

**Abschätzung von CO₂-Emissionen für alternative
Trassenführungen im Bahnausbau-Korridor
Hannover – Bielefeld und Bielefeld – Hamm**



Initiative

WiduLand



Studie erstellt im Auftrag der Initiative WiduLand e.V. durch die KRBE GmbH



K R B E

Executive Summary

Die klimarelevanten Auswirkungen verschiedener Verkehrsmittel wurden in der Vergangenheit primär im Zusammenhang mit den aus der Antriebsenergie entstehenden Belastungen, hier vor allem CO₂, untersucht. Die Tatsache, dass zur Erbringung einer Verkehrsleistung jedweder Art immer auch Infrastrukturen notwendig sind, wurde weitgehend ignoriert.

In dieser Studie werden die CO₂-Emissionen für zwei verschiedene Varianten für den Ausbau bzw. Neubau der Bahnstrecke Hamm – Bielefeld – Hannover verglichen. Einerseits der komplette Neubau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit vielen neu zu bauenden Brücken- und Tunnelbauwerken auf Basis der „Variante Nr. 5 des Planungsbüro Schüßler, Dresden“ im Auftrag des BMVI erstellten Vorplanung (nachfolgend: Schüßler-Plan Nr.5), andererseits der Ausbau und die Ertüchtigung der bereits bestehenden Strecke wie von der Initiative WiduLand e.V., Vlotho, vorgeschlagen.

Weiterhin werden ökonomische Aspekte des Baus von Infrastruktur für das Verkehrssystem Schiene analysiert und Nutzen-Kosten-Überlegungen dargelegt. Zudem werden physikalische Zusammenhänge betrachtet, die aufgrund der den verschiedenen Verkehrssystemen inhärenten Bewegungsabläufe erheblichen Einfluss auf die energetische Effizienz des Schienenverkehrs im Allgemeinen haben.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Die Fokussierung auf die Antriebsenergie bei der Bewertung der Klimawirkung von Verkehrssystemen ist unzureichend und unzulässig;** insbesondere die benötigte Wege-Infrastruktur verursacht bei Bau und Wartung zuweilen CO₂-Emissionen, die die aus dem Antrieb resultierenden Emissionen signifikant übersteigen.
- **Zur vollständigen Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Verkehrssystems ist die ganzheitliche Betrachtung inkl. aller notwendigen Infrastrukturkomponenten zwingend erforderlich.** Zudem spielt die von einem Verkehrssystem insgesamt erbrachte Verkehrsleistung in Personenkilometer (PKM) bzw. Tonnenkilometer (TKM) eine entscheidende Rolle bei der Bewertung.
- Insbesondere Hochgeschwindigkeitsstrecken benötigen aufgrund der angestrebten Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h eine nahezu kerzengerade und weitgehend steigungsfreie Trasse. Diese Strecken sind sehr tunnel-intensiv und benötigen viele Brückenbauwerke, was aufgrund der dafür notwendigen Mengen an Stahl und Beton besonders hohe CO₂-Emissionen verursacht. Auf Basis der aktuell vorliegenden Informationen ist damit zu rechnen, dass ein Neubau der Strecke gemäß **Schüßler-Plan Nr.5 mit mehr als eine Million Tonnen CO₂ etwa die sechsfachen CO₂-Emissionen verursacht** wie ein Ausbau entsprechend des Vorschlags von WiduLand.
- Aufgrund der sehr großen Massen, die im Zugverkehr bewegt werden (rund 1,7 Tonnen Zuggewicht je Fahrgast im ICE), ist **das häufige Beschleunigen und wieder Abbremsen aus energetischer Sicht ein sehr ineffizienter Bewegungsablauf.** Hier gibt es systembedingt auch kaum Optimierungsmöglichkeiten, da sich die notwendigen Energiemengen

aus unveränderlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten ergeben. Mit dieser Erkenntnis sind derzeit geplante Vorhaben der Mobilitätspolitik, wie z.B. der „D-Takt nach letztem Gutachterentwurf“, grundsätzlich infrage zu stellen.

- Die Infrastruktur für das Verkehrssystem Schiene ist zudem extrem teuer; für die **hier untersuchte Strecke sind derzeit mehr als 8 Mrd. € veranschlagt**. Die Erfahrungen aus bereits realisierten oder in Realisierung befindlichen Schieneninfrastrukturprojekten zeigen, dass es häufig noch zu erheblichen Kostensteigerungen während der Bauphase kommt; **50% bis 100% Kostensteigerung** sind keine Seltenheit, 200% Kostensteigerung sind bereits vorgekommen. Vor dem Hintergrund, dass diese Kosten bei ganzheitlicher und realistischer Abschätzung der insgesamt emittierten CO₂-Mengen nicht mehr mit Umweltschutzaspekten zu rechtfertigen sind, erscheint eine faire und ideologiefreie Nutzen-Kostenrechnung dringend geboten.
- Jede Form von Mobilität ist angewandte Physik. **Der größte Hebel zur Verringerung von CO₂ im Zusammenhang mit Mobilität liegt in der effizienteren Nutzung der existierenden Verkehrssysteme auf der Basis heute bereits vorhandener Infrastruktur**. Es ist deshalb unabdingbar, dass sich die Mobilitätspolitik sehr viel stärker an Zahlen, Daten & Fakten naturwissenschaftlicher Grundlagen und weniger an Emotionen und Ideologien orientiert.

Notabene: Alle in der Studie verwendeten Zahlen bzgl. der von Verkehrssystemen erbrachten Transportleistungen in Personenkilometer und durchschnittliche Auslastungszahlen beziehen sich auf die Zeit vor der Corona-Pandemie, also auf die Jahre 2019 und früher. In den Jahre 2020 bis 2022 herrschten aufgrund von Covid-19 bei allen Verkehrs- und Transportsystemen Ausnahmezustände; es wäre methodisch unsauber, diese zu Vergleichen heranzuziehen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Methodik.....	6
1.1 Methodik.....	8
1.2 Materialien und deren CO ₂ -Bilanz	9
2 CO ₂ -Emissionen der Wege-Infrastruktur (Bahntrasse)	11
2.1 Bahnbrücken.....	11
2.1.1 Bahnbrücken Schüßler-Plan Nr.5	12
2.1.2 Bahnbrücken Vorschlag WiduLand	12
2.2 Bahntunnel	13
2.2.1 Tunnelbauwerke Schüßler-Plan Nr.5	14
2.2.2 Tunnelbauwerke Vorschlag WiduLand	14
2.3 Schienen und Unterbau	14
2.3.1 Schienen inkl. Unterbau für Schüßler-Plan Nr.5	15
2.3.2 Schienen inkl. Unterbau Vorschlag WiduLand.....	15
2.4 Elektrifizierung.....	15
2.5 CO ₂ -Abschätzungen aus dem Bau der Infrastruktur	17
2.5.1 CO ₂ -Belastungen aus Materialproduktion für Schüßler-Plan Nr. 5	18
2.5.2 CO ₂ -Belastungen aus Materialproduktion bei Bau für Vorschlag WiduLand	20
2.5.3 Ausbauabschnitt Hamm – Bielefeld.....	21
3 Vergleich Schüßler-Plan Nr.5 und Vorschlag WiduLand	22
3.1 Schallschutzmaßnahmen und Bahnhofsbauten	23
3.1.1 Bahnlärm und Schallschutzmaßnahmen	23
3.1.2 Bahnhofsaus- und Bahnhofsneubauten	28
4 Einordnung der berechneten Ergebnisse.....	30
4.1 Maßstäbe und Vergleiche.....	30
4.2 Wartung von Bahntrassen	32
4.3 Verkehrsprognosen der Bahn.....	33
4.3.1 Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln – Frankfurt.....	34
4.3.2 Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München	34
4.3.3 Überlegungen zu Verkehrsprognosen der Strecke Hamm – Hannover.....	36
5 Ökonomische Überlegungen.....	38
5.1 Grundlegende Überlegungen zu Kosten und Nutzen im Mobilitätsumfeld.....	38
5.2 Kostenabschätzung zur Neubaustrecke Hamm – Hannover	40

