikatoren lassen sich verknüpfen und zusammenfassen. Dabei wurde darauf geachtet, welche Überschneidungen existieren und je die Indikatoren ausgewählt, welche eine möglichst großen Aussagekraft haben und die anderen Vorschläge gut bündelten.

i) MIV: Jährliche Strecke

(Enthält (teilweise) Indikator 1,2,3,6,10,11,12)

Diese Kategorie umfasst auch die Ursachen der Unterschiede durch Wohnort, Besitz eines Führerscheins oder die verschiedenen Wegzwecke gut. Es besteht auch oft ein enger Zusammenhang zwischen der Gesamtstrecke, die zurückgelegt wird und ob ein PKW im Haushalt vorhanden ist, da autobesitzende Haushalte eine deutlich größere Tagesstrecke und mit hohem PKW-Anteil zurücklegen ([NOBIS ET AL. 2019]). Gerade die Nutzung von PKW geht mit großen Emissionen einher (vgl. Abschnitt 4.1), wobei die alleinige Aussage „Ich fahre täglich Auto“ noch nicht dazu ausreicht klar einzuschätzen, dass eine Person hohe Emissionen hat. Ergänzt werden könnte dies durch die Zustimmung zur Aussage „Ich fahre gerne Auto“, bei welcher [SCHELEWSKY ET AL. 2020] einen hohen Zusammenhang mit den Emissionen finden konnten.

Dabei könnte nach den Abwägungen aus den vorherigen Kapiteln (Flüge: 3.3.6, PKW: 3.2.7) dieser erste Indikator vor allem durch die Erfassung des Fahrzeugtyps (Verbrennermotor/E-Auto/Hybrid) sowie des weiteren anhand der Besetzungszahl und den Verbrauchsdaten des Fahrzeugs ergänzt und genauer gemacht werden.

ii) **Anzahl und Strecke der Flüge**

Indikator 15 wird direkt weiter übernommen, da er große Anteile der persönlichen Treibhausgasemissionen abdecken kann. Für die Flugemissionen sollten etwas detaillierter die Anzahl der Flüge und deren jeweilige Strecke genutzt werden um treffende Aussagen über die Emissionen zu gewinnen. Wenn dies so detailliert nicht möglich ist, kann aber auch die alleinige Anzahl der Flüge immerhin grob abschätzen lassen, ob eine Person allein mit den Flugemissionen schon das persönliche Verkehrsbudget übertritt.

Mit diesen beiden ersten Kategorien sind bereits die Hauptemissionsursachen im Personenverkehr und bereits beispielsweise 91% der Klimawirksamkeit von Reisen in Deutschland im Jahr 2008 ([AAMAAS ET AL. 2013]) abgedeckt. Es handelt sich dabei um Größen, deren Erfassung auch Verhaltensänderungen messen lässt, wenn über mehrere Jahre die Indikatoren verglichen werden.

Dennoch kann es manchmal nützlich sein andere Faktoren zu erfassen, wenn diese direkte Berechnung nicht möglich ist. Zudem kann es manchmal auch besonders hilfreich sein eher stabile Prädispositionen für klimafreundliches bzw. klimaschädliches Verhalten zu kennen, um gezielt an diesen Gruppen mit Maßnahmen anzusetzen. Dazu wurden vor allem Faktoren ausgewählt, in denen es zu großen Unterschieden zwischen verschiedenen Gruppen oder anhand von Klassifizierungsmerkmalen kam. Ob innerhalb der Kategorien jedoch große Schwankungen vorlagen ist aufgrund der fehlenden Angaben von Standardabweichungen oder ähnlichem schlecht erhebbar gewesen.

iii) **Haushaltseinkommen**

(Enthält (teilweise) Indikator 4,5)

Da eine Verdopplung der Emissionen zwischen den Haushaltsgruppen niedrigen und hohen Einkommens vorherrscht ([SCHELEWSKY ET AL. 2020]), ist dies ein besonders aufschlussreiches Merkmal um auf die Verkehrsemissionen einer Person zu schließen, wenn dies nicht auf direktem Wege (also Punkt i und ii) erfolgen kann. Dies war auch in den internationalen Studien fast immer ein wichtiger Faktor gewesen, wobei die Grenzen der Gehaltsgruppen aufgrund verschiedener Lebensstandards nicht besonders einfach von anderen Ländern

übertragen werden können. Insgesamt werden auf globaler aber auch individueller Ebene gerade diejenigen, die finanziell gut in der Lage sind den Umstieg auf klimafreundlichere Verkehrsmittel zu stemmen, auch mehr gefordert sein.

iv) **Wohnort**

(Enthält (teilweise) Indikator 2,3)

Mit knapp 65% zwischen den äußersten Kategorien macht dieser Faktor deutlich mehr aus als das Geschlecht oder der alleinige Anteil der Pendlermobilität. Dieser relativ stabile Faktor könnte gut erfasst werden und umfasst oft auch die potentielle Strecke zur Arbeit, Ausbildung oder zum Einkaufen, da dies im sehr ländlichen Raum eher weiter entfernt und schlechter mit dem ÖPNV erreichbar liegt. Nebst dem Einkommen war dies die beinahe alle im entsprechenden Abschnitt von 5.1.3 behandelten Studien einende Kategorie und auch als vom Gehalt unabhängig relevant bezeichnet worden.

Knapp in Fragen zusammengefasst sind die Indikatoren also sehr einfach und übersichtlich:

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Wie viele Kilometer sind Sie mit dem Auto gefahren?- Welche Flugreisen (Anzahl, je Distanz) haben Sie unternommen? |
|---|

Als „Proxies“, also Indikatoren die indirekt eine Aussage über die Emissionen ermöglichen, werden folgende zwei Fragen ergänzt:

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Wie viel verdienen Sie/ Ihr Haushalt?- Wo wohnen Sie? |
|--|

5.2 Punktesystem - mathematischer Ansatz

Neben den beispielsweise über einfache Fragen erfassbaren Informationen, wie sie anhand des lexikalischen Ansatzes ermittelt wurden, ist es denkbar, eine Art mathematisches Punktesystem zu verwenden, anhand dessen erkennbar wird, wie viel eine Mobilitätsentscheidung von dem zur Verfügung stehenden Budget beansprucht. Dazu wird für das jährliche Emissionsbudget die Gesamtzahl der Emissionen in eine Gesamtpunktzahl von 100 Punkten unterteilt, welche auf verschiedene Mobilitätsarten verteilt werden können. Im Fall des Jahres 2021 bedeutet dies bei einem Gesamtbudget von 1,366 t CO₂-Äqu. für den Personenverkehr, dass ein Punkt 13,66 kg CO₂-Äqu. entspricht. Dies verbindet die vorhergehenden Kapitel zur Berechnung der Emissionen verschiedener Verkehrsmittel und setzt sie in den Kontext des jeweils jährlich zustehenden Emissionsbudgets.

Mobilitätsbudget als Punktesystem - Ergebnisse Für die verschiedenen Verkehrsmittel kann damit umgerechnet werden, wie viele Punkte 100 km mit dem Fahrzeug entsprechen. Dazu werden die Emissionsfaktoren mit den Angaben pro Personenkilometer mit 100 multipliziert und durch die Angabe der Emissionen pro Punkt geteilt. Flugzeuge werden danach getrennt betrachtet. Für die PKW wurden wieder die Durchschnittswerte des Verbrauchs eines Mittelklassewagens pro 100 km nach [WIETSCHEL ET AL. 2019] (nach HELMS ET AL. 2016, ADAC 2018, Benzin: 7,6 Liter, Diesel: 5,7 Liter, E-Auto: 17,3 kWh), bzw. für den Hybrid nach [HELMS ET AL. 2016] (außerorts, Hybrid der Kompaktklasse mit 50 km el. Reichweite: 21,1 kWh, 5,5 Liter Benzin; 75% der Strecke mit el. Antrieb) verwendet, für den ÖV und ÖPNV wieder die vorher berechneten Durchschnittswerte einer Mischnutzung (Tabelle 22).

Als Besetzungszahl der PKW wurde wieder 1,45 angesetzt ([SCHULZ ET AL 2020]).

Verkehrsmittel	2021	2022	2023	2024	2025
PKW (Benzin)	1,355	1,410	1,469	1,533	1,602
PKW (Diesel)	1,200	1,249	1,301	1,357	1,418
PKW (Hybrid)	0,994	1,034	1,078	1,124	1,175
PKW (E-Auto)	0,822	0,856	0,892	0,930	0,972
Motorrad	0,776	0,807	0,841	0,877	0,917
ÖV	0,436	0,454	0,473	0,493	0,516
ÖPNV	0,476	0,495	0,516	0,538	0,562
Bahn (Fern)	0,339	0,353	0,368	0,383	0,401
Bus (Fern)	0,212	0,221	0,230	0,240	0,251
Fahrrad	0,066	0,069	0,071	0,075	0,078
Pedelec	0,110	0,114	0,119	0,124	0,130
Fähre	1,025	1,066	1,111	1,159	1,211

Tab. 44: Punktesystem: Klimawirksamkeit der Verkehrsmittel bezogen auf das persönliche Mobilitätsbudget in Punkten pro 100 km

Für die verschiedenen Verkehrsmittel lässt sich allein anhand der verbrauchten Punkte pro 100 km schon leicht die Klimawirksamkeit vergleichen und das wird zudem gleich in den Kontext des Budgets gesetzt (vgl. Abb. 32). Bei den Flugzeugen werden für die Distanzklassen auch unterschiedliche Emissionsfaktoren angesetzt, sodass hier eine Berechnung für verschiedene mögliche Strecken statt findet (die Besetzungszahlen nach [ATMOSFAIR 2016] wurden mit verwendet). Berechnet wurde wie in Abschnitt 3.3.6 angegeben, wobei ab 625 km Strecke angenommen wurde, dass es sich um einen internationalen Flug handelt.

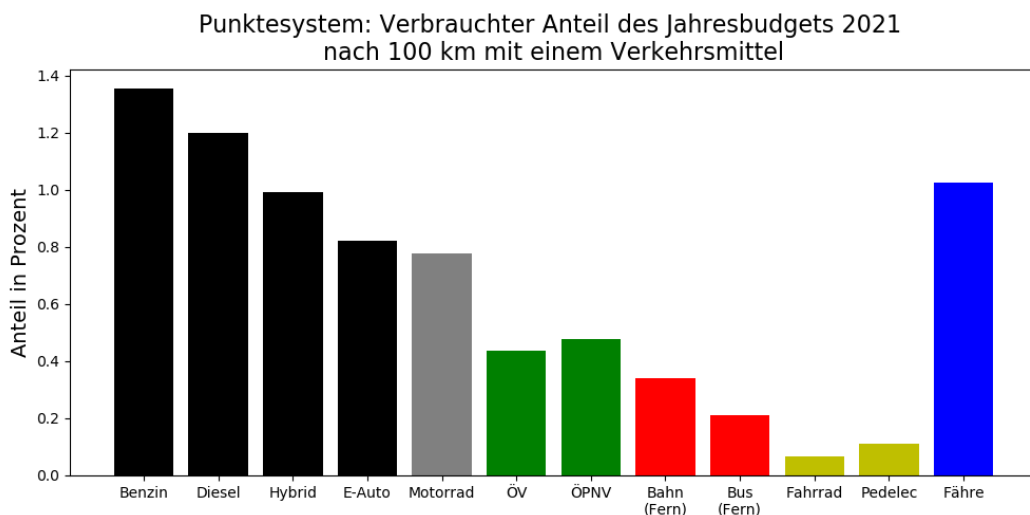


Abb. 32: Punktesystem: Vergleich des aufgebrauchten Mobilitätsbudgetanteils nach 100 km mit einem Verkehrsmittel

Flugstrecke	2021	2022	2023	2024	2025
0-125 km	5,245	5,457	5,686	5,931	6,198
126-250 km	4,371	4,547	4,739	4,943	5,165
251-375 km	3,329	3,463	3,609	3,764	3,933
376-500 km	2,274	2,366	2,466	2,572	2,687
501-625 km	2,438	2,537	2,643	2,757	2,881
626-750 km	2,068	2,152	2,242	2,339	2,444
751-1000 km	2,199	2,288	2,384	2,487	2,599
ab 1001 km	1,674	1,742	1,815	1,893	1,978

Tab. 45: Punktesystem: Klimawirksamkeit von Flugzeugen nach Distanzklassen bezogen auf das persönliche Mobilitätsbudget in Punkten pro 100 km

Diese Aufteilung in die Distanzkategorien erschwert es jedoch Rückschlüsse bei einer bereits vorhandenen Punktzahl zu schließen. Um die Rechnung mit den Daten zu erleichtern, kann je durch die Mittelpunkte der Distanzklassen und der je zugeordneten Punktzahl pro 100 km eine Fitfunktion gelegt werden.

