

# 1. Einleitung

Heutzutage ist die Debatte um einen vermehrten Klimaschutz und der damit verbundenen Abkehr von fossilen Energieträgern allgegenwärtig. Nachdem im Jahr 1997 erstmals völkerrechtlich verbindliche Ziele zur Reduktion des Ausstoßes potentiell klimaschädlicher Gase (oder auch *Treibhausgase*) im Kyoto Protokoll [1] vereinbart wurden, sind diese Ziele auf dem Pariser Klimagipfel von 2015 (COP21) weiter konkretisiert worden. Es ist nun das Bestreben, die Erderwärmung durch den anthropogenen Treibhauseffekt auf 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen [2]. An diese globalen Vereinbarungen angelehnt, hat die deutsche Bundesregierung eigene CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsziele formuliert. Demnach sollen die deutschlandweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach dem Klimaschutzplan der Bundesregierung [3] bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gesenkt werden (bezogen auf 1990). Vordergründig sollen durch einen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten und einer Effizienzsteigerung bei der Energienutzung die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden [4]. Im *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien* (Erneuerbaren-Energien-Gesetz, EEG) sind die politischen Randbedingungen für die Förderung der erneuerbaren Energien (EE), die zur Erreichung dieser Ziele beitragen sollen, vorgegeben [5].

Während der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch in Deutschland in den letzten Jahren auf 37,8 % angestiegen ist (Stand 2018 [6]), stieg der Anteil der EE am gesamten deutschen Primärenergieverbrauch nur leicht auf 14 % (Stand 2018 [6]). Dieser Unterschied ist unter anderem Folge eines geringen erneuerbaren Anteils an der Energienutzung in den Sektoren Wärme und Verkehr. Während deutschlandweit die CO<sub>2</sub>-Emissionen insbesondere durch den Beitrag der Energiewirtschaft bis 2018 um 31 % gesenkt werden konnten, liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors nahezu unverändert bei 164 Mio. t CO<sub>2</sub>eq [7]. Das entspricht einer Minderung von weniger als 1 % zum Bezugsjahr 1990.

Um diese Diskrepanz zwischen den Sektoren abzubauen, ist das Konzept der Sektorenkopplung ein vielversprechender Ansatz, der in dieser Arbeit weiter untersucht wird. Mit

Hilfe der Kopplung von zwei oder mehr Sektoren ist es möglich, z. B. regenerativ erzeugten Strom zwischen den Sektoren zu verschieben und von den positiven Entwicklungen des Stromsektors zu profitieren. Darüber hinaus können Systemdienstleistungen für den Stromsektor durch die Sektorenkopplung auch in anderen Sektoren ermöglicht werden. Die klassische Trennung der Energiebereitstellung in Strom-, Wärme- und Verkehrssektor findet nicht mehr statt. Diese Verschiebung vom Stromsektor in den Verkehrssektor kann direkt über elektrische Energie (z. B. zum Antrieb elektrischer PKW) oder mit Hilfe einer Energieumwandlung durch sogenannte Power-to-X Technologien realisiert werden.

### 1.1. Motivation und Abgrenzung der Arbeit

Um fundierte Aussagen über Synergien und Hemmnisse bei der Sektorenkopplung treffen zu können, muss das Verbrauchs- und Erzeugungsverhalten der betrachteten Sektoren sowohl zeitlich als auch regional möglichst hoch aufgelöst abgebildet werden. Dafür bietet sich eine computerbasierte Energiesystemsimulation als Analyzewerkzeug an. So können verschiedene Entwicklungen dargestellt und deren Auswirkungen analysiert werden. Optimierungsrechnungen im Hinblick auf bestimmte Zielgrößen wie Kosten oder CO<sub>2</sub>-Emissionen sind ebenfalls darstellbar.

Für die Analyse des deutschen Energiesystems liegen zeitlich aufgelöste Daten zu Erzeugung und Verbrauch fast ausschließlich für den Stromsektor vor (vgl. [8]). Aufgrund einer Vielzahl an individuellen Verbrauchern werden Daten für die Sektoren Wärme und Verkehr überwiegend nur zum jährlichen Energiebedarf veröffentlicht [9]. Darüber hinaus sind allgemeine Daten zur Zusammensetzung der Verbraucherstruktur verfügbar [10]. Zeitlich aufgelöste Daten müssen hier über das individuelle Heiz- bzw. Mobilitätsverhalten abgeleitet werden, damit diese Daten in einer mit dem Stromsektor vergleichbaren Auflösung vorliegen.