5.3 Kostenprognosen der Bahn	40
5.3.1 Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln – Rhein/Main.....	40
5.3.2 Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München	41
5.3.3 ICE-Trasse Ulm – Stuttgart und Stuttgart 21 (S21)	41
5.3.4 Kostenexplosion beim Ausbau der S13.....	43
5.4 Verantwortlichkeit für Kosten und Nutzen von Infrastruktur	43
5.5 Kosten-Nutzen-Betrachtung für die Strecke Bielefeld – Hannover.....	45
6 Physikalische Aspekte von Mobilität.....	48
6.1 Berechnungen zum Energieverbrauch	50
6.2 CO ₂ -Belastung durch die Antriebsenergie.....	54
6.3 Luftlinie oder landgebundene Entfernung	57
7 Weitere ökologische Aspekte von Verkehrssystemen.....	58
8 Fazit	60
9 Anhang	62
9.1 Auflistung der untersuchten Bauwerke nach Schüßler-Plan Nr. 5 (Hannover - Bielefeld)	62
9.1.1 Brücken und Überführungsbauwerke.....	62
9.1.2 Tunnel.....	63
9.2 Auflistung der untersuchten Bauwerke auf der Strecke Hamm – Bielefeld	64
9.2.1 Brücken und Überführungsbauwerke.....	64
9.2.2 Tunnel.....	67
9.3 Auflistung der untersuchten Bauwerke gemäß Vorschlag WiduLand e.V.	68
9.3.1 Brücken und Überführungsbauwerke.....	68
9.3.2 Tunnel.....	69
9.4 Physikalische Beispielrechnungen	70
9.4.1 Beschleunigungsenergie je Passagier	70
9.4.2 Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro PKM	71
9.4.3 Energie zur für 100 m Hubarbeit je Passagier.....	72
9.5 Energetische Berechnungen und CO ₂ -Ausstoß für Bahnfahrten	73
10 Literaturverzeichnis.....	74

1 Einleitung und Methodik

Die Initiative WiduLand e.V., Vlotho (nachfolgend WiduLand) ist eine Bürgerinitiative, die sich dafür einsetzt, im Zusammenhang mit der von der Deutschen Bahn geplanten Neubau-strecke Bielefeld – Hannover einen Beitrag zur abgewogenen gesamtökologischen und -öko-nomischen Verkehrswende im Sinne des Klimaschutzes zu leisten, indem auch ein sinnvoller Ausbau der Bestandsstrecke in Betracht gezogen und ernsthaft auf Tauglichkeit geprüft wird.

WiduLand ist an die KRBE GmbH (nachfolgend KRBE) herangetreten, um die bei KRBE vor-handene Kompetenz im Umfeld der „Ganzheitlichen ökologischen Bilanzierung von Ver-kehrssystemen“ zu nutzen. Insbesondere geht es darum, systematisch ermittelte Werte für die CO₂-Emissionen verschiedener Alternativen der zu bauenden „Wege-Infrastruktur“ ab-schätzen und berechnen zu lassen.

Kaum ein Thema wird derzeit so intensiv und emotional diskutiert, wie der „ökologische Fuß-abdruck“ verschiedener Verkehrssysteme, meist reduziert auf mehr oder weniger korrekte Zahlen zum CO₂-Ausstoß. Das Resultat solcher Diskussionen sind stark vereinfachte Aussagen wie „Bahnfahren ist umweltfreundlich“, „Autofahren ist umweltschädlich“ und „Fliegen ist noch viel umweltschädlicher“. Dass die Sachverhalte in Wirklichkeit sehr viel komplexer sind und es nicht ausreicht, nur die *Abgase am Auspuff* zu messen, um dem Umweltaspekt ange-messen Rechnung zu tragen, ist unter Fachleuten unbestritten; in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion wird die sehr komplexe Thematik jedoch nach wie vor oftmals sehr vereinfacht dargestellt.

Bahnfahren gilt bei vielen Menschen als ökologisch. Marketing-Aussagen der Deutschen Bahn wie „Deutschlands schnellster Klimaschützer“, die in großen Lettern auf ICE-Triebköp-fen prangen, oder die immer wieder getätigte Aussage, dass die Bahn im Fernverkehr aus-schließlich mit Öko-Strom und damit CO₂-frei fahre, haben zu diesem Image genauso beige-tragen, wie die für jeden Bahnfahrer zu beobachtende Tatsache, dass ein elektrisch betriebener Zug tatsächlich keine Abgase verursacht. Es ist nichts zu sehen und nichts zu riechen.

Die seit Jahrzehnten ständig wiederholte Aussage von der „Umweltfreundlichkeit des Bahn-fahrens“ hat in großen Teilen der Bevölkerung dazu geführt, dem Ausbau des Schienenver-kehrs positiv gegenüberzustehen. Zunehmend verstopfte Autobahnen und Straßen tun ein Übriges, so dass es kaum jemanden gibt, der der Lieblingsaussage aller Verkehrspolitiker, „Mehr Verkehr auf die Schiene bringen!“ nicht zustimmen würde.

In einer derart vereinfachten Diskussion sind jedoch wesentliche Aspekte einer ganzheitli-chen ökologischen Bilanzierung von Mobilität nicht berücksichtigt. Um einen objektiven Ver-gleich der verschiedenen Verkehrssysteme zu bekommen, ist es notwendig das jeweilige komplette Verkehrssystem zu betrachten. Dies ist sehr viel mehr als nur die Antriebsenergie; unbedingt müssen die notwendigen Infrastrukturkomponenten mitberücksichtigt werden. Emissionen, die in einer ansonsten gängigen Betrachtungsweise „der Industrie“ oder „dem Bausektor“ zugeschrieben wurden, müssen dem jeweiligen Verkehrssystem zugerechnet und der im jeweiligen System erbrachten Verkehrsleistung zugeordnet werden, solange sie in un-mittelbarem Zusammenhang mit der Erbringung der Verkehrsleistung stehen. Dies gilt für die industrielle Produktion von Autos, Zügen und Flugzeugen genauso wie für den Bau von Straßen, Schienen, Flughäfen, Bahnhöfen und allen weiteren Infrastrukturkomponenten.

Stahl und Aluminium werden beim Bau von Zügen, Autos oder Flugzeugen, Beton und Stahl beim Bau von Straßen, Brücken, Tunneln, Start- und Landebahnen benötigt. Berücksichtigt man die Ursache-Wirkungs-Beziehung, dann müssen Energieverbrauch und entstehende Emissionen für Beton und Stahl für Bahnbrücken oder Tunnel ebenso dem Schienenverkehr zugerechnet werden, wie Stahl für Schienen und Kupfer für die Elektrifizierung.

Diese Studie fokussiert auf den Bahnausbau-Korridor zwischen Hamm und Hannover. Es werden die von WiduLand vorgeschlagenen Überlegungen zum Ausbau und zur Ertüchtigung der bereits existierenden Strecke denen der „Variante Nr. 5 des Planungsbüro Schüßler, Dresden“ im Auftrag des BMVI erstellten Vorplanung für eine neu zu bauende Hochgeschwindigkeitsstrecke (HGS) zwischen Hannover und Bielefeld bzgl. der CO₂-Emissionen gegenübergestellt. Vor dem Hintergrund, dass der von der Deutschen Bahn intendierte Ausbau im Zusammenhang mit dem angedachten „Deutschland-Takt“ eine zeitliche Vorgabe auch auf der Strecke Bielefeld – Hamm mit sich bringt, werden auch Überlegungen für diese Strecke mitberücksichtigt.

Eine allgemeinere Darstellung dieser Sachverhalte, die auch andere Beispiele beinhaltet, ohne speziell auf die Situation im Ausbaukorridor Hamm – Hannover einzugehen, findet der interessierte Leser in (1) und (2).

Nachfolgend wird zunächst die Methodik vorgestellt, anhand derer eine ganzheitliche Bewertung vorgenommen wird. Im Anschluss daran wird exemplarisch dargelegt, welche Klimawirkung die verschiedenen, zur Erbringung einer Verkehrsleistung erforderlichen Komponenten haben. Der Fokus liegt dabei auf den CO₂-Emissionen, da diese nach dem heutigen Wissenstand den größten Einfluss im Kontext der anthropogenen Faktoren zur Erwärmung des Erdklimas haben und in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion die größte Rolle spielen. Andere Faktoren, wie beispielsweise Methan (CH₄) oder Distickstoffmonoxid (N₂O, Lachgas), werden in dieser Studie nicht weiter betrachtet, obwohl auf wissenschaftlicher Sicht Einigkeit darin besteht, dass auch sie Einfluss auf die Veränderungen des Klimas haben.

Nach der ökologischen Betrachtung werden in Kapitel 5 einige **ökonomische Überlegungen** durchgeführt. Hier geht es insbesondere um die zu erwartenden Kosten, den prognostizierten Nutzen und die Verlässlichkeit solcher Überlegungen anhand von Beispielen aus der Vergangenheit.

Im Anschluss daran werden in Kapitel 6 einige grundlegende physikalische Aspekte, die für Verkehrssysteme relevant sind, adressiert. Hier geht es vor allem darum, die „**mechanische Bewegungseffizienz**“ der verschiedenen Verkehrssysteme zu vergleichen. Diese Analyse erlaubt es, grundsätzliche Aussagen über die verschiedenen Verkehrssysteme zu treffen, da sich naturwissenschaftliche Zusammenhänge niemals durch Ideologien, demokratisch gefasste Mehrheitsentscheidungen oder auch durch autokratische Vorgaben verändern lassen.