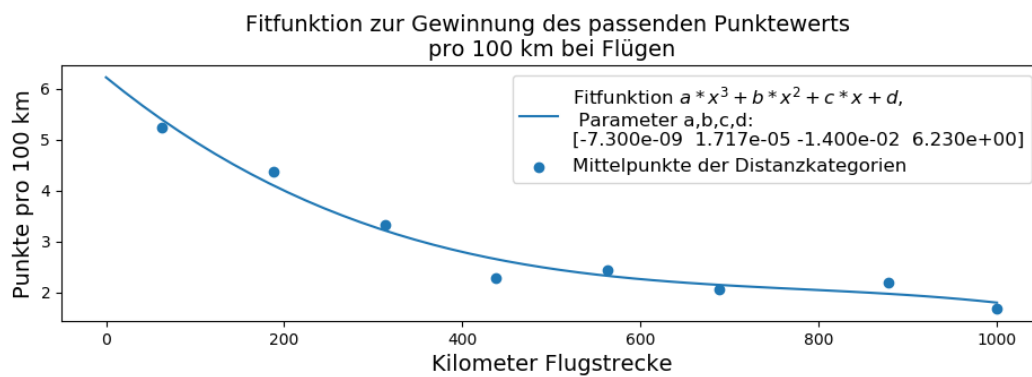


Abb. 33: Fitfunktion zur Bestimmung der Punkte pro 100 km je nach Flugstrecke (Stand 2021), eigene Darstellung

Verwendet wurde dazu die Funktion $f(x) = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d$ (mit der Distanz x). Multipliziert man nun diese Funktion mit der Flugstrecke ($f(x) * x$), so erhält man eine Funktion, mit welcher direkte Schlüsse von einer Punktzahl auf die Flugstrecke und zurück gezogen werden kann. Ab 1000 km Strecke wird immer der unterste Wert aus Tabelle 45 verwendet.

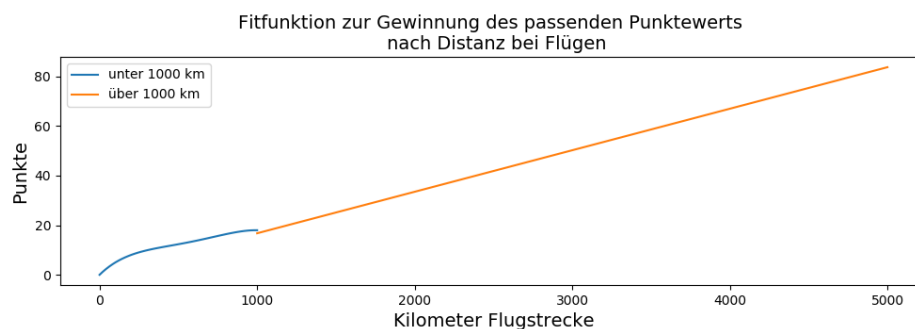


Abb. 34: Bestimmung des funktionellen Zusammenhangs zwischen Punkten und Flugstrecke (Stand 2021), eigene Darstellung

Die Punktzahl entspricht auch immer einer bestimmten Emissionsmenge, welche also ebenfalls berechnet werden kann. Diese Berechnung ermöglicht also eine stetige Kurve im Bereich von unter 1000 km durch die Fitfunktion und ab 1000 km (bzw. 18 Punkten) durch den Tabellenwert zu erzeugen. Dabei wird die Genauigkeit eingeschränkt, da durch die Erzeugung der angepassten Funktion ein Fehler entsteht. Es musste bezüglich der Art der Funktion auch eine Annahme getroffen werden, welche eine große Genauigkeit ermöglichte.

Diese Funktion lässt sich nicht analytisch nach der Distanz auflösen, sodass hier nun noch numerische Lösungen (also durch das punktuelle Ablesen aus der Kurve) erhoben wurden, welche anhand einer gegebenen Punktzahl die Flugdistanz rückwirkend finden lassen. Dabei wurde angenommen, dass Flüge unter 100 km nicht genutzt werden. Deswegen fängt die Berechnung erst mit 5 Punkten an. Zudem wurde je auf 10 km gerundet, da hier mit dieser Methodik keine höhere Genauigkeit erwartet werden sollte.

Punkte	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Distanz (km)	100	130	160	200	250	310	390	480	560	640	710	780	860	990

Tab. 46: Numerische Wertetabelle für Flugberechnung

Ab 18 Punkten kann dann über den Emissionsfaktor für Strecken über 1000 km aus Tabelle 45 die Strecke berechnet werden. Die Berechnung kann auch als Code unter Abschnitt 7.4 eingesehen werden.

Gesamtenergiebudget als Punktesystem - Ergebnisse Statt nur die Mobilitätsemissionen allein in den Kontext deren eigenen Budgets zu setzen, kann stattdessen auch das Gesamtbudget verwendet werden und damit individuell entschieden werden, wie die maximal verfügbaren Treibhausgasemissionen nach eigener Priorität eingesetzt werden.

Verkehrsmittel	2021	2022	2023	2024	2025
PKW (Benzin)	0,319	0,334	0,351	0,369	0,388
PKW (Diesel)	0,282	0,296	0,311	0,327	0,344
PKW (Hybrid)	0,234	0,245	0,258	0,271	0,285
PKW (E-Auto)	0,193	0,203	0,213	0,224	0,236
Motorrad	0,182	0,191	0,201	0,211	0,222
ÖV	0,103	0,108	0,113	0,119	0,125
ÖPNV	0,112	0,117	0,123	0,130	0,136
Bahn (Fern)	0,080	0,084	0,088	0,092	0,097
Bus (Fern)	0,050	0,052	0,055	0,058	0,061
Fahrrad	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019
Pedelec	0,026	0,027	0,028	0,030	0,031
Fähre	0,241	0,253	0,266	0,279	0,294

Tab. 47: Punktesystem: Klimawirksamkeit der Verkehrsmittel in Punkten des Gesamtbudgets (B2DS) pro 100 km

Deswegen wurde das B2DS-EU-Gesamtbudget nun in 100 Punkte eingeteilt und somit für die verschiedenen Verkehrsmittel genau wie im vorherigen Abschnitt berechnet, wie viele

Punkte je für 100 km pro Person damit verbraucht werden. Dabei muss beachtet werden, dass das B2DS-Budget nicht alle Sektoren umfasst, sondern nur die Energiewirtschaft, Verkehr, Bauwirtschaft und Industrie berücksichtigt. Das Gesamtbudget einer Person ist hier also nicht auf alle Lebenssituationen übertragbar, da hier die Landwirtschaft zu teilen nicht mit eingerechnet wird. Die Werte sind hier deutlich kleiner, da das Gesamtbudget deutlich größer ist als das Mobilitätsbudget und somit die gleiche Emissionsmenge einen geringeren Anteil des Gesamten ausmacht. Für die Flüge wurden wieder die verschiedenen Streckenkategorien und auch die entsprechenden Besetzungszahlen verwendet.

Flugstrecke	2021	2022	2023	2024	2025
0-125 km	1,233	1,294	1,359	1,429	1,503
126-250 km	1,028	1,078	1,133	1,191	1,252
251-375 km	0,783	0,821	0,863	0,907	0,954
376-500 km	0,535	0,561	0,589	0,619	0,652
501-625 km	0,573	0,602	0,632	0,664	0,699
626-750 km	0,486	0,510	0,536	0,563	0,593
751-1000 km	0,517	0,543	0,570	0,599	0,630
ab 1001 km	0,394	0,413	0,434	0,456	0,480

Tab. 48: Punktesystem: Klimawirksamkeit von Flugzeugen nach Distanzklassen in Punkten des Gesamtbudgets (B2DS) pro 100 km

5.3 Diskussion der Indikatorenansätze

Die in Abschnitt 5.1.6 beiden ersten ausgewählten Indikatoren beinhalten eine Erfassung der tatsächlichen Mobilitätsdaten, allerdings nur in Bezug auf die beiden in Deutschland auf individueller Ebene emissionsrelevantesten Verkehrsmittel, nämlich das Auto und das Flugzeug. Auf der wissenschaftlichen Ebene sind die dabei berechneten Emissionswerte in CO₂-Äqu. gut mit anderen Sektoren vergleichbar und ermöglichen eine gute Einschätzung der Klimawirksamkeit. Auf der individuellen Ebene, gerade bei Personen ohne akademischen Hintergrund ist diese Größe jedoch eine Zahl ohne großen Alltagsbezug oder Kontext und ist somit weder besonders zu einer Verhaltensänderung motivierend, noch besonders verständlich. Auch wenig motivierend und in manchen Fällen sicher auch sehr fehlerbehaftet sind die beiden weiteren Indikatoren, welche sich nicht auf das Verhalten, sondern das Einkommen und den Wohnort beziehen. Gerade der Proxy Einkommen geht aber langfristig auch mit deutlich mehr Möglichkeiten einher, sich selbst teurere, aber klimafreundlichere Transportmittel leisten zu können.

Gerade im Kontrast zu den Angaben in CO₂-Äqu. kann eine verbildliche Darstellung anhand einer Gesamtmenge jährlicher Budgetpunkte Abhilfe schaffen. Mit dem Punktesystem ist eine Art Indikator gegeben, wie viel des Budgets mit der Nutzung eines Verkehrsmittels bereits aufgebraucht wird und es bietet so einen Vergleichswert zwischen den Mobilitätsarten. Dies könnte dann nützlich sein, wenn Personen mit einem Berechnungstool die Zusammensetzung ihres Budgets berechnen und anpassen möchten oder könnte bei der digitalen Erfassung zurückgelegter Strecken (z.B. per App und GPS auf dem Smartphone) direkt anzeigen, wie viel des Budgets die Person noch übrig hat. Das schafft eine hohe Transparenz, da individuell eine direkte Rückmeldung erhalten werden kann, welche Auswirkungen eine Entscheidung

auf das persönliche Budget hat und eine hohe Übersichtlichkeit besteht. Zudem kann jenseits der Umrechnung von Zahlenwerten auch erfasst werden, welche relative Priorität Personen der Nutzung der verschiedenen Verkehrsmittel zuschreiben. Es kann dadurch jenseits der tatsächlichen Zahlenwerte auch innerhalb eines solchen Punktebudgets überlegt werden, wie wichtig einem beispielsweise das Fahren eines Autos ist und welchen persönlichen Stellenwert es für eine Person einnimmt.