In der Vergangenheit war diese zeitliche Auflösung aus zwei Gründen nicht nötig. Zum einen ist die Energieversorgung der Sektoren weitestgehend getrennt gewesen. Zum anderen sind speziell im Verkehrssektor Energiebereitstellung und Verbrauch durch individuelle Tanks und systemweite Infrastruktur (wie Pipelinenetze oder Puffertanks) entkoppelt. In Zukunft ist aber mit einem weiteren Ausbau der Kopplung zwischen Strom- und Verkehrssektor zu rechnen [11]. Elektrische PKW, Oberleitungs-LKW oder Antriebe

mit alternativen (strombasierten) Kraftstoffen wie Wasserstoff sind nur einige Beispiele, die den Strombedarf weiter erhöhen werden.

Dieser Strombedarf muss im Gesamtsystem bereitgestellt werden. Schreitet zusätzlich der Ausbau fluktuierender EE im Stromsektor weiter voran, wird es umso wichtiger, potentielle Entwicklungspfade zu analysieren und Verbrauch und Erzeugung so genau wie möglich zu prognostizieren. Durch diese Prognosen kann letztendlich der zukünftige Speicherbedarf sowie die nötigen Kapazitäten der EE und der fossilen Residuallasterzeuger abgeschätzt werden.

In den letzten Jahren sind zu dem beschriebenen Themenkomplex einer Gesamtsystemsimulation mit weitestgehend gekoppelten Sektoren bereits einige Studien mit unterschiedlichen zeitlichen und lokalen Auflösungen veröffentlicht worden. In [12] wurden 16 Studien verglichen. Die Ergebnisse der betrachteten Studien weichen stark voneinander ab und prognostizieren z. B. eine Zunahme des Strombedarfs allein im Verkehrssektor von wenigen TWh pro Jahr bis hin zu mehr als 1.200 TWh/a je nach betrachtetem Szenario. Insbesondere der Ladebedarf der Elektro-PKW wird in solchen Studien oft sehr detailliert beforscht (vgl. z. B. [13–16]).

An diese Studien anknüpfend, wird in der vorliegenden Arbeit der Energiebedarf des gesamten Verkehrssektors zeitlich und lokal hoch aufgelöst bestimmt. Das erstellte Modell wird mit Modellen zur Entwicklung des Strom- und Wärmesektors [17, 18] gekoppelt, um ebenfalls eine Gesamtsystembetrachtung für unterschiedlich starke Ausprägungen der Sektorenkopplung zu ermöglichen.

### 1.2. Vorgehensweise

In einem ersten Schritt werden mit Hilfe einer Literaturrecherche für den Verkehrssektor charakteristische Daten erhoben, die zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens nötig sind. Nach der Recherche wird der Verkehrssektor in Teilspektoren unterteilt, die entsprechend der verfügbaren Datenlage und ihrem Einfluss auf den Gesamtsektor in unterschiedlichen Detailgraden abgebildet werden.

Wird der Verkehrssektor eines ganzen Landes analysiert, kann dies nur mit Hilfe geeigneter Vereinfachungen in angemessener Rechenzeit dargestellt werden. In der Energiesystemsimulation werden daher physikalische Vorgänge so weit vereinfacht, dass das

charakteristische Verhalten nur in Abhängigkeit von einschlägigen Eingangsgrößen abgebildet wird. Dabei werden zwei Ansätze unterschieden. Bei *bottom-up*-Modellen wird das Verhalten eines Sektors durch die Simulation ausgewählter individueller Agenten realisiert und durch entsprechende Skalierung auf das Gesamtsystem übertragen. Dem gegenüber stehen *top-down*-Modelle. Hier wird von den charakteristischen Daten des gesamten Sektors auf das individuelle Verhalten zurückgeschlossen (vgl. z. B. [19]).