Anschließend werden in Kapitel 7 einige weitere ökologische Aspekte von Verkehrssystemen aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet wurden, die aber für eine ganzheitliche Beurteilung und einen fairen Vergleich auch von Bedeutung sind.

Im Anhang dieses Textes finden sich Auflistungen der in den Berechnungen verwendeten Brücken- und Tunnelbauwerke, sowie Berechnungen der Energieverbräuche für

exemplarische Beispiele verschiedener Bewegungsabläufe unterschiedlicher Verkehrssysteme. Ein Literatur- und Quellenverzeichnis beschließt dieses Dokument.

1.1 Methodik

Für die vier großen Verkehrssysteme Straße, Schiene, Luft und Wasser ist in der folgenden Tabelle dargestellt, welche Komponenten die jeweiligen Systeme benötigen, um eine Transportleistung erbringen zu können.

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

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

Jedes dieser Systeme benötigt die eigentlichen Verkehrsmittel, also Autos, Züge, Flugzeuge bzw. Schiffe. Ebenso benötigen alle Systeme ihre eigene spezifische Infrastruktur, die sich unterteilen lässt in eine „Knotenpunkt“-Infrastruktur (Bahnhöfe, Flughäfen, Häfen, Parkplätze, etc.), eine „Wege“-Infrastruktur (Straßennetz, Schienennetz, Wasserstraßen, etc.) und eine „Steuerungs“-Infrastruktur (Stellwerke, Signalanlagen, Ampeln, Verkehrszeichen, Flugsicherungssysteme, Leuchttürme, Bojen, etc.). Weiterhin sind in der Tabelle die Energieträger für den Antrieb der Verkehrsmittel aufgeführt.

Um zu einer korrekten ökologischen Bewertung der jeweiligen Systeme zu kommen, müssen immer alle für das jeweilige Verkehrssystem notwendigen Komponenten betrachtet werden. Ganzheitliche Ursache-Wirkungs-Mechanismen zu betrachten, heißt also, dass sämtliche klimarelevanten Emissionen aus der Fahrzeugproduktion, dem Straßenbau und der Wartung und Pflege der Straßeninfrastruktur, der Produktion sämtlicher Verkehrszeichen und Ampeln inkl. des Aufstellens und des Betriebs (Strom, Wartung, etc.) ermittelt und in die

¹ LNG: Liquefied Natural Gas

Gesamtbilanz einzubeziehen sind. Analog ist im Schienenverkehr nicht nur der Strom zu betrachten, mit dem die Züge angetrieben werden, sondern auch der Bau und die Wartung der Züge und des Schienennetzes, der Bau, der Betrieb und die Pflege der Bahnhöfe, sowie Bau und Betrieb aller Stellwerke, Signalanlagen, Weichen, etc., die zwingend erforderlich sind, um einen geregelten und sicheren Schienenverkehr zu ermöglichen. In der Luftfahrt sind dementsprechend Bau und Wartung der Flugzeuge sowie der Flughäfen und deren Betrieb zu berücksichtigen, ebenso alles, was mit der Flugsicherung zu tun hat. Es fällt auf, dass die Wege-Infrastruktur des Verkehrssystems Luftfahrt nichts anderes als „Luft“ ist; diese Infrastruktur muss weder gebaut noch gewartet werden, sie ist kostenlos verfügbar und es entstehen keinerlei CO₂-Emissionen. Gleiches gilt für die Schifffahrt, zumindest was die internationale Seeschifffahrt betrifft. Die Ozeane sind einfach da, man muss sie nicht bauen und instandhalten, somit entstehen auch bei diesem Verkehrssystem für die Wege-Infrastruktur keinerlei Kosten oder Emissionen.² Mit dem Verkehrssystem Schifffahrt werden wir uns in dieser Studie nicht weiter befassen, da es, von Fährverbindungen abgesehen, für den Personenverkehr faktisch keine Rolle spielt. Auch auf die Systeme Straße und Luftfahrt werden wir nur vereinzelt eingehen, wenn es für wichtige Vergleiche mit dem System Schiene unumgänglich ist.

Ein weiterer wichtiger Punkt, die Effizienz der verschiedenen Verkehrssysteme betreffend, ist die Art und Weise, wie der Bewegungsvorgang aus physikalischer Sicht abläuft. Die Bewegungsverläufe sowie die physikalischen Größen, die die notwendigen Energiemengen beeinflussen, spielen hier eine wesentliche Rolle und werden in dieser Studie in Kapitel 6 untersucht und bewertet.

1.2 Materialien und deren CO₂-Bilanz

Im industriellen Umfeld gehören zu den größten Energieverbrauchern und CO₂-Emittenten die Stahlindustrie, die Aluminiumproduktion, die Kupferherstellung und die Zement- bzw. Betonindustrie (3), (4), (5).

Um eine Tonne (1.000 kg) Stahl im Hochofen zu produzieren, werden rund 20 Gigajoule (GJ) Energie benötigt, das entspricht etwa 5.600 MWh (Megawattstunden). Da die Energie für die Stahlproduktion primär aus fossilem Koks stammt, fallen für die Produktion von 1 t Rohstahl etwa 2 t CO₂ an (3), (6), (7). Dies ist nur die Energie- und Schadstoffbilanz aus dem Hochofen- und Kokerei-Prozess, alles, was im Walzwerk oder bei einer weiteren Veredlung des Rohstoffs Stahl noch anfällt, muss jeweils noch hinzugerechnet werden. Für Aluminium ist die Klimabilanz noch deutlich negativer als bei Stahl; um eine Tonne reines Aluminium zu produzieren, fallen je nach verwendeter Primärenergie zwischen acht und 12 Tonnen CO₂ an (8).

Um zu verstehen, warum die Produktion von Metallen wie Eisen (Stahl), Kupfer oder Aluminium bei der Herstellung solch große Mengen CO₂ verursachen, ist es notwendig, einen Blick auf grundlegende chemische Prozesse zu werfen. Die meisten Metalle, die wir in unserer industrialisierten Welt verwenden, kommen in der Natur nicht direkt als Metalle (in

² Die Tatsache, dass die Wege-Infrastruktur für die Verkehrssysteme Luftfahrt und Schifffahrt in Form von Luft und Ozeanen „kostenlos“ zur Verfügung steht, dass sie keine Kosten verursacht und beim Bau keinerlei CO₂ oder sonstige Schadstoffe emittiert werden, bedeutet selbstverständlich nicht, dass Luft und Ozeane keine schützenswerten Systeme sind. Es geht in diesem Kontext lediglich um ihre Rollen als wichtige Komponenten von Verkehrssystemen.

gediegener Form), sondern in Form von Erzen, vor. Erze sind natürlich vorkommende Rohstoffe, in denen die Metallatome gemeinsam mit Atomen anderer Elemente verbunden sind. Bei Eisen ist dieses andere Element häufig Sauerstoff, Eisenerz besteht überwiegend aus Eisenoxid (Fe_3O_4 , Fe_2O_3). In einem komplexen industriellen Prozess muss sehr viel Energie aufgewendet werden, um den Sauerstoff vom Eisen zu trennen; neben der Energie bedarf es dafür eines Materials, mit dem der Sauerstoff gebunden wird. Bei der Eisenherstellung (Stahlproduktion) wird klassischerweise Kohlenstoff (C) in Form von Koks eingesetzt³. Zum einen liefert er bei der Verbrennung die notwendige Energie, zum anderen bindet er den Sauerstoff, den man aus dem Ausgangsmaterial Eisenerz herausbekommen möchte und genau das führt dann zu den großen Mengen Kohlenstoffdioxid (CO_2).

Auch die Betonproduktion ist, nicht zuletzt wegen der Verwendung von Zement, für den in der Herstellung schon rund eine Tonne CO_2 pro Tonne Zement entsteht, ein ökologisch problematischer Werkstoff. Auch hier ist ein grundlegendes Verständnis der chemischen Zusammenhänge hilfreich. Der Grundstoff von Zement ist Calciumoxid (CaO), dieses wird aus Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO_3) gewonnen. Unter Einsatz von viel Energie (Temperaturen von 1.700 Grad C) wird das Calciumcarbonat aufgespalten; dabei entsteht aus jedem Molekül Calciumcarbonat ein Molekül Calciumoxid und ein Molekül Kohlenstoffdioxid ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). In der Zementherstellung stammt nur ein kleiner Teil der CO_2 -Mengen aus der notwendigen Energie für diesen Prozess; der weitaus größere Teil kommt direkt aus der chemischen Reaktion.