Auch hier kann der Vergleich mit anderen Sektoren gut gelingen, indem sogar ein sektorenübergreifendes Punktesystem verwendet wird, das beispielsweise die Auswirkungen der Ernährungsweise und des Transports vergleichen lässt. Dies vereint die Vorteile der Angaben der direkten Emissionswerte, welche eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Sektoren ermöglichen und der Transparenz und Verständlichkeit des Punktesystems. Leider konnte hier jedoch nur auf die innerhalb des Berichts der [IEA 2017, 1] verwendeten Sektoren zurückgegriffen werden, was nicht alle Bereiche und Emissionen umfasst. Zudem muss auch hier die Information verfügbar sein, welche Strecken je Verkehrsmittel zurück gelegt wurden, was einen Aufwand gegenüber beispielsweise den „Proxies“ wie dem Wohnort bedeutet. Schlussendlich bedeuten beide Punktesysteme, dass eine Alltagserfahrung vieler Personen, nämlich das Haushalten mit einem begrenzten finanziellen Budget und verschiedenen Entscheidungen, ob und wie viel Geld ausgegeben wird, sich so auch auf den Klimaschutz übertragen lässt. Es lässt erfahrbar machen, dass nicht nur die eigenen finanziellen Mittel begrenzt sind, sondern auch die noch innerhalb des Pariser Klimaschutzabkommens möglichen Treibhausgasemissionen eine Begrenzung haben.

6 Fazit und Ausblick

Innerhalb dieser Arbeit konnte ein **Budget** der Treibhausgasemissionen für den Personenverkehr berechnet werden. Dazu wurde nach Daten der [IEA 2017, 1] eine Gleichverteilung auf EU-Ebene berechnet und der Anteil für den individuell wählbaren Anteil des Transports berechnet. Dabei lag der Vorteil dieses Budgets auch darin, dass es Emissionen beispielsweise der Energiebereitstellung mit beinhaltet, also auch Emissionen umfasst, welche jenseits der reinen Abgasemissionen aus dem Verbrennermotor entstehen. Dies ist deswegen hier so wichtig, weil es für mobile Personen eine maximale Transparenz ermöglicht, welche klimatische Auswirkungen deren Mobilitätsverhalten insgesamt hat. Klar wurde dabei auch, dass die Klimagesetzgebung mit Stand 2019 in Deutschland deutlich zu kurz greift und bereits in den nächsten 10 Jahren so viele Treibhausgasemissionen vorsieht, dass danach das Einhalten eines Budgets, wie es für die Pariser Klimaziele nötig wäre, kaum mehr erfolgen kann. Das wurde auch in einem Beschluss des Verfassungsgerichts nach einer Verfassungsbeschwerde von Klimaschützenden so festgehalten. Dort heißt es „ *Ein umfangreicher Verbrauch des CO₂-Budgets schon bis 2030 verschärft jedoch das Risiko schwerwiegender Freiheitseinbußen, weil damit die Zeitspanne für technische und soziale Entwicklungen knapper wird (...)*“ ([BVerfG 2021], Abschnitt III 1.). Das bestätigt, wie wichtig das Einhalten von Budgets, wie es hier beispielhaft berechnet wurde, ist, um in den folgenden Jahrzehnten einen guten Übergang zur Klimaneutralität zu schaffen. Die Änderungen des Gesetzes, welche im Mai 2021 erfolgten sorgten für eine Nachbesserung, welche jedoch immer noch nicht mit dem Pariser Klimaziel kompatibel ist. Es besteht also weiterhin noch Bedarf für strengere Grenzwerte, was eventuell in der nächsten Legislaturperiode dann erfolgen könnte. Nur

dann, wenn das Treibhausgasbudget Deutschlands noch deutlich nach unten korrigiert würde, könnte dies dann die B2DS-Rechnung, wie sie in dieser Arbeit vorgeschlagen wurde, ersetzen.

Dabei muss einschränkend auch zu den anderen hier berechneten Budgets gesagt werden, dass sich die Datenlage immer wieder noch verändert, da weiter über Budgets hinaus Treibhausgase emittiert wurden, aber auch seitens der Forschung noch mehr Erkenntnisse zu erwarten sind. In Zukunft sollte die Rechnung dieser Arbeit an neuere Daten der KlimawissenschaftlerInnen und ModelliererInnen angepasst werden, welche dann auch auf dem aktuelleren Stand der schon geschehenen Treibhausgasemissionen basieren können.

Anhand verschiedener Mobilitätsprofile konnte gezeigt werden, dass die Häufigkeit und der Streckenumfang der Mobilität wie sie in Deutschland für viele zum Alltag gehören innerhalb dieses Budgets möglich sind, aber nur durch einen Umstieg auf andere **Verkehrsmodi** machbar bleiben. Autos, insbesondere mit Verbrennermotoren müssen einen deutlich geringeren Anteil der Verkehrsleistung einnehmen, aber auch die elektrifizierte Variante des Individualverkehrs kann nicht unbegrenzt eingesetzt werden. Gerade Schienenfahrzeuge könnten durch die voranschreitende Elektrifizierung für viele Personen deren Mobilitätsbedürfnisse vollkommen erfüllen. In Hinblick auf Reisen mit langen Strecken, auf denen Flugzeuge alternativlos sind, gibt es bis jetzt keine Lösung innerhalb des Budgets. Denkbar wäre darum das Aufsparen von Emissionen in vorherigen oder folgenden Jahren durch ein Verhalten deutlich unter der Budgetgrenze.

Es ist anhand von Mobilitätsstudien der letzten Jahre ersichtlich, dass das durchschnittliche Mobilitätsverhalten der Deutschen noch nicht mit den Treibhausgasbudgets vereinbar ist. Mit den hier theoretisch berechneten **Mobilitätsprofilen** konnten beispielhafte Verhaltensmuster im Einklang mit den Pariser Klimazielen erstellt werden. Interessant kann dabei sein, welche dieser Varianten für die meisten Personen denkbar ist und welche bisherigen Verhaltensmuster nur schwer abgelegt werden können. Im fünften IPCC-Bericht sagten die AutorInnen dazu: „how and when people will choose to use new types of low-carbon transport and avoid making unnecessary journeys is unknown“ ([SIMS ET AL. 2014]). Dies bleibt eine entscheidende Frage, deren Antwort der Schlüssel zu einer klimafreundlicheren Mobilität sein kann.

Die zum Schluss aufgestellten **Indikatoren** verdeutlichen, dass für den Personenverkehr in Deutschland vor allem zwei Bereiche besonders beachtet werden müssen: PKW (insbesondere mit Verbrennungsmotoren) und Flüge. Viele andere Faktoren, welche mit einem besonders hohen oder niedrigen Emissionsverhalten zusammenhängen lassen sich schlussendlich auf diese beiden Bereiche zurückführen. Auf der individuellen Ebene kann mit einem Punktesystem das persönliche Emissionsbudget ein einfach verständliches und mit Hilfe technischer Lösungen vielleicht sogar sehr alltagstaugliches Mittel geschaffen werden, das jede klimarelevante Einzelentscheidung in den Kontext einer Art knappen Ressource der Treibhausgasemissionen setzen lässt. Eine geographische Perspektive bringt dabei der Indikator „Wohnort“ ein und zeigt auf, dass der Zugang zu klimafreundlicher Mobilität aktuell noch für viele eine Standortfrage ist. An dieser Stelle kann politisch durch die Förderung des ÖVs im ländlichen Raum angesetzt werden. Der zudem relevante Faktor, ob Personen hohe Mobilitätsemissionen verursachen, ist das zur Verfügung stehende Einkommen. Auf globaler Ebene haben reichere

Länder oft schon in der Vergangenheit den Großteil der Treibhausgase emittiert, aber auch innerhalb eines Landes wie Deutschland sind Personen mit mehr Geld auch häufig weniger klimafreundlich unterwegs. Dabei wird die Frage nach dem Erreichen der Klimaziele auch schnell eine Gerechtigkeitsfrage, die gerade auch diejenigen fordert, welche finanziell gut gestellt sind.

Insgesamt ist Deutschland im Mobilitätssektor bei aktuell noch hohen Emissionen in den nächsten Jahren stark gefordert, aber ein Umdenken und der Wandel schlussendlich zur Klimaneutralität ist möglich. Das zeigten viele Studien und auch hier wurde es anhand der Budgets in umsetzbares Verhalten übersetzt.

7 Anhang

7.1 Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach RCP 2.6

Listing 1: Code mit Python 3.6 erstellt

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from scipy.optimize import curve_fit

#Daten aus Destatis 2019:
xDEBev=np.linspace(2019, 2060, 42)
DEBev=np.array([ ])
#Daten aus UN 2019:
xGlobBev=np.linspace(2020, 2100, 81)
GlobBev=np.array([])
Glob2=GlobBev[0:42]
#gibt jeweils
    den Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung an:
Anteil=DEBev/Glob2

#RCP3PD (bzw. RCP 2.6) in Gigatonnen (CO2)
#Einlesen der Daten aus Meinshausen et al 2011 Datensatz:
Jahre= np.array(pd.read_excel('C:/...RCP3.xls', header
    = None, skiprows=293, usecols=(0)).fillna(0).values.reshape(-1))
E1= np.array(pd.read_excel('C:/...RCP3.xls', header
    = None, skiprows=293, usecols=(1)).fillna(0).values.reshape(-1))
E2= np.array(pd.read_excel('C:/...RCP3.xls', header
    = None, skiprows=293, usecols=(2)).fillna(0).values.reshape(-1))
Emiss=E1+E2
#Umrechnung der zwei größten Emissionsanteile nach Myhre et al. 2013:
#Methan, Umrechnung GWP100
    nach AR5 der IPCC (Hier Faktor für allg. Methan, nicht fossiles)
Me=28*0.001*np.array(pd.read_excel('C:/...RCP3.xls', header
    = None, skiprows=293, usecols=(3)).fillna(0).values.reshape(-1))
#N2O, Umrechnung nach AR5 der IPCC
N2O=265*0.001*np.array(pd.read_excel('C:/...RCP3.xls', header
    = None, skiprows=293, usecols=(4)).fillna(0).values.reshape(-1))
```

```

EmissGes=Emiss+Me+N2O

#Berechnung der kumulierten Emissionen:
Kum=np.sum(Emiss[0:41]*Anteil[1:])
KumGes=np.sum(EmissGes[0:41]*Anteil[1:])
print
    ("2021_bis_2060_verfügbare_Emissionen_in_Gigatonnen_CO2Äqu.", KumGes)

#Emissionsbudget für a Jahre nach 2020:
a=3
print((1000000*Emiss[0:41]/Glob2[1:])[a])
print((1000000*EmissGes[0:41]/Glob2[1:])[a])

#lineare Kurve der Verkehrsanteile der Emissionen
#nach SRU2020: 2018: 18 Prozent, 2050: 0 Prozent (32a)
def f(x):
    return 0.01*(1153.125-0.5625*x)