In der vorliegenden Arbeit werden je nach Teilsektor passende Ansätze gewählt. Der motorisierte Individualverkehr (MIV) ist der energieintensivste Teilsektor des Mobilitätssektors [9]. Dieser wird agentenbasiert simuliert (*bottom-up*). Neben technischen Parametern und statistischen Werten wird hier das Mobilitätsverhalten auf Basis der Studie *Mobilität in Deutschland* (MiD) durch ein stochastisches Wegmodell abgebildet [20]. Für die weiteren Teilsektoren wie Güter-, Schienen- und öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) wird ein *top-down* Ansatz durch charakteristische Kennlinien realisiert. Beide Ansätze werden in Matlab Simulink zu einem Gesamtmodell zusammengeführt, welches den Energieverbrauch des Verkehrssektors in 15-minütiger Auflösung abbildet. Die lokale Auflösung der Ergebnisse kann sehr detailliert bis auf Gemeindeebene parametrisiert werden. Der Inlandflugverkehr und die Binnenschifffahrt werden nicht abgebildet, weil das direkte Sektorenkopplungspotential hier derzeit sehr eingeschränkt ist [21].

Nach der Verifizierung der einzelnen Teilmodelle mit Hilfe technologiespezifischer und statistischer Daten, wird das Modell durch einen Vergleich mit Daten aus dem Jahr 2017 zum aktuellen Stand der Dinge im Verkehrssektor validiert [9].

Im Anschluss an erfolgreiche Verifizierung und Validierung werden potentielle Entwicklungspfade für die Teilsektoren definiert. Daraus folgen aussagekräftige Szenarien, deren Energiebedarf und Auswirkungen auf das Gesamtsystem bestimmt werden. Die Berechnung des Gesamtsystems inklusive Strom- und Wärmesektor erfolgt mit Hilfe von kennlinienbasierten Modellen. Bewertet werden die einzelnen Szenarien hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen, dem Primärenergiebedarf, dem Strombedarf und weiterer aussagekräftiger Kennzahlen.

## 2. Charakterisierung des Verkehrssektors

*Verkehr* bezeichnet nach [22] ein „*Instrument zur Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen*“. Diese Mobilitätsbedürfnisse entstehen immer dann, wenn bestimmte Bedürfnisse am jeweiligen Aufenthaltsort nicht gestillt werden können. Eine Nachfrage nach Ortsveränderung ist die Folge, die gemeinhin auch als *Mobilität* beschrieben wird. Wie und in welchem Umfang die Mobilitätsbedürfnisse befriedigt werden, wird im folgenden Kapitel dargelegt. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Angaben auf die Bundesrepublik Deutschland.

### 2.1. Verkehrsaufkommen

Die einfachste Unterscheidung dieser Mobilitätsbedürfnisse (oder auch des *Verkehrsaufkommens*) kann in der Trennung zwischen Güter- und Personenverkehr erfolgen [22]. Nachfolgend werden für beide Teilsektoren wichtige Einflussgrößen vorgestellt. Dabei wird der Fokus auf Kennwerte und Entwicklungen gelegt, die direkt oder indirekt einen Einfluss auf den Energiebedarf des Verkehrssektors haben. Sozialwissenschaftliche Daten wie Wegzwecke oder Ähnliches sind für die vorliegende Arbeit nicht relevant und werden deshalb nur am Rande erwähnt, aber nicht weiter vertieft.

#### 2.1.1 Personenverkehr

Die Art und Weise, wie die deutsche Bevölkerung mobil ist, wird in zahlreichen Veröffentlichungen erfasst (z. B. [9, 23, 24]). Die aktuellste und umfangreichste Studie ist *Mobilität in Deutschland (MiD)* [20]. Hierbei handelt es sich um eine Befragung zum Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung, die seit 2002 durchgeführt wird. In der aktuellsten Befragung aus dem Jahr 2017 wurden über 300.000 Personen befragt, die Angaben zu mehr als 950.000 Wegen machten.

Das Verkehrsaufkommen in Deutschland beträgt demnach 260 Mio. Wege pro Tag. An einem typischen Tag sind in Deutschland 85 % der Einwohnerinnen und Einwohner unterwegs. Daraus folgt eine durchschnittliche Anzahl von 3,1 Wegen pro Person und Tag, bezogen auf die gesamte Bevölkerung. Die durchschnittlich zurückgelegte tägliche Strecke

## 2. Charakterisierung des Verkehrssektors

pro Person liegt bei 39 km. Insgesamt beträgt die deutsche Verkehrsleistung 3,2 Mrd. Pkm (Personenkilometer) pro Tag.