Trotz Fortschritten bei der Energieeffizienz muss man pro m^3 Beton auch heute noch von mindestens 300 kg CO_2 ausgehen, die freigesetzt werden, lange bevor der Beton im Bauwerk anfangen kann auszuhärten, in Abhängigkeit des Zementanteils können es auch mehr als 400 kg sein. Am Rande sei angemerkt, dass die weltweite Zement- und Betonproduktion je nach Schätzung zwischen sechs und acht Prozent der gesamten jährlichen CO_2 -Emissionen verursacht, das ist das Drei- bis Vierfache dessen, was der gesamte weltweite Luftverkehr in seiner CO_2 -Bilanz stehen hat (9), (10), (11), (12). Zwar wird intensiv daran geforscht, die Zement- und Betonproduktion emissionsärmer zu machen, der große Durchbruch ist bisher aber nicht gelungen (13).

Aus klimatischer Sicht ist es dabei irrelevant, ob CO_2 und andere Emissionen bei der Stahl- oder Zementproduktion in China, in Indien, in Indonesien oder in Deutschland entstehen.

Die Emissionen, die das globale Klima beeinflussen, sind zunächst einmal da; Atmosphärenphysiker sind sich heute weitgehend einig, dass der Erwärmungseffekt von CO_2 in der Atmosphäre nach etwa 10 Jahren eintritt und die Klimawirkung von CO_2 -Molekülen aufgrund der Verweildauer in der Atmosphäre bei rund 100 Jahren liegt (14). Regionale oder gar lokale Unterschiede bzgl. der klimatischen Wirkung von CO_2 aufgrund des Standortes von CO_2 -Emittenten sind daher ausgeschlossen.

³ Der Einsatz von Wasserstoff (H_2) zur Produktion von „grünem Stahl“ wird heute bereits vielfach diskutiert. Dabei wird aber oft ignoriert, dass zunächst eine erhebliche Umrüstung der Stahlwerke notwendig wäre und darüber hinaus sichergestellt sein müsste, dass tatsächlich sehr großen Mengen Wasserstoff verfügbar wären, die CO_2 -neutral hergestellt worden sind. Damit ist aus heutiger Sicht auf absehbare Zeit nicht zu rechnen, denn die Energiebilanz des Hydrolyse-Prozess zur Wasserstoffproduktion ist sehr schlecht. Rund 60% der eingesetzten Primärenergie gehen in dem chemischen Prozess, aus Wasser Wasserstoff zu gewinnen, verloren.

Grundsätzlich ist es wichtig, ein grundlegendes Verständnis der wesentlichen chemischen und physikalischen Prozesse zu haben, die der Produktion von Werkstoffen zugrunde liegen. Behauptungen, dass bereits das Ersetzen von fossiler Energie durch ökologisch erzeugte Energie (Windstrom, Solarstrom) zu CO₂-freien Produkten führt, sind in vielen Fällen falsch und zeugen lediglich davon, dass die oftmals sehr komplexen Sachverhalte nicht verstanden wurden.

2 CO₂-Emissionen der Wege-Infrastruktur (Bahntrasse)

Wir werden nachfolgend auf der Basis des Schüßler-Plans Nr.5 eine Abschätzung der beim Bau der Bahntrasse entstehenden CO₂-Emissionen vornehmen. Die notwendigen Informationen über die Trasse, neu zu errichtende Bauwerke (Tunnel, Brücken) basieren auf der Studie „Effizienter Bahnausbau im Korridor Hamm – Hannover“ vom Bahnzentrum Ingenieurbüro, Bielefeld (15) sowie auf weiteren, explizit für diese Arbeit von Herrn Dr. Jan Hinrich Thies zur Verfügung gestellten Daten, die seitens der Deutschen Bahn bereitgestellt werden (16), (17).

Analog werden wir die gleichen Berechnungen für die in (15) aufgezeigte Alternative, den Vorschlag der Initiative WiduLand e.V., durchführen und gegenüberstellen.

Es ist wichtig zu betonen, dass für alle nachfolgenden Berechnungen Annahmen getroffen werden mussten, die sich im Nachhinein bis zur Realisierung einer Baumaßnahme noch ändern können. Ohne die konkrete und endgültig festgelegte Trasse und ohne eine spezifische Bauwerksplanung lassen sich beispielsweise die notwendigen Beton- und Stahlmengen für Brücken und Tunnel nur näherungsweise auf der Basis von in der Vergangenheit bereits gebauter Bauwerke abschätzen. **Sobald eine genaue Trassenplanung inklusive der einzelnen zu errichtenden Bauwerke vorliegt, können die dieser Studie zugrundeliegenden Annahmen in eine konkretere Detailplanung überführt werden.** Die nachfolgend unterstellten Materialmengen entstammen der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit beauftragten Publikation „Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland“ in der 3. überarbeiteten Fassung von 2015 (18).

Der Bau von Hochgeschwindigkeitstrassen ist extrem ressourcenintensiv und aufwändig. Es bedarf sehr langer gerader Strecken, einerseits um die Züge auf Geschwindigkeiten von 300 km/h zu beschleunigen, und andererseits, um diese Geschwindigkeiten dann auch möglichst lange fahren zu können. Jede Kurve und jeder Anstieg sind für solch hohe Geschwindigkeiten kontraproduktiv, weswegen die Trassen „wie ein Strich“ durch die Landschaft gezogen werden müssen. In Abhängigkeit der gegebenen Topografie sind dann sehr viele Brücken- und Tunnelbauwerke notwendig.

2.1 Bahnbrücken

Das Bahnnetz in Deutschland umfasst etwa 33.000 km und mehr als **25.000 Brücken**, von denen die meisten eher kurz sind und lediglich kleine Bäche, schmale Straßen oder Feldwege überqueren, die längste Brücke hingegen ist mehr als 8,6 km lang, die höchste Brücke

überspannt die Wupper in mehr als 100 m Höhe (19). Im statistischen Mittel kommt auf jeder Bahnstrecke nach 1,3 km eine Brücke.

In (18) wurde auf der Basis 15 verschiedener Brücken der Neubaustrecken (NBS) Hannover-Würzburg, Köln-Frankfurt, Mannheim-Stuttgart und Nürnberg-Erfurt untersucht, welche Materialmengen für die Brücken je Meter Länge gebraucht wurden; folgende Material- / Aushubmengen je Meter Bahnbrücke wurden ermittelt⁴:

- **Stahl:** 2,67 – 7,24 t/m; Mittelwert: **4,22 t/m** Länge
- **Beton:** 17,5 - 48,3 m³/m; Mittelwert: **31,6 m³/m** Länge
- **Erdaushub:** 10,34 - 58,88 m³/m; Mittelwert **27,75 m³/m** Länge

Im Weiteren werden in dieser Studie die errechneten Mittelwerte angesetzt; für eine **100 m lange zweigleisige Bahnbrücke aus Stahlbeton wären demnach 422 Tonnen Stahl, 31.600 m³ Beton und 27.750 m³ Erdaushub** anzusetzen.

Sollten in der Planung Brücken vorhanden sein, auf denen mehr als zwei Gleise verlaufen sollen, werden entsprechende Aufschläge vorgenommen. Bei drei Gleisen würden 150%, bei vier Gleisen 200% der o.g. Werte kalkuliert. Bei einer eingleisigen Brücke werden 50% der Werte unterstellt. Sämtliche in die Berechnungen mit einbezogenen Brückenbauwerke sind am Ende dieser Studie im Anhang in den Abschnitten 9.1.1, 9.2.1 und 9.3.1 aufgeführt.

2.1.1 *Bahnbrücken Schüßler-Plan Nr.5*

Der Schüßler-Plan Nr.5 sieht für die Neubaustrecke insgesamt **42 neue Brückenbauwerke mit einer Gesamtlänge von fast 14 km** vor, fünf Brücken davon sind mehrgleisig, eine neue Brücke wäre lediglich eingleisig.

Mit den zuvor erläuterten Annahmen werden für diese **neuen Brücken- und Überführungsbauwerke in Summe 67.123 t Stahl und 505.039 m³ Beton** benötigt und es fallen **443.507 m³ Aushub** an.

2.1.2 *Bahnbrücken Vorschlag WiduLand*

Der von der Initiative WiduLand unterbreitete Vorschlag sieht in Summe **51 neue Eisenbahn- und Straßenüberführungsbauwerke vor, die insgesamt jedoch nur eine Gesamtlänge von 1,3 km** haben, die mit den gleichen Annahmen wie die Stahlbetonbrücken und -überführungen berechnet werden.

Für diese neuen Bauwerke würden demzufolge **20.848 t Stahl und 156.113 m³ Beton** benötigt und es fielen **137.093 m³ Aushub** an.

⁴ Die große Spannweite der Materialmengen bei verschiedenen Brücken ist darauf zurückzuführen, dass bei Brücken die Höhe einen großen Einfluss auf die Materialmengen der zu bauenden Brückenpfeiler hat, aber auch der jeweilige Untergrund maßgeblichen Einfluss auf die jeweiligen Fundamentkonstruktionen hat.