#Verkehrsemissionsbudget für a Jahre nach 2020:
a=0
print((1000000*f(xDEBev[1:])*Emiss[0:41]/Glob2[1:])[a])
print(np.array((1000000*f(xDEBev[1:])*EmissGes[0:41]/Glob2[1:]))[a])

#Daten von Schelewsky
    et al. 2020 zum Anteil des "dienstlichen" Verkehrs an den Emissionen:
Jahree=np.array([2002,2008,2017])
Anteile=np.array([0.886,0.824,0.744])

def f2(x,a,b):
    return a*x+b
popt, pcov= curve_fit(f2, Jahree, Anteile)

year=np.array(xDEBev[1:])
data1=np.array
    (f2(xDEBev[1:], *popt)*f(xDEBev[1:])*1000000*EmissGes[0:41]/Glob2[1:])
data2=np.array
    (f2(xDEBev[1:], *popt)*f(xDEBev[1:])*1000000*Emiss[0:41]/Glob2[1:])

```

7.2 Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach B2DS

Listing 2: Code mit Python 3.6 erstellt

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.stats import chisquare

Jahr=np.array([2014,2025,2030,2035,2040,2045,2050,2055,2060])

#Emissionen nur aus Personenverkehr in Megatonnen nach IEA2017
#berechnet, indem die Emissionen eines jeden
    Sektors i mit dem Bruch aus Energieverbrauch des Personenverkehrs

```

```

#geteilt
    durch den Gesamtenergieverbrauch des Verkehrs multipliziert werden
Transport=np.array([9494,8793,7942,6771,5450,4520,3125,2128,1568])

#Quadratische Fitfunktion durch die Werte aus IEA 2017
def f2(x,a,b,c,d):
    return a*x**3+b*x**2+c*x+d
popt2, pcov2= curve_fit(f2,Jahr, Transport)
chii=chisquare(Transport, f_exp=f2(Jahr, *popt2), ddof=4)
print(chii)
print("Fitparameter
      : a=",popt2[0], "b=", popt2[1], "c=", popt2[2], "d=", popt2[3])
print("Standardabweichung der Fitparameter",np.sqrt(np.diag(pcov2)))

#Daten aus UN 2019 (Faktor 1000 beachten bei absoluten Werten):
xGlobBev=np.linspace(2020, 2100, 81)
GlobBev=np.array([ ])

#Zeitraum eingrenzen auf 2021 bis 2060:
y=np.linspace(2021,2060,40)
Bev=GlobBev[1:41]

print(y[10:21], np.round(((1000*f2(y, *popt2)/Bev)[10:21],3))
#%%%
#EU-Ebene
Jahr=np.array([2014,2025,2030,2035,2040,2045,2050,2055,2060])
EUTransp=np.array
    ([ 768, 528, 402,          288,    198,    116,    59,    20,    11])

def f3(x,a,b,c,d):
    return a*x**3+b*x**2+c*x+d
popt3, pcov3= curve_fit(f3,Jahr, EUTransp)
print("Fitparameter
      : a=",popt3[0], "b=", popt3[1], "c=", popt3[2], "d=", popt3[3])
print("Standardabweichung der Fitparameter",np.sqrt(np.diag(pcov3)))

#Daten aus Eurostat:
EUBev=np.array([ ])
y=np.linspace(2021,2060,40)
#%%%
a=10
b=20
print(y[a:b], np.round(((1000000*f3(y, *popt3)/EUBev)[a:b],3))

```

7.3 Python-Code zur Berechnung der Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach Klimaschutzplan 2050

Listing 3: Code mit Python 3.6 erstellt

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

```

```

#Bevölkerungsprognose Deutschland aus Destatis 2019:
xDEBev=np.linspace(2020, 2050, 31)
DEBev=1000*np.array([  ])[0:32]

#Bevölkerungsdaten Vergangenheit: (Daten von Destatis 2020)
x=np.array([2015,2016,2017,2018])
y=np.array([81197537, 82175684, 82521653, 82792351])

#Nach https://www.umweltbundesamt
.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands (UBA 2021, 2)
#Emissionsprognose (nur Verkehr):
Emiss=1000000*np.array([150, 145,
139, 134, 128.0, 123.0, 117.0, 112.0, 106.0, 101.0,95.0])
Bev=DEBev[0:len(Emiss)]
Jahr=xDEBev[0:len(Emiss)]
#Vergangenheit (auch UBA 2021, 2) (nur Verkehr):
EmVerg=1000000*np.array([161.8,165.2,167.9,162.3])
#Neue Daten ab 2021, BMU2021
Emiss2=1000000*np.array([150,145,139,134,128,123,117,112,105,96,85])

#%%
#Daten von Schelewsky
et al. 2020 zum Anteil des "dienstlichen" Verkehrs an den Emissionen:
Jahre=np.array([2002,2008,2017])
Anteil=np.array([0.886,0.824,0.744])
def f(x,a,b):
    return a*x+b
popt, pcov= curve_fit(f,Jahre, Anteil)

#%%
array=np.array([Jahr, f(Jahr, *popt)*Emiss/Bev])
np.savetxt("C:/Users/.../Data.csv", array, delimiter = ",",newline='\n
', header='Jahr, Personentransport in CO2 nach Klimaplan Stand 2019')
array=np.array([Jahr, f(Jahr, *popt)*Emiss2/Bev])
np.savetxt("C:/Users/.../Data2.csv", array, delimiter = ",",newline='\n
', header='Jahr, Personentransport in CO2 nach Klimaplan Stand 2021')

```

7.4 Python-Code zur Berechnung der Funktion zwischen Flugdistanz und Punktwert sowie numerische Auswertung

Listing 4: Code mit Python 3.6 erstellt

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
#x entspricht der Mittelpunkte
der Distanzklassen, y den entsprechenden Punkten pro 100km
x=np.array([63,188,313,438,563,688,878, 1000])
y=np.array([5.245,4.371,3.329,2.274,2.438,2.068,2.199,1.674])
#Fitfunktion erstellen:
def f2(x,a,b,c,d):
    return a*x**3+b*x**2+c*x+d

```



```

popt2, pcov2= curve_fit(f2,x, y)
xlin=np.linspace(0,1000)
popt2b=np.array([np.round(popt2[0],10)
, np.round(popt2[1],8), np.round(popt2[2],3), np.round(popt2[3],2)])
plt.plot(xlin, f2(xlin, *popt2), label=
"Fitfunktion  $a*x^3+b*x^2+c*x+d$ , \n Parameter a,b,c,d:\n"+str(popt2b))
print(*popt2)
#%%
xlin2=np.linspace(1000,5000)
#multiplizieren mit Distanz um Punkte über Distanz zu erhalten
z=f2(xlin, *popt2)*xlin/100
plt.plot(xlin, z, label="unter 1000 km")
plt.plot(xlin2, xlin2*1.674/100, label="über 1000 km")
#%%
from scipy.optimize import fsolve
#Iterationsschritte (nur teils erforderlich):
xi = np.arange(1, 2, 0.05)
def y(x):
    return (popt2[0]*x**4+0.00001717*x**3-0.0143*x**2+6.227*x)/100
#Punktzahl nach der gelöst werden soll definieren als P:
P=10
def y2(x):
    return (x/x)*P
def findIntersection(f1, f2, x0):
    return fsolve(lambda x : f1(x) - f2(x), x0)
Distanz = []
for x in xi:
    Distanz.append(float(findIntersection(y,y2,x)))
print(Distanz)

```

7.5 Ergebnisse Emissionsbudgets pro Kopf und für Personenverkehr nach RCP 2.6, B2DS und Klimaschutzplan 2050

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Klimaschutz DE 2019 (t CO ₂)	1,224	1,157	1,099	1,035	0,981	0,920	0,869	0,812	0,764	0,709
Klimaschutz DE 2021 (t CO ₂)	1,224	1,157	1,099	1,035	0,981	0,920	0,869	0,804	0,726	0,634
RCP 2.6 (t CO ₂ -Äqu)	0,276	0,257	0,238	0,220	0,204	0,188	0,173	0,159	0,146	0,133
RCP 2.6 (t CO ₂ .)	0,145	0,134	0,123	0,113	0,103	0,095	0,086	0,078	0,071	0,064
B2DS (Welt gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
B2DS (EU gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Klimaschutz DE 2019 (t CO ₂) ¹										
Klimaschutz DE 2021 (t CO ₂) ¹										
RCP 2.6 (t CO ₂ -Äqu)	0,121	0,110	0,099	0,090	0,080	0,072	0,063	0,056	0,049	0,042
RCP 2.6 (t CO ₂ .)	0,058	0,051	0,045	0,040	0,035	0,030	0,023	0,023	0,019	0,016
B2DS (Welt gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
B2DS (EU gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tab. 49: Jährliche Emissionsbudget, Berechnung und Datengrundlage siehe 7.1, 7.3, 2.2, 2.4

¹: Für den Klimaschutzplan 2050 wurden von der Bundesregierung in [BMU 2019, 1] nur bis 2030 konkretere Angaben gemacht. Quellen: RCP: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [SRU 2020]

B2DS: [IEA 2017, 1], [UN 2019]

Klimaschutzplan: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

7.6 Ergebnisse gesamtes Emissionsbudgets pro Kopf nach RCP 2.6, B2DS und Klimaschutzplan 2050

B2DS umfasst dabei die Sektoren Energie, Gebäude, Industrie und Transport ([IEA 2017, 1]), der deutsche Klimaschutzplan zudem die Bereiche Landwirtschaft und Abfallwirtschaft

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Klimaschutz DE 2019 (t CO ₂)	9,420	9,068	8,744	8,425	8,109	7,785	7,463	7,156	6,851	6,535
Klimaschutz DE 2021 (t CO ₂)	9,138	9,044	8,611	8,147	87,686	7,2165	6,761	6,2726	5,783	5,272
RCP 2.6 (t CO ₂ -Äqu)	2,402	2,343	2,285	2,228	2,172	2,118	2,065	2,013	1,962	1,912
RCP 2.6 (t CO ₂)	1,261	1,220	1,180	1,141	1,102	1,065	1,028	0,992	0,957	0,922
B2DS (Welt gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
B2DS (EU gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Klimaschutz DE 2019 (t CO ₂)										
Klimaschutz DE 2021 (t CO ₂)	4,982	4,541	4,249	3,956	3,510	3,214	2,917	2,612	2,163	1,860
RCP 2.6 (t CO ₂ -Äqu)	1,860	1,808	1,757	1,708	1,659	1,611	1,565	1,518	1,473	1,429
RCP 2.6 (t CO ₂ .)	0,881	0,841	0,801	0,763	0,724	0,687	0,650	0,614	0,578	0,543
B2DS (Welt gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
B2DS (EU gemittelt)(t CO ₂ .)	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tab. 50: Jährliche Emissionsbudget, Berechnung und Datengrundlage siehe 7.1, 7.3, 2.2, 2.4

Quellen:

RCP: [MEINSHAUSEN ET AL. 2011], [UN 2019], [SRU 2020]

B2DS: [IEA 2017, 1], [UN 2019]

Klimaschutzplan Deutschland: [DESTATIS 2019], [DESTATIS 2020], [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2],[BMU 2021], [SCHELEWSKY ET AL. 2020]

7.7 Berechnung der Emissionsprofile

In folgender Tabelle sind die nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] ermittelten täglichen Durchschnittswerte der zurückgelegten Strecken im Kilometern verschiedener Mobilitätsgruppen vermerkt sowie die jährlichen Emissionen, die bei diesem Mobilitätsverhalten zu erwarten sind in kg CO₂-Äquivalent.