Abbildung 1 zeigt den sogenannten *Modalsplit*. Der Modalsplit stellt die Verteilung der Nutzung verschiedener Verkehrsmittel in Deutschland dar. Werden mehrere Verkehrsmittel für einen Weg genutzt, ist hier nur das Hauptverkehrsmittel dargestellt. Als Vergleich sind auch die Werte vorangegangener Erhebungen angegeben. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Verteilung der Anzahl der Wege und der Personenkilometer zu erkennen. Dies ist auf die unterschiedlichen spezifischen Weglängen der einzelnen Verkehrsmittel zurückzuführen (vgl. Tabelle 16 im Anhang).

Seit 2002 ist eine Verschiebung hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln wie dem öffentlichen Verkehr (ÖV) oder dem Fahrrad zu beobachten. Trotzdem ist im Jahr 2017 der motorisierte Individualverkehr (MIV) mit einem Anteil von 75 % der Verkehrsleistung (in Pkm) das dominierende Verkehrsmittel. Dazu zählen nicht nur die Wege als Fahrer, sondern auch das Mitfahren in einem Fahrzeug des MIV.

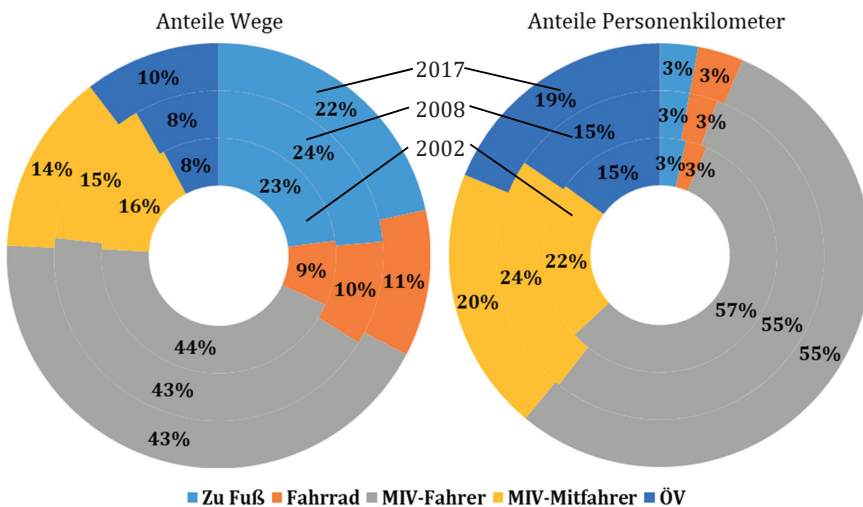


Abbildung 1: Modalsplit Deutschland [20]

Ein Teilergebnis der Studie MiD ist, dass, neben dem Alter und dem ökonomischen Status, die Siedlungsstruktur die Haupteinflussgröße für das Mobilitätsverhalten sei. Um die regionalen Unterschiede darzustellen, sind eine Vielzahl von Kategorien verfügbar. In MiD werden die Ergebnisse nach den regionalstatistischen Raumtypen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) klassifiziert [25].

Abbildung 2 zeigt die Klassifizierung der 11.169 Gemeinden Deutschlands nach der Raumtypologie *RegioStaR7*. Diese ist unterteilt in *ländliche Regionen* und *Stadtregionen*, die wiederum weiter von *Metropole* (R71) bis *kleinstädtischer, dörflicher Raum* (R77) in 7 Raumtypen differenziert werden.