2.2 Bahntunnel

Insgesamt gab es in Deutschland im Jahr 2022 760 Bahntunnel. Allein in den letzten 10 Jahren sind 68 neu Tunnelbauwerke hinzugekommen. Die 55 längsten im Betrieb oder im Bau befindlichen Tunnel haben eine Gesamtlänge von mehr als 280 km, rund 265 km Tunnelstrecken wurden in den letzten 30 Jahren in erster Linie für die Schnellfahr- und Hochgeschwindigkeitsstrecken gebaut (20).

Gerade die für den Hochgeschwindigkeitsverkehr gebauten Bahntrassen sind besonders tunnel- und brückenintensiv, denn diese Strecken müssen aus physikalischen Gründen häufig „wie ein Strich durch die Landschaft“ geplant und gebaut werden, ohne auf topographische Gegebenheiten Rücksicht zu nehmen. Dies zeigt sich dann auch im direkten Vergleich mit dem anderen landgebundenen Verkehrssystem Straße. Die 180 km lange Schnellfahrstrecke der DB zwischen Köln und Frankfurt benötigt rund 46 km Tunnel, das sind 25% der gesamten Strecke. Die mehr oder weniger durchgängig parallel verlaufende Autobahn A3 kommt ganz ohne Tunnel aus, obwohl sie genau wie die Bahn Westerwald und Taunus komplett durchquert.

Der grundsätzliche Unterschied der „Tunnelintensität“ zeigt sich auch an folgenden Zahlen: Die zuvor bereits genannten 265 Tunnelkilometer, die in den letzten Jahren für die Schnellfahrstrecken gebaut wurden, machen fast 10% der rund 2.800 km des Schienennetzes aus, die mit 200 km/h oder mehr befahren werden können. Das Bundesfernstraßennetz besteht hingegen aus etwas mehr als 50.000 km, davon gut 13.000 km Autobahnen und knapp 38.000 km Bundesstraßen. Laut BMDV gab es hierfür im Jahr 2019 insgesamt 270 Tunnelbauwerke mit einer Gesamtlänge von rund 270 km (21). Etwa 0,54% der Bundesfernstraßen verlaufen demzufolge durch Tunnel.

In (18) wurden auch bereits gebaute Bahntunnel bzgl. ihres Materialverbrauchs untersucht. Für die 15 betrachteten Tunnel an NBS der letzten Jahre ergaben sich folgende Materialverbräuche je Meter zweigleisiger Bahntunnel:

- **Stahl:** bis zu 6,9 t/m; Mittelwert: **2,1 t/m** Länge
- **Beton:** 11 – 79,6 m³/m; Mittelwert: **40,2 m³/m** Länge
- **Erdaushub:** 47,5 – 222,4 m³/m; Mittelwert **127,4 m³/m** Länge

Bei all diesen Tunnel handelte es sich um zweigleisige Tunnel, d.h., dass eine Tunnelröhre gebaut wurde, in der die beiden Gleise für jeweils eine Fahrtrichtung nebeneinander liegen. Aus Sicherheitsgründen werden in Deutschland jedoch Tunnel ab einer Länge von 500 m inzwischen grundsätzlich nur noch eingleisig gebaut. Dies bedeutet, dass für jedes Gleis eine eigene Tunnelröhre vorhanden sein muss. Diese kann natürlich dann einen etwas kleineren Querschnitt haben, weil nur ein Gleis vorhanden ist, aber für eine zweigleisige Strecke müssen dann bei jedem Tunnel zwei separate Tunnelröhren gebaut werden. Diesem Sachverhalt tragen wir dahingehend Rechnung, dass wir für die zweite Tunnelröhre einen Aufschlag von 80% auf die o.g. Werte veranschlagen.⁵

⁵ Da eingleisige Bahntunnel einen geringeren Tunnelquerschnitt haben und deshalb weniger Stahlbeton in der Tunnelschale verbaut werden muss, muss nicht von einer Verdopplung ausgegangen werden.

2.2.1 Tunnelbauwerke Schüßler-Plan Nr.5

Der zum Zeitpunkt der Berechnungen dieser Studie vorliegende Planungsstand sieht vor, dass auf der neu zu bauenden Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Hannover und Bielefeld ausschließlich eingleisige Tunnelröhren gebaut werden sollen.

Der Schüßler-Plan Nr.5 sieht für die Neubaustrecke insgesamt **18 neue Tunnelbauwerke mit einer Gesamtlänge von fast 20 km** vor.

Mit den zuvor erläuterten Annahmen werden für diese **neuen Tunnelbauwerke in Summe 74.050 t Stahl und 1.417.532 m³ Beton** benötigt und es fallen **4.492.379 m³ Aushub** an.

2.2.2 Tunnelbauwerke Vorschlag WiduLand

Der von der Initiative WiduLand unterbreitete Vorschlag sieht in Summe **nur 5 neue Tunnelbauwerke vor, die eine Gesamtlänge von gut 2 km** haben. Da keiner dieser Tunnel länger als 500m sein wird, könnten alle Tunnel zweigleisig gebaut werden.

Für diese neuen Bauwerke würden demzufolge **4.263 t Stahl und 81.606 m³ Beton** benötigt und es fielen **258.622 m³ Aushub** an.

2.3 Schienen und Unterbau

Nicht nur Tunnel und Brücken sind bei Bahnstrecken Material- und damit CO₂-intensiv, sondern auch der Bau der eigentlichen Bahntrasse. Für den sogenannten Unterbau fallen laut (18) **14.896 Tonnen Kies und Sand** (in der sogenannten Planumschicht) **je Kilometer** zweigleisiger Hochgeschwindigkeitsstrecke an.

Für den Oberbau gibt es zwei grundsätzliche Varianten:

- Betonschwellen mit Schotter (Schienen werden auf den Schwellen befestigt) mit folgenden Materialmengen je km:
 - 7.099 t Schotter
 - 380 m³ Beton
 - 39 t Stahl/Eisenteile
 - 4 t Kunststoffteile

- „Feste Fahrbahn“ (Schienen liegen auf einem durchgehenden Betonbett) mit folgenden Materialmengen je km:
 - 2.264 m³ Beton
 - 133 t Bewehrungsstahl

In jedem Fall muss dann noch der **Stahl für die Schienen** berücksichtigt werden, hier fallen bei einer zweigleisigen Strecke zusätzlich **241,4 Tonnen Stahl je km** an.

Üblicherweise wird für neue Hochgeschwindigkeitsstrecken seit geraumer Zeit immer eine „Feste Fahrbahn“ gebaut.

2.3.1 Schienen inkl. Unterbau für Schüßler-Plan Nr.5

Der Schüßler-Plan Nr.5 sieht 78 km neue zweigleisige HGS vor, die voraussichtlich komplett als „Feste Fahrbahn“ realisiert würde. Da insgesamt 4,6 km dieser Strecke nicht nur zweigleisig, sondern 500 m davon dreigleisig und 1.100 m siebengleisig realisiert werden sollen, müssen 4,6 km zusätzlich kalkuliert werden, so dass insgesamt von 82,6 km neuer zweigleisiger HGS auszugehen ist.

Dafür werden auf Basis der beschriebenen Annahmen

- 1.230.410 t Kies und Sand,
- 187.006 m³ Beton und
- 30.892 t Schienen- und Bewehrungsstahl benötigt.

2.3.2 Schienen inkl. Unterbau Vorschlag WiduLand

Der von WiduLand unterbreitete Vorschlag kommt mit 45 km neuer Trasse aus, da zwischen Seelze und Minden zwei zusätzliche Gleise zu bauen wären. Da der Vorschlag von WiduLand keine Strecke für Geschwindigkeiten bis 300 km/h vorsieht, wird man auf die „klassische“ Bauweise mit Betonschwellen und Schotter zurückgreifen können. In Summe wären folgende Materialien notwendig:

- 989.775 t Kies, Sand und Schotter
- 17.100 m³ Beton
- 12.618 t Stahl

2.4 Elektrifizierung

Auch die Elektrifizierung einer Bahnstrecke ist sehr material- und damit CO₂-intensiv. Allein der Fahrdrabt aus Kupfer (120 mm² Querschnitt), der auf Bahnstrecken in Deutschland üblich ist, wiegt pro Kilometer etwa eine Tonne (22). Im Produktionsprozess von Kupfer fallen pro Tonne fast 7 t CO₂ an, die Weiterverarbeitung des reinen Metalls zu Drähten noch nicht eingerechnet (5). Der eigentliche Fahrdrabt sowie die diversen Halte- und Spannseile, die aus Kupfer, Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung) und Stahl bestehen, sowie die dazugehörigen Masten müssen hergestellt und gebaut werden, auch dafür werden Ressourcen benötigt. Für das notwendige Kupfer und die anderen verwendeten Metalle ist zu berücksichtigen, dass es in Deutschland keine nennenswerten Vorkommen davon gibt und der ökologische Fußabdruck beginnend mit den Erz-Minen in den Herkunftsländern, über die Verarbeitung zu Metall bis hin zur Herstellung der Drähte bzw. Seile zu berücksichtigen ist. Bei Zinn, dem Element, das neben Kupfer in Bronze enthalten ist, fallen zwischen 10 und 16 t CO₂ an, um eine Tonne des Reinmetalls zu gewinnen (5), (23). Für Bronze wird in (5) ein CO₂-Wert von gut 7 t je Tonne Metalllegierung angegeben. Neben der mehr als 1 Tonne Kupfer für den Fahrdrabt kommen für Halteseile noch einmal mehrere Tonnen Metall pro km Bahngleis, und zusätzlich etliche Tonnen Beton und Stahl für die Masten und deren Fundamente hinzu.