	Zu Fuß (km)	Rad (km) ⁰	MIV (km)	MIV Emissionen ¹	ÖV (km) ²	ÖV Emissionen ³	Emissionen Gesamt ⁴
Auto	1	0	43	3051,3kg CO ₂ -Äqu.	4	93,9 kg CO ₂ -Äqu.	3145,2 kg CO ₂ -Äqu.
ÖV	1	0	8	567,7 kg CO ₂ -Äqu.	19	446,2 kg CO ₂ -Äqu.	1086,9 kg CO ₂ -Äqu.
Rad	1	6	13	922,5 kg CO ₂ -Äqu.	7	164,4 kg CO ₂ -Äqu.	1013,9 kg CO ₂ -Äqu.
A,Ö	1	0	28	1986,9 kg CO ₂ -Äqu.	19	446,2 kg CO ₂ -Äqu.	2433,1 kg CO ₂ -Äqu.
A,R	1	3	37	2625,5 kg CO ₂ -Äqu.	4	93,9 kg CO ₂ -Äqu.	2719,4 kg CO ₂ -Äqu.
A,Ö,R	1	3	26	1845,0 kg CO ₂ -Äqu.	22	516,7kg CO ₂ -Äqu.	2361,6 kg CO ₂ -Äqu.
Ö,R	1	4	12	851,5 kg CO ₂ -Äqu.	26	610,6 kg CO ₂ -Äqu.	1462,1 kg CO ₂ -Äqu.
Durchschn.	1	1	29	2057,8 kg CO ₂ -Äqu.	7	164,4 kg CO ₂ -Äqu.	2222,2 kg CO ₂ -Äqu.

Tab. 51: Berechnung der jährlichen Emissionsprofile nach verschiedenen Mobilitätstypen, Datenquellen: [NOBIS, KUHNIMHOF 2019], [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1]

⁰: Für Fahrräder werden die Herstellungskosten und eine Nutzung der Straßeninfrastruktur berücksichtigt, wobei letzterer Faktor eine Unterschätzung der Emissionen mit sich bringen könnte ([ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2]). ¹: Hier wurde der Faktor für PKW verwendet, da LKW etc. nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] einen sehr geringen Anteil am Personentransport ausmachen. ²: Setzt sich aus Nah- und Fernverkehr mit Bus, Bahn etc. zusammen. ³: Hier wurden die Emissionsfaktoren von [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] mit den prozentualen Anteilen an den in Deutschland 2017 zurückgelegten Personenkilometern der verschiedenen ÖV-Modi (nach [NOBIS, KUHNIMHOF 2019]) multipliziert und durch die Gesamtsumme des ÖV-Anteils geteilt um einen gewichteten Gesamtemissionsfaktor für den ÖV zu erhalten. ⁴: Zu Fuß gehen als emissionslos angenommen

8 Quellenverzeichnis

Literatur

- [AAMAAS ET AL. 2013] AAMAAS, B.; BORKEN-KLEEFELD, J.; PETERS, G.: „*The climate impact of travel behavior: A German case study with illustrative mitigation options*“, In: Environmental science and policy, Vol. 33, S. 273-282.
- [AGORA ENERGIEWENDE 2019] AGORA ENERGIEWENDE: „*Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*“, online unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf (zuletzt abgerufen am 07.04.2021)
- [AGORA ENERGIEWENDE 2021] AGORA ENERGIEWENDE: „*Corona-Jahr 2020: Rekordrückgänge bei CO₂-Emissionen und Kohleverstromung*“, online unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2021/2020_01_Jahresauswertung_2020/2020-01-05_PM_Agora_Jahresauswertung_2020.pdf (zuletzt abgerufen am 24.03.2021)
- [AGORA VERKEHRSWENDE 2019] AGORA VERKEHRSWENDE: „*En route to Paris? Implications of the Paris Agreement for the German transport sector*“, online unter <https://www.agora-verkehrswende.de/en/publications/en-route-to-paris/> (zuletzt abgerufen am 13.04.2021)
- [AGORA VERKEHRSWENDE ET AL. 2020] AGORA VERKEHRSWENDE, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIS), WORLD ECONOMIC FORUM (WEF): „*Transport for under two degrees –the way forward. 10 key insights for the decarbonisation of the transport sector*“, online unter <https://www.t4under2.org/> (zuletzt abgerufen am 12.04.2021)
- [ALCARAZ ET AL. 2018] ALCARAZ, O.; BUENESTADO, P.; ESCRIBANO, B.; SUREDA, B.; TURON, A.; XERCAVINS, J.: „*The global carbon budget and the Paris agreement*“, In: International Journal of Climate Change Strategies and Management, Vol.11, No.3, S.310-325.
- [ALLEN ET AL. 2018, 1] ALLEN, M.; DUBE, O.; SOLECKI, W.; ARAGÓN-DURAND, F.; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J.; MAHOWALD, N.; MULUGETTA, Y.; PEREZ, R.; WAIRIU, M.; ZICKFEL, K.: „*Framing and Context*“, In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Hrsg. MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T.
- [ALLEN ET AL. 2018, 2] ALLEN, M.; SHINE, K.; FUGLESTVEDT, R.J.; MILLAR, R.; CAIN, M.; FRAME, D.; MACEY, A.: „*A solution to the misrepresentation of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation*“, In: Climate and Atmospheric Science, Vol.16
- [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 1] ALLEKOTTE, M.; ALTHAUS, H.; BERGK, F.; BIEMANN, K.; KNÖRR, W.; SUTTER, D.: „*Umweltfreundlich mobil! Ein ökologischer Verkehrsartenvergleich für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland*“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltfreundlich-mobil> (zuletzt abgerufen am 26.03.2021)
- [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 2] ALLEKOTTE, M.; ALTHAUS, H.; BERGK, F.; BIEMANN, K.; DEREGOWSKI, C.; KNÖRR, W.; SUTTER, D.; BERGMANN, T.: „*Ökologische Bewertung von Verkehrsarten*“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-bewertung-von-verkehrsarten> (zuletzt abgerufen am

26.03.2021)

- [ALLEKOTTE ET AL. 2020, 3] ALLEKOTTE, M.; BIEMANN, K.; HEIDT, C.; COLSON, M.; KNÖRR, W.: „Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-tremod-2019> (zuletzt abgerufen am 31.03.2021)
- [ALTERNATIVE FÜR DEUTSCHLAND 2021] ALTERNATIVE FÜR DEUTSCHLAND: „*Deutschland. Aber normal. Programm der Alternative für Deutschland für die Wahl zum 20. Deutschen Bundestag*“, online unter <https://cdn.afd.tools/wp-content/uploads/sites/111/2021/05/2021-05-20--AfD-Bundestagswahlprogramm-2021.pdf> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021)
- [AMATUNI ET AL. 2020] AMATUNI, L.; OTTELIN, J.; STEUBING, B.; MOGOLLON, J.: „*Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective*“, In: Journal of Cleaner Production, Vol.266, 1-10.
- [ANDERSSON 2020] ANDERSSON, A.: „*Is climate morality the answer? Preconditions affecting the motivation to decrease private car use*“, In: Transportation Research, Part D, Vol.78, S.1-14.
- [ATMOSFAIR 2011] ATMOSFAIR: „*Atmosfair Airline Index. Documentation of the methodology*“, online unter https://www.atmosfair.de/wp-content/uploads/aai2018-englischfarbe_final_mn.pdf (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [ATMOSFAIR 2016] ATMOSFAIR: „*atmosfair Flight Emissions Calculator. Documentation of the Method and Data*“, online unter <https://www.atmosfair.de/wp-content/uploads/atmosfair-flight-emissions-calculator-englisch-1.pdf> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [ATMOSFAIR 2021] ATMOSFAIR: „*CO₂-Fußabdruck meines Flugs berechnen*“, online unter <https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/flug/> (zuletzt abgerufen am 17.04.2021).
- [AYAZ ET AL. 2011] AYAZ, R.; NAKIR, I.; DURUSU, A.; AKCA, H.; TANRIOVEN, M.: „*A Comparison of Metrobus System And Trolleybus System Considering Energy Costs and Co2 Emission: A Case Study For Istanbul*“, In: 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies.
- [BANISTER ET AL. 2012] BANISTER, D.; SCHWANEN, T.; ANABLE, J.: „*Introduction to the special section on theoretical perspectives on climate change mitigation in transport*“. In: Journal of Transport Geography, Vol. 24, S.467-470.
- [BERGK ET AL. 2016] BERK, F.; BIEMANN, F.; HEIDT, C.; KNÖRR, W.; LAMBRECHT, U.; SCHMIDT, T.; ICKERT, L.; SCHMIED, M.; SCHMIDT, P.; WEINDORF, W.: „*Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050*“. HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-des-verkehrs-bis-2050> (zuletzt abgerufen am 31.03.2021)
- [BIRNIK 2013] BIRNIK, A.: „*An evidence-based assessment of online carbon calculators*“. In: International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 17, S.280-293.
- [BLANCK ET AL. 2013] BLANCK, R.; KASTEN, P.; HACKER, F.; MOTTSCHALL, M.: „*Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 -Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie und Emissionsszenarios“*“, HRSG.: ÖKO-INSTITUT E.V.; UMWELTBUNDESAMT.
- [BMU 2019, 1] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT: „*Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*“, online unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)

- [BMU 2019, 2] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT: „*Projektionsbericht der Bundesregierung 2019*“, online unter <https://www.bmu.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2019/> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)
- [BMU 2021] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT: „*Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes*“, online unter <https://www.bmu.de/gesetz/entwurf-eines-ersten-gesetzes-zur-aenderung-des-bundes-klimaschutzgesetzes/> (zuletzt abgerufen am 12.05.2021)
- [BMWI 2015] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: „*Energie der Zukunft. Fünfter Monitoring Bericht zur Energiewende*“.
- [BMWI 2018] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: „*Energie der Zukunft. Sechster Monitoring Bericht zur Energiewende*“.
- [BMWI 2020] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: „*Die Energie der Zukunft. Zweiter Forschungsbericht zur Energiewende, Berichtsjahr 2017*“.
- [BMWI UND BMU 2012] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE, BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: „*Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“*“, HRSG.: BMWI ÖFFENTLICHKEITSARBEIT, BMU ÖFFENTLICHKEITSARBEIT
- [BMWI 2020] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: „*Die Energie der Zukunft. Zweiter Forschungsbericht zur Energiewende, Berichtsjahr 2017*“.
- [BORKEN-KLEEFELD ET AL. 2010] BORKEN-KLEEFELD, J.; BERNTSEN, T.; FUGLESTVEDT, J.: „*Specific climate impact of passenger and freight transport*“. In: *Environmental Science and Technology*, Vol. 44, No.15, S. 5700-5706.
- [BOUMA 2014] BOUMA, J.: „*Soil science contributions towards SDGs and their implementation: linking soil functions with ecosystem services*“. In: *Journal of Plant and Nutritional Soil Sciences*, Vol. 177, S.111-120.
- [BOWS-LARKIN ET AL. 2016] BOWS-LARKIN, A.; MANDER, S.; TRAUT, M.; ANDERSON, K.; WOOD, F.: „*Aviation and climate change – the continuing challenge*“. In: *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, S.1-11.
- [BRAND, BOARDMAN 2008] BRAND, C.; BOARDMAN, B.: „*Taming of the few – The unequal distribution of greenhouse gas emissions from personal travel in the UK*“. In: *Energy Policy*, Vol. 36, S.224-238.
- [BUECHS, SCHNEPF 2013] BUECHS, M.; SCHNEPF, S.: „*Who emits most? Associations between socio-economic factors and UK households' home energy, transport, indirect and total CO2 emissions*“. In: *Ecological Economics*, Vol. 90, S.114-123.
- [BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN 2021] BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN: „*Deutschland. Alles ist drin. Vorläufiges Bundeswahlprogramm 2021*“, online unter: https://cms.gruene.de/uploads/documents/Vorlaeufiges-Wahlprogramm_GRUENE-Bundestagswahl-2021.pdf (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [BUND 2019] BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND: „*Mobiles Baden-Württemberg - Wege zu einer nachhaltigen Mobilität*“. Hrsg.: BUND LANDESVERBAND BADEN-WÜRTTEMBERG E.V., S.1-35., online unter <https://www.bund-bawue.de/service/publikationen/detail/publication/bund-broschuere-mobiles-baden-wuerttemberg/> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [BVerfG 2021] BUNDESVERFASSUNGSGERICHT: „*Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021*“, online unter <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/>