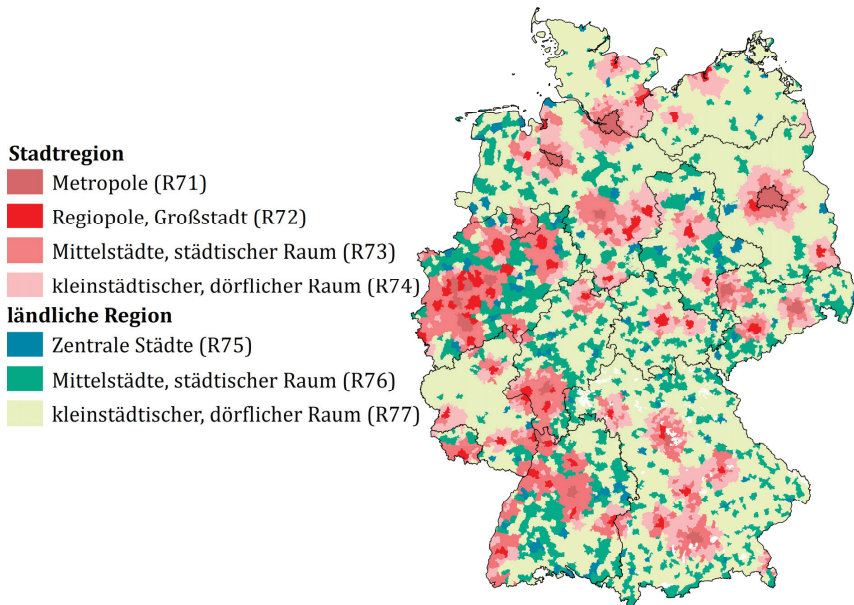
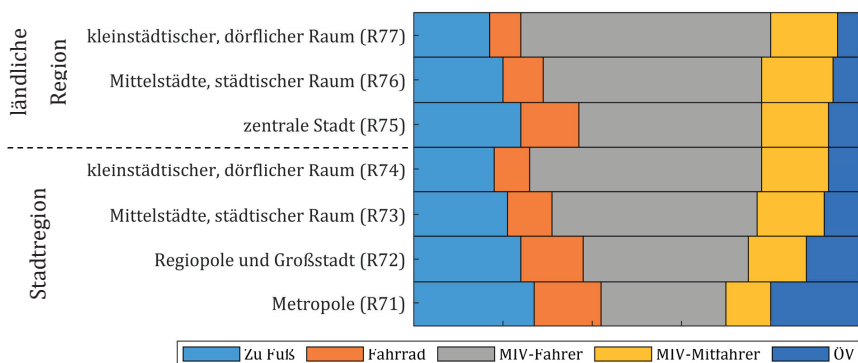


Abbildung 2: Gemeinden nach regionalstatistischer Raumtypologie RegioStaR7 (eigene Darstellung nach [25])

## 2. Charakterisierung des Verkehrssektors

Die regionalen Unterschiede des Modalsplits nach *RegioStar7* sind in Abbildung 3 dargestellt. So zeigen *Stadtregionen* (und insbesondere *Metropolen*) einen weitaus geringeren Anteil des MIV (38 %) im Vergleich zum Deutschlandschnitt von 57 % (vgl. Abbildung 1 links) und speziell im Vergleich zu ländlichen Regionen mit bis zu 71 %. Auch der Anteil des ÖV mit 5 % aller Wege im Raumtyp R77 nach *RegioStar7* unterscheidet sich stark vom Deutschlandschnitt mit 10 % oder den Metropolregionen mit 20 %. Um dieser ungleichen Verteilung Rechnung zu tragen, wird jede Gemeinde einem Raumtyp zugeordnet und einzeln simuliert, sodass das Mobilitätsverhalten möglichst genau abgebildet wird und regionale Unterschiede dargestellt werden.