In (18) werden folgende Materialmengen für die Elektrifizierung einer **zweigleisigen Hochgeschwindigkeitsstrecke** angegeben, wobei eine Unterscheidung zwischen Tunnelstrecke und Strecke ohne Tunnel vorzunehmen ist. Im Tunnel benötigt man keine Masten für die

Elektrifizierung, der Fahrdrabt kann dort mittels sogenannter „Hängesäulen“ direkt an der Tunnelschale befestigt werden. Oberleitungsmasten wiegen je nach Länge und Material durchschnittlich zwischen 1,5 und 2 Tonnen pro Stück (24).

- **Hochgeschwindigkeits-Tunnelstrecke je km**
 - 2,1 t Kupfer,
 - 2,5 t Bronze
 - 6,6 t Stahl
 - 4,3 t Aluminium
 - 0,1 m³ Beton

- **Hochgeschwindigkeits-Strecke außerhalb von Tunnel je km**
 - 2,1 t Kupfer,
 - 2,5 t Bronze
 - 51 t Stahl
 - 3,5 t Aluminium
 - 38,2 m³ Beton

Bei Strecken, die **nicht für Hochgeschwindigkeitsverkehr** ausgelegt sind, können die Masten entweder aus Beton oder Stahl sein; ein Betonfundament für jeden Mast ist jedoch immer notwendig. Folgende Mengengerüste für eine zweigleisige Strecke gelten:

- **Tunnelstrecke je km**
 - 2,0 t Kupfer
 - 1,3 t Bronze
 - 5,3 t Stahl
 - 3,5 t Aluminium
 - 0,1 m³ Beton

- **Strecke außerhalb von Tunnel mit Stahlmasten je km**
 - 2,0 t Kupfer,
 - 1,3 t Bronze
 - 51,4 t Stahl
 - 3,5 t Aluminium
 - 7,5 m³ Beton

- **Strecke außerhalb von Tunnel mit Betonmasten je km**
 - 2,0 t Kupfer,
 - 1,3 t Bronze
 - 41,4 t Stahl
 - 3,5 t Aluminium
 - 31,1 m³ Beton

Um eine Vorstellung zu bekommen, welche Materialmengen für die Elektrifizierung einer konkreten Hochgeschwindigkeitsstrecke insgesamt benötigt werden, sind nachfolgend einige Zahlen der rund 170 km langen Strecke zwischen Köln und Frankfurt angegeben, die in den 1990er-Jahren gebaut wurde. 4.000 Oberleitungsmasten wurden außerhalb der Tunnel

gesetzt, in den Tunnel sind 1.600 „Hängesäulen“ verbaut. In Summe wurden für die 170 km lange Strecke rund 3.300 km Drähte, Seile und Kabel für die Elektrifizierung benötigt (25).

Weiterhin ist zum Thema Elektrifizierung zu berücksichtigen, dass in Deutschland für die elektrifizierten Bahnstrecken ein eigenes Energieversorgungsnetz von über 7.900 km Leitungslänge im Hintergrund betrieben wird (26). Dieses bahneigene Hochspannungsnetz (mit einer Spannung von 110 Kilovolt, kV) hat eigene Überlandmasten und Hunderte eigene Umformerwerke, Gleichrichter und Transformatoren, um den Bahnstrom auf die für den Bahnbetrieb notwendigen 15kV und 16 ²/₃ Hz zu transformieren. All dieser Aufwand steht nicht in direktem Zusammenhang mit der in dieser Studie untersuchten Bahnstrecke; es muss aber immer berücksichtigt werden, dass der Sachverhalt, die Energie für einen elektrisch betriebenen Zug nicht im Tank mitführen zu müssen, keineswegs „umsonst zu haben“ ist, sondern im Zusammenhang mit der stattdessen notwendigen Elektrifizierungs-Infrastruktur sehr große Mengen CO₂ verursacht.

2.5 CO₂-Abschätzungen aus dem Bau der Infrastruktur

Nachdem die zu erwartenden Materialmengen auf der Basis bisheriger Infrastrukturprojekte der Bahn abgeschätzt wurden, folgt im nächsten Schritt ein Vergleich der CO₂-Mengen, die durch die Produktion der Materialien entstehen.

Notabene: Alle nachfolgenden Übersichten zu abgeschätzten CO₂-Mengen sind direkt aus einem Excel-Tabellenkalkulationsprogramm übernommen. Excel rechnet intern mit mehr Nachkommastellen, viele der dargestellten Zahlen sind deshalb gerundet. Das Saldieren der gerundeten Werte kann deshalb zu abweichenden Ergebnissen führen.

2.5.1 CO₂-Belastungen aus Materialproduktion für Schüßler-Plan Nr. 5

				Brücken & Tunnel	
				Brücken	Tunnel (eingleisig)
		Stahl (t)		67.123	74.050
		CO ₂ Rohstahl (t / t)	2,18	146.329	161.429
		Beton (m ³)		505.039	1.417.532
		CO ₂ Beton Produktion (t / m ³)	0,3	151.512	425.260
		CO ₂ Beton Transport (t / m ³)	0,0226	11.404	32.008
		Erdaushub (m ³)		443.507	4.492.379
		CO ₂ -Fußabdruck Erdaushub (t / m ³) ⁶	0,00145	642	6.505
		Summe CO₂ (t)		935.089	

Nach aktuellen Planungen sind sämtliche Tunnel auf der Neubaustrecke als eingleisige Tunnel ausgelegt, was in den durchgeführten Berechnungen berücksichtigt wurde. Sollten sich diesbezüglich Änderungen ergeben, lässt sich die Abschätzung mit geringem Aufwand korrigieren.

⁶ Für den Erdaushub wurde der CO₂-Fußabdruck je Kubikmeter berechnet, indem Annahmen über den Abtransport mit gängigem Baufahrzeugen gemacht wurden. Es wurde unterstellt, dass der Transport über eine Entfernung von durchschnittlich 10 km erfolgt und dass die Fahrzeuge für diese Strecke je m³ Aushub rund 0,5 l Diesel verbrauchen.

Für die neu zu bauende Strecke ergeben sich folgende Zahlen zur CO₂-Belastung:

Neu zu bauende Strecke: 82,6 km

CO₂ (t)

Feste Fahrbahn je km	
Unterbau Kies/Sand 14.896 Tonnen	5.967
2.264 m ³ Beton inkl. Transport	60.325
241,4 t Schienenstahl, 133 t Bewehrungsstahl	67.417
Zwischensumme:	133.709

ODER

Betonschwellen mit Schotter je km	
Unterbau Kies/Sand 14.896+7.099 Tonnen	8.811
380 m ³ Beton inkl. Transport	10.125
241 t Schienenstahl, 39 t Eisenteile	50.491
Zwischensumme:	69.428

Der Wert für den Neubau einer Strecke mit Betonschwellen und Schotter ist hier lediglich informativ angegeben; für eine Neubaustrecke, die für Züge bis zu einer Geschwindigkeit von 300 km/h ausgelegt ist, kommt diese Bauweise nicht infrage.

Auf Basis der in 2.4 ausgeführten Sachverhalte ergibt sich für die **Elektrifizierung** einer zweigleisigen Hochgeschwindigkeitsstrecke im **Tunnel eine CO₂-Belastung von 91,4 t je km**, für Strecken **außerhalb von Tunnel** sind es aufgrund der notwendigen Masten **199,7 t CO₂ je km**. Die insgesamt 82,6 km neue Strecke beinhalten 19,6 Tunnelkilometer, so dass die **Elektrifizierung der Strecke mit 14.371,4 t CO₂ zu Buche schlägt**.

2.5.2 CO₂-Belastungen aus Materialproduktion bei Bau für Vorschlag WiduLand

Brücken & Tunnel			
		Brücken	Tunnel (zweigleisig)
	Stahl (t)	20.848	4.263
	CO ₂ Rohstahl (t / t)	2,18	45.449
	Beton (m ³)	156.113	81.606
	CO ₂ Beton Produktion (t / m ³)	0,3	46.834
	CO ₂ Beton Transport (t / m ³)	0,0226	3.525
	Erdaushub (m ³)	137.093	258.622
	CO ₂ -Fußabdruck Erdaushub (t / m ³)	0,00145	199
	Summe CO₂ (t)	131.998	

Da die in diesem Vorschlag neu zu bauenden Tunnel jeweils kürzer als 500 m sind, sind sie in der obigen Berechnung als zweigleisige Tunnelbauwerke ausgelegt. Sollten sich diesbezüglich Änderungen ergeben, lassen sich die Abschätzungen mit geringem Aufwand korrigieren.