- 2021/bvg21-031.html (zuletzt abgerufen am 29.04.2021).
- [BURGESS ET AL. 2021] BURGESS, M.; RITCHIE, J.; SHAPLAND, J.; PIELKE, R.: „*IPCC baseline scenarios have over-projected CO₂ emissions and economic growth*“, In: Environmental Research Letters, Vol.16, S.1-11.
- [BURGUI-BURGUI, CHUVIECO 2020] BURGUI-BURGUI, M.; CHUVIECO, E.: „*Beyond carbon footprint calculators. New approaches for linking consumer behavior and climate action*“, In: Sustainability, Vol.12, S.1-14.
- [CAIN ET AL. 2019] CAIN, M.; LYNCH, J.; ALLEN, M.; FUGLESTVEDT, J.; FRAME, D.; MACEY, A.: „*Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants*“. In: Climate and Atmospheric Science, Vol. 29, S.1-7.
- [CARBON FOOTPRINT 2021] CARBON FOOTPRINT: „*Help and FAQ for the Online Carbon Calculators*“, online unter <https://www.carbonfootprint.com/calculatorfaqs.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)
- [CDU UND CSU 2021] CDU/CSU: „*Das Programm für Stabilität und Erneuerung*“, online unter <https://www.csu.de/common/download/Regierungsprogramm.pdf> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021)
- [CE DELFT 2014] CE DELFT, FRAUNHOFER IML, TRT, ECORYS, CONLOGIC: „*Fact-finding studies in support of the development of an EU strategy for freight transport logistics*“, HRSG.: CE DELFT, online unter <https://www.carbonfootprint.com/calculatorfaqs.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)
- [DANILECKI ET AL. 2016] DANILECKI, K.; MROZIK, M.; SMURANSKI, P.: „*Changes in the environmental profile of a popular passenger car over the last 30 years - Results of a simplified LCA study*“. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 141, S.208-218.
- [DB 2020] DB REGIO AG, DEUTSCHE BAHN AG: „*Grundlagenbericht zum Umwelt-MobilCheck*“, online unter <https://www.bahn.de/wmedia/view/mdb/media/intern/umc-grundlagenbericht.pdf> (zuletzt abgerufen am 09.04.2021)
- [DE HAAN ET AL. 2019] DE HAAN, P.; BIANCHETTI, R.; ROSSER, S.: „*PKW-Perspektiven EU und Schweiz. EBP-Hintergrundbericht*“. HRSG.: EBP SCHWEIZ AG, online unter https://www.ebp.ch/sites/default/files/2019-03/PKW-Perspektiven_EU_CH_2019.pdf (zuletzt abgerufen am 06.04.2021)
- [DESTATIS 2013] STATISTISCHES BUNDESAMT: „*Verkehr auf einen Blick*“, online unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publicationen/Downloads-Querschnitt/broschuere-verkehr-blick-0080006139004.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt abgerufen am 25.03.2021)
- [DESTATIS 2019] STATISTISCHES BUNDESAMT: „*Bevölkerung Deutschlands bis 2060. Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung - Hauptvarianten 1 bis 9*“, online unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html#sprg261398 (zuletzt abgerufen am 25.03.2021)
- [DESTATIS 2020] STATISTISCHES BUNDESAMT: „*Bevölkerung: Deutschland, Stichtag*“, online unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1616521032787&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=12411-0001&auswahltext=&werteabruf=starten#abreadcrumb> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021)
- [DEUTSCHER BUNDESTAG 2020] DEUTSCHER BUNDESTAG, 19. WAHLPERIODE : „*Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Brennstoffemissions-*

- handelsgesetzes*”. Hrsg.: BUNDESANZEIGER VERLAG GMBH., Köln.
- [DIE LINKE 2021] DIE LINKE: „*Zeit zu handeln. Für soziale Sicherheit, Frieden und Klimagerechtigkeit. Wahlprogramm*entwurf”, online unter https://www.die-linke.de/fileadmin/download/wahlen2021/BTWP21_Entwurf_Vorsitzende.pdf (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [DLR 2007] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT E.V.: „*Klimawirkungen des Luftverkehrs*”
- [DÖBBELT 2020] DÖBBELT, J.: „*Klimaschutz: So kannst du selbst CO2 sparen*”, online unter: <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/klimaschutz-so-kannst-du-selbst-co2-sparen/> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [DUARTE ET AL. 2012] DUARTE, R.; MAINAR, A.; SANCHEZ-CHOLIZ, J.: „*Social groups and CO2 emissions in Spanish households*”, In: *Energy Policy*, Vol. 44, S.441-450.
- [DWD 2020] DEUTSCHER WETTERDIENST: „*Klimastatusbericht Deutschland. Jahr 2019*”, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- [EC 2002] EUROPEAN COMMISSION, ENTEC: „*Chapter 2: Quantification of ship emissions*”, In: *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*, online unter https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf (zuletzt abgerufen am 15.04.2021)
- [EC 2017] EUROPEAN COMMISSION: „*Guidance/Best practices document on monitoring and reporting of fuel consumption, CO2 emissions and other relevant parameters pursuant to Regulation 2015/757 on monitoring, reporting and verification emissions from maritime transport*”, online unter https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping_en#tab-0-1 (zuletzt abgerufen am 15.04.2021)
- [EDWARDS ET AL. 2016] EDWARDS, H.; DIXON-HARDY, D.; WADUD, Z. : „*Aircraft cost index and the future of carbon emissions from air travel*”, In: *Applied Energy*, Vol.164, S.553-562.
- [EEA 2020] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY : „*Approximated estimates for greenhouse gas emissions*”, online unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/approximated-estimates-for-greenhouse-gas-emissions-2> (zuletzt abgerufen am 24.03.2021)
- [ESRI 2019] ESRI DEUTSCHLAND : „*World Airports*”, online unter <https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::euroglobalmap-administrative-boundaries> (zuletzt abgerufen am 15.04.2021)
- [ESRI 2020] ESRI DEUTSCHLAND : „*World Airports*”, online unter <https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::world-airports> (zuletzt abgerufen am 15.04.2021)
- [EUROSTAT 2021] EUROSTAT, EUROPEAN COMMISSION: „*Population on 1st January by age, sex and type of projection* ”, online unter <https://ec.europa.eu/eurostat/web/population-demography-migration-projections/population-projections-/database> (zuletzt abgerufen am 26.03.2021)
- [FOLEGA, BURCHART-KOROL 2017] FOLEGA, P.; BURCHART-KOROL, D.: „*Environmental assesment of road transport in a passenger car using life cycle approach*”, In: *Transport Problems*, Vol.12/2, S.147-153.
- [FOLLMER ET AL. 2010] FOLLMER, R.; GRUSCHWITZ, D.; JESKE, B.; QUANDT, S.: „*Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht*”, HRSG.: INFAS, DLR, S.1-214.
- [FREIE DEMOKRATEN 2021] FREIE DEMOKRATEN: „*Nie gab es mehr zu tun. Wahlprogramm der freien Demokraten*”, online unter https://www.fdp.de/sites/default/files/2021-06/FDP_Programm_Bundestagswahl2021_1.pdf (zuletzt abgerufen am 29.06.2021)
- [FREY ET AL. 2020] FREY, K.; BURGER, A.; DZIEKAN, K.; BUNGE, C.; LÜNEBÜRGER,

- B.: „*Verkehrswende für ALLE. So erreichen wir eine sozial gerechtere und umweltverträglichere Mobilität*“, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2020_pp_verkehrswende_fuer_alle_bf_02.pdf (zuletzt abgerufen am 25.03.2021)
- [FUR 2019] FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT URLAUB UND REISEN E.V.: „*ReiseAnalyse 2020 - Erste ausgewählte Ergebnisse der 49. Reiseanalyse zur ITB 2019*“, online unter https://reiseanalyse.de/wp-content/uploads/2019/03/RA2019_Erste-Ergebnisse_DE.pdf (zuletzt abgerufen am 14.04.2021)
- [FUR 2020] FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT URLAUB UND REISEN E.V.: „*ReiseAnalyse 2020 - Erste ausgewählte Ergebnisse der 50. Reiseanalyse zur ITB 2020*“, online unter https://reiseanalyse.de/wp-content/uploads/2020/03/RA2020_Erste-Ergebnisse_DE.pdf (zuletzt abgerufen am 14.04.2021)
- [GIROD ET AL 2012] GIROD, B.; VAN VUUREN, D.; DEETMAN, S.: „*Global travel within the 2°C climate target*“, In: Energy Policy Vol. 45, S.152-166.
- [GOLDBERG 1990] GOLDBERG, L.: „*An alternative description of personality. The big-five factor structure*“, In: Journal of personality and social psychology, Vol. 5/6, S.1216-1229..
- [GÖSSLING, HUMPE 2020] GOESSLING, S.; HUMPE, A.: „*The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change*“, In: Global Environmental Change, Vol. 65, S.1-12.
- [GRAICHEN ET AL. 2010] GRAICHEN, J.; GORES, S.; HEROLD, A.: „*Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs*“. Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, Desslau-Roßlau, 2010, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ueberarbeitung-des-emissionsinventars-des> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [GRANOVSKII ET AL. 2006] GRANOVSKII, M.; DINCER, I.; ROSEN, M.: „*Life cycle assesment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles*“, In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol.31, S.337-352.
- [GREENPEACE 2021] GREENPEACE: „*Sparen sie sich das!*“. online unter <https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel/klimaschutz/die-zehn-wichtigsten-tipps-was-sie-fuer-das-klima-tun-koennen> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [HAKENES 2020] HAKENES, J.: „*Wie Sie möglichst viel CO2 einsparen: die besten Tipps*“. online unter <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/co2-einsparen/> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [HELMERS, WEISS 2017] HELMERS, E.; WEISS, M.: „*Advances and critical aspects in the life-cycle assesment of battery electric cars*“, In: Energy and Emission Control Technologies, Vol. 5, S.1-18.
- [HELMS ET AL. 2016] HELMS, H.; JÖHRENS, J.; KÄMPER, C.; GIEGRICH, J.; LIEBICH, A.; VOGT, R.; LAMBRECHT, U.; IFEU HEIDELBERG: „*Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*“, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [HENDZLIK ET AL. 2019] HENDZLIK, M.; LANGE, M.; BURGER, A.; DZIEKAN, K.; FECHTER, K.; FREY, K.; LAMBRECHT, M.; MÖNCH, L.; SCHMIED, M.: „*Kein Grund zur Lücke. So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030*“, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kein-grund-zur-luecke> (zuletzt abgerufen am 13.04.2021).
- [ICAO 2018] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: „*ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology*“ online unter <https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).