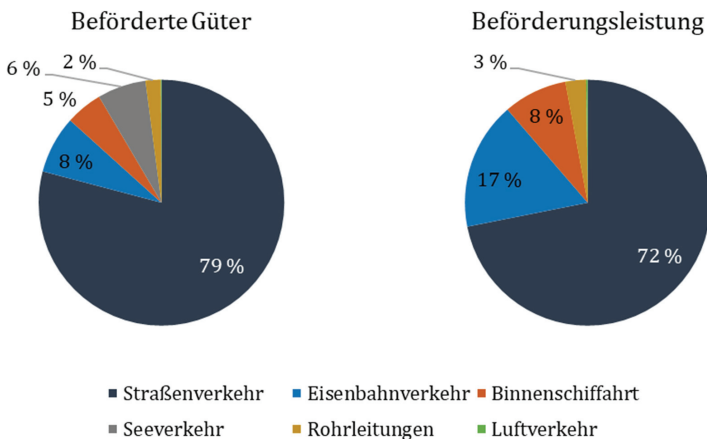


**Abbildung 3: Modalsplit nach regionalstatistischer Raumtypologie RegioStar7 (bezogen auf Anteile Wege) [20]**



## 2.1.2 Güterverkehr

Bezieht sich ein Mobilitätsbedürfnis auf die Ortsveränderung von materiellen Dingen, wird dieses Verkehrsaufkommen als Güterverkehr definiert. Im Jahr 2017 wurden in Deutschland insgesamt 4,605 Mrd. t Güter transportiert. Dies entspricht einer Beförderungsleistung von 666 Mrd. tkm (Tonnenkilometern) [26]. Analog zum Personenverkehr wird auch der Güterverkehr vom Straßenverkehr dominiert. Knapp 80 % der beförderten Güter werden auf der Straße transportiert, sodass die Dominanz des Straßenverkehrs hier noch ausgeprägter ist. Bei der Beförderungsleistung entfällt mit 479 Mrd. tkm ein Anteil von 72 % auf den Straßenverkehr. Abbildung 4 zeigt die Anteile der jeweiligen Verkehrsträger an den beförderten Gütern (in t) sowie die Anteile der Beförderungsleistung (in tkm). Auch hier werden, wie beim Personenverkehr, Unterschiede in den Anteilen aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Transportstrecken deutlich.



\*Für Seeverkehr sind keine Daten zur Beförderungsleistung angegeben.

**Abbildung 4: Modalsplit der beförderten Güter und der Beförderungsleistung (2017) [26]**

Die Beförderungsleistung des Güterverkehrs ist nach [27] seit 1991 um ca. 75 % gestiegen. Der straßengebundene Güterverkehr (sGV) weist in diesem Zeitraum sogar eine Steigerung um 100 % auf [27]. Zukünftig ist mit einer weiteren Steigerung der Beförderungsleistung zu rechnen. Für das Jahr 2050 ist mit einem Zuwachs um bis zu 50 % zu rechnen (vgl. z. B. [14]).

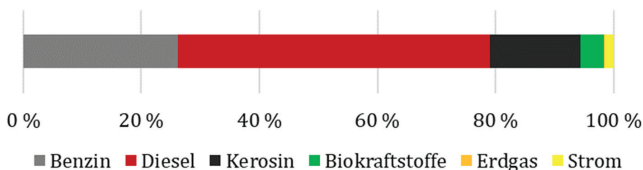
### 2.2. Energieverbrauch

Mit einem Anteil von ca. 30 % am deutschen Endenergieverbrauch von insgesamt 2.546 TWh ist der Verkehrssektor der zweitgrößte Sektor in Deutschland (vgl. Tabelle 1). Die Aufteilung der verschiedenen Endenergieträger des Verkehrssektors zeigt Abbildung 5. Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors wird nahezu vollständig (94,5 %) durch fossile Kraftstoffe auf Mineralölbasis und Erdgas gedeckt. Die verbleibenden 5,5 % werden durch Biokraftstoffe (bzw. deren Beimischung) und speziell im Schienenverkehr durch Strom bereitgestellt [12].

**Tabelle 1: Deutscher Endenergieverbrauch im Jahr 2017 nach Sektoren [28]**

Sektor	Endenergieverbrauch (in TWh)
Wärme & Kälte	1.262
Verkehr	754
Nettostromverbrauch	530
Gesamt	2.546

Die CO<sub>2</sub>eq-Emissionen des Verkehrs liegen bei 164 Mio. t/a (Stand 2018). Dies entspricht in etwa dem Wert von 1990. Im Laufe der letzten 5 Jahre stiegen die CO<sub>2</sub>eq-Emissionen des Verkehrs entgegen dem deutschlandweiten Trend sogar leicht an [7]. Bezogen auf die Treibhausgasemissionen der gesamten deutschen Volkswirtschaft im Jahr 2018 von 858 Mio. t CO<sub>2</sub>eq [29] betragen die CO<sub>2</sub>eq-Emissionen des Verkehrs somit 19 %.



**Abbildung 5: Aufteilung der Endenergieträger im Verkehrssektor [9]**