Für die neu zu bauende Strecke ergeben sich folgende Zahlen zur CO₂-Belastung:

Neu zu bauende Strecke: 45 km

CO₂ (t)

Feste Fahrbahn je km	
Unterbau Kies/Sand 14.896 Tonnen	3.251
2.264 m ³ Beton inkl. Transport	32.864
241,4 t Schienenstahl, 133 t Bewehrungsstahl	36.729
Zwischensumme:	72.844

ODER

Betonschwellen mit Schotter je km	
Unterbau Kies/Sand 14.896+7.099 Tonnen	4.800
380 m ³ Beton inkl. Transport	5.516
241 t Schienenstahl, 39 t Eisenteile	27.507
Zwischensumme:	37.824

Für die Elektrifizierung ergeben sich auf Basis der in 2.4 erläuterten Zahlen für den **Widuland-Vorschlag 7.666 t CO₂** bei der Verwendung von Stahlmasten **oder 7.031 t CO₂** bei der Verwendung von Betonmasten. Dies ist wie zuvor ausschließlich die CO₂-Menge, die bei der Produktion der Materialien entsteht.

2.5.3 Ausbauabschnitt Hamm – Bielefeld

Wie zuvor bereits erwähnt bedeutet der Ausbau der Strecke Hannover – Bielefeld auf Basis des Schüßler-Plans Nr. 5 und unter Zugrundlegung des „Deutschlandtakts“ und den dort vorgegebenen Fahrzeiten auch, dass die Strecke Hamm – Bielefeld ebenfalls als Hochgeschwindigkeitsstrecke auszubauen ist. Vor diesem Hintergrund wurden auch Berechnungen für den Bau dieses Abschnitts durchgeführt; die Detailinformationen zu den einzelnen Bauwerken finden sich in Abschnitt 9.2.

Werden für diesen Abschnitt die gleichen Berechnungen für Brücken- und Unterführungsbauwerke sowie den Neubau der Trasse durchgeführt, ergeben sich **weitere 197.660 Tonnen CO₂** aus der Materialproduktion sowie für den Abtransport des Erdaushubs. Bei der Trasse wurde angenommen, dass sie mit einer „festen Fahrbahn“ errichtet wird.

Auf der Basis des Vorschlags von **Widuland sind keine Änderungen im Streckenabschnitt Hamm – Bielefeld erforderlich.**

3 Vergleich Schüßler-Plan Nr.5 und Vorschlag WiduLand

Auf Basis der zuvor durchgeführten Berechnungen ergeben sich für die

- Variante **Schüßler-Plan Nr. 5 CO₂-Emissionen in Höhe von 1.083.170 Tonnen**, und für den
- Vorschlag **WiduLand CO₂-Emissionen in Höhe von 177.488 Tonnen**.

Der Vorschlag von WiduLand kommt beim CO₂ aus der Materialproduktion somit auf einen Wert von lediglich **16,4%** des Wertes im Vergleich zu den Emissionen, die beim Bau der HGS gemäß Schüßler-Plan entstehen.

Zu den errechneten Angaben der CO₂-Emissionen muss angemerkt werden, dass sie in jedem Fall unvollständig sind, da sie sich überwiegend auf die Produktion der Baustoffe (Beton, Zement, Kies, Sand, Schotter, etc.) sowie der Metalle (Eisen/Stahl, Kupfer, Aluminium, etc.) beziehen. Die CO₂-Mengen für die Stahl-, Aluminium-, Kupfer- und Betonproduktion entstammen den zuvor bereits erläuterten Quellen und Berechnungen. Die CO₂-Emissionen für den Bau von Infrastruktur sind jedoch immer erheblich größer als das, was sich aus dem Materialverbrauch errechnet. Dies gilt auch hier, sowohl für die Schüßler-Plan-Variante als auch für den Vorschlag von WiduLand.

Energie- und damit schadstoffintensiv ist beispielsweise auch der Transport der Materialien bis zur Baustelle, der sich je nach Produktions- und Verwendungsort über Hunderte oder gar Tausende Kilometer erstrecken kann. Für die Anlieferung des Betons wurde in den zuvor durchgeführten Berechnungen unterstellt, dass eine Anlieferung über eine Wegstrecke von 100 km erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Beton zwar häufig direkt an der Baustelle gemischt wird, allerdings müssen die jeweiligen Rohstoffe (Zement, Sand, Kies, etc.) ebenfalls bis zur Betonmischanlage angeliefert werden. Wir haben zudem unterstellt, dass die Anlieferung stets über das existierende Straßennetz erfolgt und keine Baustraßen angelegt werden müssen. Der angegebene Wert mit 22,6 kg CO₂ für den Transport des Betons je m³ ist sehr konservativ abgeschätzt und beruht ausschließlich auf dem Dieserverbrauch der Baufahrzeuge, der mit 43 l / 100km angenommen wurde. Analoge Abschätzungen wurden für den Abtransport des Aushubs vorgenommen; hier wurde unterstellt, dass jeder m³ Erd- oder Gesteinsaushub lediglich 10 km weit abtransportiert werden muss.

Allerdings müssen sämtliche Materialien nach der Anlieferung auch noch verbaut werden. Die übliche Energieversorgung auf Baustellen ist, mangels Alternative, Dieseldieselkraftstoff für Baufahrzeuge, Maschinen und Stromgeneratoren, wenn nicht speziell für die Baustelle eigene Stromleitungen gelegt werden, was auch mit erheblichem Aufwand und CO₂-Ausstoß verbunden ist. Vor allem Tunnelbohrmaschinen, die beim Bau von Bahntunnel in „geschlossener Bauweise“ zum Einsatz kommen, sind wahre „Giganten“. Diese Maschinen sind bis zu 150 m lang, haben einen Bohrkopfdurchmesser von mehr als 9 Metern (für 8,20 m Tunnelinnendurchmesser) und benötigen eine Antriebsleistung von 4.200 kW (4,2 MW). Wird diese Leistung aus dem Stromnetz zur Verfügung gestellt, ergeben sich unter Zugrundlegung der CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in Deutschland für jede Betriebsstunde mehr als 2 Tonnen CO₂ allein aus der Stromproduktion. Eine wirklich vollständige Berechnung müsste neben diesen Aspekten beispielsweise auch noch die CO₂-Emissionen anteilig

berücksichtigen, die beim Bau der Maschinen entstehen, die für solche Bauprojekte zum Einsatz kommen.

Auch die Menschen, die an der Baustelle tätig sind, müssen zur Baustelle an- und abreisen. Während des Baus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln – Frankfurt waren beispielsweise bis zu 15.000 Arbeiter gleichzeitig dort tätig. Weiterhin war es für den Bau dieser Bahnstrecke notwendig, die benachbarte Autobahn A3 an mehreren Stellen über insgesamt 15 km vorübergehend zu verlegen, für mehr als 8 km war eine dauerhafte Neutrassierung notwendig (27). Mit welcher Anzahl an Arbeitern an der hier untersuchten Strecke gearbeitet würde, ob ggf. Baustraßen anzulegen sind oder andere Infrastrukturen umgelegt werden müssen, ist vor dem Hintergrund des **jetzigen Planungsstandes noch offen und deshalb in den bisherigen Kalkulationen nicht berücksichtigt**.

3.1 Schallschutzmaßnahmen und Bahnhofsbauten

Neben dem Bau der Trasse, von Tunnel und Brücken fallen beim Neubau von Bahnstrecken meist noch weitere Gewerke an, die es zu berücksichtigen gilt. Oftmals müssen Schallschutzanlagen entlang der Strecke gebaut werden, um Anwohner in der Nähe vor dem Lärm vorbeifahrender Züge zu schützen. Ebenfalls müssen ggf. neuen Bahnhöfe gebaut bzw. existierende Bahnhöfe erweitert werden.

Da die Planungen für die untersuchte Strecke gemäß Schüßler-Plan Nr. 5 noch nicht detailliert genug vorliegen, können im Rahmen des beauftragten Projektes keine konkreten Berechnungen zu bestimmten Lärmschutzmaßnahmen vorgenommen werden. Ebenso wenig gibt es genauere Planungen von Bahnhofsbauten. Für die Planungen von Bahnhofsbauten und eine Abschätzung der daraus resultierenden CO₂-Emissionen wäre es im ersten Schritt notwendig, dass konkrete, zu erwartende Fahrgastzahlen veröffentlicht würden, denn die Dimensionierung von Bahnhöfen und dabei insbesondere von Bahnsteigbreiten, Auf- und Abgängen, Rolltreppen und Fahrstühlen ist davon abhängig, welche Fahrgastzahl im Betrieb zu erwarten ist.