- [ICHA, KUHS 2020] ICHA, P.; KUHS, G.: „*Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019*“ online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-6> (zuletzt abgerufen am 07.04.2021).
- [IEA 2017, 1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: „*Energy Technology Perspectives 2017: Catalyzing Energy Technology Transformations*“, Paris.
- [IEA 2017, 2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: „*Energy Technology Perspectives 2017. Catalyzing Energy Technology Transformations. ETP 2017 data*“, online unter <https://webstore.iea.org/energy-technology-perspectives-2017> (zuletzt abgerufen am 26.03.2021) Alle Rechte vorbehalten.
- [IPCC 2013] INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE: „*Annex II: Climate System Scenario Tables*“, HRSG.: PRATHER, M.; FLATO, G.; FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, C.; LAMARQUE, J.; LIAO, H.; RASCH, P. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, HRSG.: STOCKER, T.; QIN, D.; PLATTNER, G.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [IPCC 2018, 1] INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE: „*Summary for Policymakers*“, In: *Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*, HRSG.: MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [IPCC 2018, 2] INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE: „*Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*“, HRSG.: MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T., In Press.
- [JARDINE 2009] JARDINE, C.: „*Calculating the carbon dioxide emissions of flights*“, In: Final report by the Environmental Change Institute, S. 1-19.
- [JUHRICH 2016] JUHRICH, K.: „*CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf (zuletzt abgerufen am 07.04.2021).
- [JUNG, KOO 2018] JUNG, J.; KOO, Y.: „*Analyzing the Effects of Car Sharing Services on the Reduction of Greenhouse Gas (GHG) Emissions*“, In: Sustainability, Vol.10, S.1-17.
- [JUNG, SCHULTZ 2021] JUNG, A.; SCHULTZ, S.: „*Wie wir fliegen werden - und was es kostet*“, In: Der Spiegel, Nr.14/02.04.2021.
- [KEMMLER ET AL. 2021] KEMMLER, A.; KIRCHNER, A.; AUF DER MAUR, A.; ESS, F.; KREIDELMEYER, S.; PIEGSA, A.; SPILLMANN, T.; STRASSBURG, S.; WÜNSCH, M.; ZIEGENHAGEN, I.; SCHLOMANN, B.; PLÖTZ, P.; LUTZ, C.; BECKER, L.; FRITSCH, U.: „*Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050*“, HRSG.: BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE,

- online unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)
- [KLIMA KOLLEKTE 2018] KLIMA KOLLEKTE - KIRCHLICHER KOMPENSATIONSFONDS GMBH: „Klimafreundlich mobil“ online unter <https://klima-kollekte.de/vermeiden-reduzieren/unterwegs> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [KNÖRR, HÜTTERMANN 2016] KNÖRR, W.; HÜTTERMANN, R.: „EcoPassenger. Environmental Methodology and Data. Update 2016“, Hrsg.: IFEU HEIDELBERG, online unter http://ecopassenger.hafas.de/hafas-res/download/Ecopassenger_Methodology_Data.pdf (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [KNÖRR ET AL. 2010] KNÖRR, W.; HELDSTAB, J.; KASSER, F.; KELLER, M.: „Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOD und TREMOD-MM berechneten Luftschadstoffemissionen des langebundenen Verkehrs in Deutschland“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter http://www.umweltbundesamt.de/uba-infomedien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3937 (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [KNÖRR ET AL. 2016] KNÖRR, W.; HEIDT, C.; GORES, S.; BERGK, F.: „Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035 (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014)“, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Endbericht_TREMOD_2016_160701.pdf (zuletzt abgerufen am 07.04.2021).
- [KREX 2019] KREX, A.: „Nach uns die Schiene“, Hrsg.: ZEIT ONLINE, online unter <https://www.zeit.de/entdecken/reisen/2019-08/zugstolz-flugscham-klima-bahn-flugzeug-reise> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [LYONS ET AL. 2012] LYONS, S.; PENTECOST, A.; TOL, R.: „Socioeconomic distribution of emissions and resource use in Ireland“, In: Journal of Environmental Management, Vol. 112, S.186-198.
- [MCKINNON 2015] MCKINNON, C.: „Climate justice in a carbon budget“, In: HUGGEL, C.; OHNDORF, M.; ROSER, D.; WALLIMANN-HELMER, I. (HRSG., 2015) „Climate justice in Interdisciplinary Research“, S.375-384.
- [MEINSHAUSEN ET AL. 2011] MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S.; ET AL.: „The RCP GHG concentrations and their extension from 1765 to 2300.“, nach VAN VUUREN ET AL. 2007, online unter <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [MITCHELL 2009] MITCHELL, M.: „The Resurgence Carbon Dioxide Calculator“, Hrsg.: RESURGENCE TRUST
- [MOBITOOL 2020] MOBITOOL: „mobitool-Faktoren v2.1. Die Excel-Datenbank mit aufbereiteten ecoinvent-Umweltdaten und Emissionsfaktoren (Update 2020)“, online unter <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v2-1-25.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [MOTTSCHALL, BERGMANN 2013] MOTTSCHALL, M.; BERGMANN, T.: „Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. Arbeitspaket 4 des Projektes „Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewbility“, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-emissionen-durch-infrastruktur> (zuletzt aberufen am 12.04.2021)
- [MYHRE ET AL. 2013] MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BREON, F.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUNANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHANG, H.: „Anthropogenic and Natural Radiative Forcing“, In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, HRSG.: STOCKER, T.; QIN, D.; PLATTNER, G.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [NOAA 2020] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION: „*CarbonTracker CT2019B, Flux Time Series*“, online unter <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/fluxtimeseries.php?region=Global#imatable> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [NOBIS 2019] NOBIS, C.: „*Mobilität in Deutschland - MiD Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr, Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*“, Bonn, Berlin.
- [NOBIS, KUHNIMHOF 2019] NOBIS, C.; KUHIMHOF, T.: „*Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*“, Bonn, Berlin.
- [NOBIS ET AL. 2019] NOBIS, C.; KUHIMHOF, T.; FOLLMER, R.; BÄUMER, M.: „*Mobilität in Deutschland – Zeitreihenbericht 2002 – 2008 – 2017. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*“, Bonn, Berlin.
- [ORO VERDE 2021] ORO VERDE - DIE TROPENWALDSTIFTUNG: „*CO2 sparen - konkrete Schritte für den Alltag*“, online unter: <https://www.regenwald-schuetzen.org/regenwald-wissen/regenwald-und-klimaschutz/co2-sparen> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [PANG ET AL. 2020] PANG, M.; MEIRELLES, J.; MOREAU, V.; BINDER, C.: „*Urban carbon footprints: a consumption-based approach for Swiss households*“, In: *Environmental Research Communications*, Vol. 2, S.1-12.
- [PARAVANTIS ET AL. 2008] PARAVANTIS, J.; SAMVRACOS, E.; NTANOS, S.: „*Energy consumption and carbon dioxide emissions of a suburban coastal transport system*“, MPRA Paper No. 66438, online unter <https://mpa.ub.uni-muenchen.de/66438/> (zuletzt abgerufen am 14.04.2021)
- [PROGNOS, ÖI, WI 2020] PROGNOS, ÖKO-INSTITUT, WUPPERTAL-INSTITUT: „*Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität*“
- [PROGNOS, ÖI, WI 2021] PROGNOS, ÖKO-INSTITUT, WUPPERTAL-INSTITUT: „*Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*“
- [ROCKSTROEM ET AL. 2017] ROCKSTROEM, J.; GAFFNEY, O.; ROGELJ, J.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SCHELLNHUBER, H.: „*A roadmap for rapid decarbonization*“, In: *Science*, Vol.355, Issue 6331, S.1269-1271.
- [ROUTERANK 2021] ROUTERANK LTD.: „*Frequently Asked Questions*“, online unter: <https://www.routerank.com/en/faq> (zuletzt abgerufen am 26.03.2021).
- [ROGELJ ET AL 2018] ROGELJ, J.; SHINDELL, D.; JIANG, K.; FIFITA, S.; FORSTER, P.; GINZBURG, V.; HANDA, C.; KHESHGI, H.; KOBAYASHI, S.; KRIEGLER, E.; MUNDACA, L.; SEFERIAN, R.; VILARINO, M.: „*Mitigation pathways compatible with 1.5 C in the context of sustainable development.*“, In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Hrsg. MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T.
- [ROGELJ ET AL 2019] ROGELJ, J.; FORSTER, P.; KRIEGLER, E.; SMITH, C.; SEFERIAN, R.:

- „*Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets*”, In: Nature, Vol. 571, S.335-342.
- [ROY ET AL 2018] ROY, J.; TSCHAKERT, P.; WAISMAN, H.; ABDUL HALIM, S.; ANTWI-AGYEI, P.; DASGUPTA, P.; HAYWARD, B.; KANNINEN, M.; LIVERMAN, D.; OKEREKE, C.; PINHO, P.; RIAHI, K.; SUAREZ, A.: „*Sustainable Development, Poverty Eradication and Reducing Inequalities.*”, In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Hrsg. MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T.
- [RYPDAL ET AL 2020] RYPDAL, M.; BOERS, N.; FREDRIKSEN, H.; EISELT, K.; JOHANSEN, A.; MARTINSEN, A.; MENTZONI, E.; GRAVERSEN, R.; RYPDAL, K.: „*Estimating Remaining Carbon Budgets Using Emulators of CMIP6 Models*”, 19 November 2020, PREPRINT (Version 1), online unter https://assets.researchsquare.com/files/rs-104000/v1_stamped.pdf (zuletzt abgerufen am 27.03.2021).
- [SANGUINETTI ET AL 2011] SANGUINETTI, A.; KWON, A.; LI, Y.; CHAKRABORTY, V.; SIKAND, S.; TARELHO, O.; CHEN, Y.; AMENTA, N. : „*Adding carbon to the equation in online flight searches*”, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [SCHÄFER ET AL. 2018] SCHÄFER, M.; JANITZEK, T.; DZIEKAN, K.: „*Fernbusreisen in Deutschland Eine Bestandsaufnahme zu Treibhausgasen, Luftschadstoffen und zur Verkehrsentwicklung*”, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/fernbusreisen-in-deutschland> (zuletzt abgerufen am 12.04.2021).
- [SCHELEWSKY ET AL. 2020] SCHELEWSKY, M.; FOLLMER, R.; DICKMANN, C.: „*CO₂-Fußabdrücke im Alltagsverkehr*”, HRSG.: INFAS INSTITUT; UMWELTBUNDESAMT
- [SCHMIED, MOTTSCHALL 2014] SCHMIED, M.; MOTTSCHALL, M.: „*Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258*”, HRSG.:BMVI, online unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oepnv.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt abgerufen am 07.04.2021)
- [SCHMIED ET AL. 2013] SCHMIED, M.; MOTTSCHALL, M.; LÖCHTER, A.: „*Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland*”, HRSG.:ÖKO-INSTITUT, online unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/treibhausgasemissionen-durch-die-schieneninfrastruktur-und-schienenfahrzeuge> (zuletzt abgerufen am 10.04.2021)
- [SCHREIER ET AL 2015] SCHREIER, H.; BECKER, U.; HELLER, J.; PROBST, A.; KUNZE, I.; GOLITSCH, J.; CLARUS, E.; BECKER, T.; UTZMANN, H.; DERTSIZ, F.; SCHWIEGER, B.; MÖSER, G.; KIPP, T.: „*Endbericht: Evaluation CarSharing (EVA-CS). Landeshauptstadt München*”, HRSG.:TEAM RED DEUTSCHLAND GMBH, online unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-216755> (zuletzt abgerufen am 27.03.2021).
- [SCHULZ ET AL 2020] SCHULZ, A.; KUHNIMHOF, T.; NOBIS, C.; CHLOND, B.; MAGDOLEN, M.; BERGK, F.; KÄMPER, C.; KNÖRR, W.; KRÄCL, J.; JÖDDEN, C.; SAUER, A.; FÜHRER, M.; FRICK, R.: „*Klimawirksame Emissionen des deutschen Reiseverkehrs. Abschlussbericht*”, Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT, Desslau-Roßlau, 2010, online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-20_texte_141-2020_

- emissionen-reiseverkehr_0.pdf (zuletzt abgerufen am 27.03.2021)
- [SIDER ET AL. 2013] SIDER, T. ALAM, A.; ZUKARI, M.; DUGUM, H.; GOLDSTEIN, N.; ELURU, N.; HATZOPOULOU, M.: „*Land-use and socio-economics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution*”, In: *Journal of Transport Geography*, Vol. 33, S.230-239.
- [SIMS ET AL. 2014] SIMS, R.; SCHAEFFER, R.; CREUTZIG, F.; CRUZ-NÚÑEZ, X.; D’AGOSTO, M.; DIMITRIU, D.; FIGUEROA MEZA, M.; FULTON, L.; KOBAYASHI, S.; LAH, O.; MCKINNON, A.; NEWMAN, P.; OUYANG, M.; SCHAUER, J.; SPERLING, D.; TIWARI, G.: „*Transport*”, In: EDENHOFER, O. PICHs-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J. (HRSG.): „*Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [SIMSEKOGLU 2018] SIMSEKOGLU, Ö.: „*Socio-demographic characteristics, psychological factors and knowledge related to electric car use: A comparison between electric and conventional car drivers*”, In: *Transport Policy*, Vol.72, S.180-186.
- [SMARTICULAR 2021] SMARTICULAR: „*CO₂-Ausstoß im Alltag reduzieren - 6 einfache Tipps*”, online unter <https://www.smarticular.net/co2-sparen-im-alltag-energiespar-tipps-kompensation/> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [SMITH ET AL 2020] SMITH, C.; KRAMER, R.; MYHRE, G.; ALTERSKJAER, K.; COLLINS, W.; SIMA, A.; BOUCHER, O.; DUFRESNE, J.; NABAT, P.; MICHOU, M.; YUKIMOTO, S.; COLE, J.; PAYNTER, D.; SHIOGAMA, H.; OCONNOR, F.; ROBERTSON, E.; WILTSHIRE, A.; ANDREWS, T.; HANNAY, C.; MILLER, R.; NAZARENKO, L.; KIRKEVAG, A.; OLIVIE, D.; FIEDLER, S.; LEWNSCHAL, A.; MACKALLAH, C.; DIX, M.; PINCUS, R.; FORSTER, P. : „*Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models*”, In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 20, S.9591-9618.
- [SOVACOO ET AL. 2018] SOVACOO, B.; KESTER, J.; NOEL, L.; ZARAZUA DE RUBENS, G.: „*The demographics of decarbonizing transport: The influence of gender, education, occupation, age, and household size on electric mobility preferences in the Nordic region*”, In: *Global Environmental Change*, Vol.52, S.86-100.
- [SPD 2021] SPD: „*Das Zukunftsprogramm der SPD. Wofür wir stehen. Was uns antreibt. Wonach wir streben.*”, online unter <https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Beschluesse/Programm/SPD-Zukunftsprogramm.pdf> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [SRU 2020] GERMAN ADVISORY COUNCIL ON THE ENVIRONMENT: „*Using the CO₂ budget to meet the Paris climate targets. Environmental Report 2020, Chapter 2*”, HRSG.: HORNBERG, C.; NIEKISCH, M.; CALLIESS, C.; KEMFERT, C.; LUCHT, W.; MESSARI-BECKER, L.; ROTTER, V.
- [STECK ET AL. 2019] STECK, F.; EISENMANN, C.; KRÖGER, L.; WINKLER, C.: „*CO₂-Emissionen im Personenverkehr. Einfluss von Soziodemographie, Wohnort und Einkommen*”, In: *Internationales Verkehrswesen*, Vol.71, S.95-99.
- [TIETGE ET AL. 2020] TIETGE, U.; DORNOFF, J.; DIAZ, S.; MOCK, P.; ALLEKOTTE, M.; HEIDT, C.; KNÖRR, W.; ALTHAUS, H.; NOTTER, B.; OBERPRILLER, Q.; LÄDERACH, A.; HAUSERBERGER, S.; MATZER, C.; EISENMANN, C.; KUHNIMHOF, T.: „*Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs. Abschlussbericht*”, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-einer-methode-zur-ermittlung> (zuletzt abgerufen am 28.03.2021)
- [TK 2018] TECHNIKER KRANKENKASSE: „*Mobilität in der Arbeitswelt. Datenanalyse und aktuelle Studienlage 2018*”, Hamburg.

- [UK GOVERNMENT 2020] UK GOVERNMENT, DEPARTMENT FOR BUSINESS, ENERGY AND INDUSTRIAL STRATEGY: „*Conversion factors 2020: condensed set (for most users)*“, online unter <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2020> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2012] UMWELTBUNDESAMT: „*Klimawirksamkeit des Flugverkehrs. Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs*“, online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2019] UMWELTBUNDESAMT: „*Umweltschonender Luftverkehr. lokal - national -international*“, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschonender-luftverkehr> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2020, 1] UMWELTBUNDESAMT: „*Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland - Bezugsjahr 2019*“, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich-personenverkehr> (zuletzt abgerufen am 25.03.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2020, 2] UMWELTBUNDESAMT: „*Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018*“, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-5> (zuletzt abgerufen am 08.04.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2021, 1] UMWELTBUNDESAMT: „*CO2-Rechner des Umweltbundesamtes*“, online unter https://uba.co2-rechner.de/de_DE/?do=reset (zuletzt abgerufen am 27.03.2021).
- [UMWELTBUNDESAMT 2021, 2] UMWELTBUNDESAMT: „*Entwicklung und Zielreichung des Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*“, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands> (zuletzt abgerufen am 27.03.2021).
- [UN 2015] UNITED NATIONS : „*Paris Agreement*“, online unter https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (zuletzt abgerufen am 30.03.2021)
- [UN 2019] UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION : „*World Population Prospects 2019*“, Online Edition, Rev.1.
- [UNDP 2021] UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME: „*Goal 13: Climate action*“, online unter <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2021).
- [VAN VUUREN ET AL. 2007] VAN VUUREN, D.; DEN ELZEN, M.; LUCAES, P.; EICKHOUT, B.; STRENGERS, B.; VAN RUIJVEN, B.; WONICK, S.; VAN HOUDT, R.: „*Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assesment of reduction strategies and costs*“, In: Climatic Change, Vol.81, S.119-159.
- [VAN VUUREN ET AL. 2011] VAN VUUREN, D.; STEHFEST, E.; DEN ELZEN, M.; KRAM, T.; VAN VLIET, J.; DEETMAN, S.; ISAAC, M.; KLEIN, K.; HOF, A.; BELTRAN, A.; OOSTENRIJK, R.; VAN RUIJVEN, B.: „*RCP 2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2° C*“, In: Climatic Change, Vol.109, S.95-116.
- [VOIGT ET AL. 2021] VOIGT, C.; KLEINE, J.; SAUER, D.; MOORE, R.; BRÄUER, T.; LE CLERCQ, P.; KAUFMANN, S.; SCHEIBE, M.; JURKAT-WITSCHAS, T.; AIGNER, M.; BAUDER, U.; BOOSE, Y.; BORRMANN, S.; CROSBIE, E.; DISKIN, G.; DIGANGI, J.; HAHN, V.; HECKL, C.; HUBER, F.; NOWAK, J.; RAPP, M.; RAUCH, B.; ROBINSON, C.; SCHRIPP, T.; SHOOK, M.; WINSTEAD, E.; ZIEMBA, L.; SCHLAGER, H.; ANDERSON, B.: „*Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness*“, In: Communications Earth and Environment, Vol. 2:114.

- [WADUD, CHINTAKAYALA 2019] WADUD, Z.; CHINTAKAYALA, P.: „*Personal carbon trading: Trade-Off and complementary between in-home and transport related emissions reduction*”, In: Ecological Economics, Vol. 156, S. 397-408.
- [WELTWUNDERER 2020] WELTWUNDERER: „*CO2 sparen beim Reisen: 27 Dinge, die wirklich jeder tun kann*”, online unter <https://www.weltwunderer.de/co2-sparen-beim-reisen-27-dinge/?cn-reloaded=1> (zuletzt abgerufen am 29.06.2021).
- [WETTER.DE 2021] WETTER.DE (RTL INTERACTIVE GMBH): „*Klima für Deutschland*”, online unter <https://www.wetter.de/klima/europa/deutschland-c49.html> (zuletzt abgerufen am 22.04.2021).
- [WIETSCHEL ET AL. 2019] WIETSCHEL, M.; KÜHNBACH, M.; RÜDIGER, D.: „*Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland*”, Working Paper Sustainability and Innovation.
- [ZEIT ONLINE 2021] ZEIT ONLINE: „*Traum vom Nachtzug nach Spanien: Noch fehlt Geld für Züge*”, online unter <https://www.zeit.de/news/2021-02/17/traum-vom-nachtzug-nach-spanien-noch-fehlt-geld-fuer-zuege> (zuletzt abgerufen am 29.03.2021).
- [ZIMMER ET AL. 2013] ZIMMER, W.; HACKER, F.; RAUSCH, L.; FRITSCHKE, U.; CYGANSKI, R.; JUSTEN, A.; KNITSCHKY, G.; LITSCHKE, A.; MEHLIN, M.; MÜLLER, S.; SCHADE, W.; HARTWIG, J.; SIEVERS, L.: „*Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability. RENEWABILITY II – Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs*”, HRSG.: UMWELTBUNDESAMT, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-des-analyseinstruments> (zuletzt aberufen am 07.04.2021)

Danksagungen

Vielen Dank an

- ... Nicole Aeschbach für die tolle Projektidee, die Betreuung und die spannenden Gespräche.
- ... Werner Aeschbach für die Zweitbetreuung und die guten Ratschläge aus der Physik.
- ... die KommilitonInnen aus dem TdLab für den guten Austausch.
- ... Katharina Kriegbaum und Christine Bergakker aus den Bildungswissenschaften für die inspirierenden Ideen.
- ... meine Familie, Freunde und Freund die mich durch die Höhen und Tiefen dieses Studiums begleiteten.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen, als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Heidelberg, den 12.07.2021

Unterschrift