Die nachfolgenden Überlegungen sind vor diesem Hintergrund von grundsätzlicher Natur; eine detaillierte CO₂-Abschätzung für die untersuchte Strecke wird erst möglich sein, wenn detailliertere Informationen zur realisierenden Strecke vorliegen.

3.1.1 Bahnlärm und Schallschutzmaßnahmen

Zum Thema Bahnlärm sind über die Jahrzehnte eine Vielzahl von Veröffentlichungen erschienen. Eine umfassende Bewertung inkl. der gesetzlichen Rahmenbedingungen und Vorgaben, aber auch der Möglichkeiten und Limitierungen des Lärmschutzes an Bahnstrecken, würde diesen Bericht sprengen. Der interessierte Leser sei deshalb auf die einschlägige Literatur verwiesen. Einen Überblick bietet die Broschüre *Lärmschutz im Schienenverkehr* des BMDV (28) und seitens des Umweltbundesamtes gibt es eine Analyse, inwieweit die „Besserstellung der Bahn beim Lärmschutz im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern noch gerechtfertigt ist“ (29). Sehr interessant sind auch die Ausführungen zum Thema Bahnlärm im Buch *Schaden in der Oberleitung* (30).

Fakt ist, dass Bahnlärm für die betroffenen Anlieger als extrem störend und in Einzelfällen nachweislich krankmachend eingeschätzt werden muss. Zudem tritt störender Bahnlärm genau wie Straßenlärm grundsätzlich immer und überall auf, wo sich die Fahrzeuge bewegen; dies ist bei den landgebundenen Verkehrsmitteln entlang der gesamten Strecken der Fall, die aufgrund der vergleichsweise dichten Besiedelung in Deutschland sehr oft durch bewohnte Gebiete führen. Anders sieht die Lärmsituation in der Luftfahrt aus; hier entsteht störender Lärm „nur“ an den Flughäfen. Dies ist für die dort vom Lärm Betroffenen zwar nicht hilfreich, aber auf einem Flug etwa von Hamburg nach München entsteht die Lärmbelastung in Hamburg über eine Strecke von max. bis zu 70 Kilometer in Abflugrichtung und von rund 40 Kilometer in der Anflugschneise des Flughafens München. Bei der Fahrt eines Zuges müssen alle Anwohner entlang der Strecke (über Hannover, Göttingen, Kassel, Fulda, Würzburg, Nürnberg, Ingolstadt) entsprechend geschützt werden. Dementsprechend groß ist der Aufwand, Schallschutzwände zu bauen.

Der Schutz gegen Lärm von vorbeifahrenden Zügen kann grundsätzlich durch Schallschutzwände oder Schallschutzwälle erreicht werden. Aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge (Schallfrequenz, Schalldruck, Reflektion, Streuung und Beugung der Schallwellen, Absorptionseigenschaften der verwendeten Materialien, Windrichtung und Temperatur, etc.), die die letztendliche Lärmbelastung der Anwohner beeinflussen, ist jede zu konstruierende bauliche Schallschutzmaßnahme ein Unikat, das an die spezifischen Gegebenheiten vor Ort angepasst werden muss.

Nachfolgend erfolgen einige Überlegungen zu CO₂-Emissionen von benötigten Materialien für zwei verschiedene Konstruktionsmöglichkeiten von Schallschutzwänden. Andere, ebenfalls bedeutsame Aspekte, wie die Beeinträchtigung von Stadt- und Landschaftsbildern beispielsweise durch das Zerschneiden von Sichtachsen, einen möglichen „Trading-Down-Effekt“ durch starke Graffiti-Besprühung, erschwerte Zugangsmöglichkeiten für Hilfskräfte bei Unfällen oder anderen unvorhergesehenen Ereignissen, etc. bleiben in dieser Studie bewusst außen vor.

Eine Möglichkeit, Lärmschutzwände für Bahnstrecken zu bauen, besteht mit **den Materialien Aluminium, Faserzement (bekannt als Eternit) und Steinwolle**. Der Faserzement und die Steinwolle sind als schalldämmende Materialien zwischen dünnen Aluminiumprofilen (2 mm) eingelagert, die einzelnen Elemente der Schallschutzwand sind 5 m lang und werden dort von Stahlträgern (HEB) gehalten; eine solche Wand kann bis zu 5 m hoch sein.

Alternativ sind Konstruktionen aus Beton möglich. Einem **zweilagig bewehrtem Tragbeton (160 mm) wird ein offenporiger Akustikbeton (90 mm)** zugefügt; ebenfalls notwendig sind (stärkere) HEB-Träger aus Stahl, da die Wand insgesamt eine größere Tiefe hat.

Beide Varianten benötigen in jedem Fall ein stabiles Betonfundament, um der Gesamtkonstruktion, die gerade bei stärkerem Wind großen Kräften ausgesetzt ist, die notwendige Stabilität zu verleihen.

Bereits aus dieser Beschreibung ist erkennbar, dass auch Lärmschutzwände aus Materialien konstruiert werden, die wir bereits als CO₂-intensiv kennengelernt haben. Für die nachfolgenden Kalkulationen nutzen wir die Daten der „Konstruktionsmaterial-Pyramide“ (31) des „Centre for Industrialised Architecture (CINARK) at the Royal Danish Academy“ (32). Diese Konstruktionsmaterial-Pyramide gibt für viele Baustoffe, u.a. Aluminiumplatten, Faserzement und Steinwolle, detaillierte CO₂-Mengen an, die bei der Produktion dieser Materialien entstehen.⁷



Abbildung 1: Konstruktionsmaterial-Pyramide (CINARK)

Auf Basis der CO₂-Werte aus der Konstruktionsmaterial-Pyramide ergibt sich für einen Kilometer 5 Meter hohe Schallschutzwand aus Aluminium, Faserzement und Steinwolle eine CO₂-Belastung von rund 693 Tonnen.

⁷ Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der CO₂-Fußabdruck der in dieser Pyramide ausgewiesenen Materialien schwanken kann, insbesondere in Abhängigkeit vom Produktionsort und den Transportwegen der Materialien. Da es eine spezifische „deutsche Version“ dieser Pyramide bisher nicht gibt, sind bei den Berechnungen die dänischen Zahlen verwendet worden. Aufgrund des im jährlichen Mittel deutlich geringeren CO₂-Fußabdrucks von Dänemark bei der Stromerzeugung, ist davon auszugehen, dass die CO₂-Emissionen für in Deutschland produziertes Material tendenziell höher ist als in Dänemark.

Build Better! – Make your own pyramid

choose materials in the pyramid (click) to include them in the calculator.
See the data used for the materials by double-clicking on the material in the pyramid.

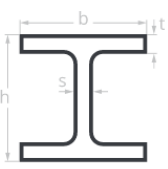
show result in pyramid ↑		reset calculation		type project name		m ²			
material	group	impact / m ³	volume [m ³]	area [m ²]	thickness [mm]	result			
1 Aluminium sheet	metal	28242.0 kg CO ₂ eq/m ³	20.00 m ³	5000 m ²	4 mm	564.840.0 kg CO ₂ eq			
2 Fibre cement boards	mineralsk	699.0 kg CO ₂ eq/m ³	150.00 m ³	5000 m ²	30 mm	104.850.0 kg CO ₂ eq			
3 Stone wool	mineralsk	70.4 kg CO ₂ eq/m ³	330.00 m ³	5000 m ²	66 mm	23.232.0 kg CO ₂ eq			
						692.922.0 kg CO ₂ eq/m ³			

Hinzu kommt noch der Stahl für die Stahlträger, errechnet über den „HEB-Träger Gewichtsrechner“ von Klöckner (33); insgesamt sind hierfür 27,4 Tonnen Stahl für die entsprechenden Träger anzusetzen.

Gewicht HEB Träger

Zur Kalkulation des Gewichts eines HEB Trägers:

Gewichtsrechner HEB-Träger



Ergebnisse drucken

Typ: HEB-Träger
Material: Unlegierter Stahl
Spezifisches Gewicht: 7,85

Einheit: mm cm m

Abmessungen: 120x120 mm

Höhe (H) mm	Breite (b)	Steeg (s) mm
120	120	6.5
Wandstärke (t) mm	Länge (L)	Stückzahl (Q)
11	5000	200

Ergebnis: 27400,0000

Gewicht in Kg

Werden dann noch Beton und Armierung für das Fundament hinzuaddiert, ergibt sich eine CO₂-Belastung von rund 861 t CO₂ für die Materialien einer ein Kilometer langen und 5 m hohen Lärmschutzwand aus Aluminium, Steinwolle und Faserzement.

		CO₂
Gewicht Stahlträger (t)	27,4	59,73
CO ₂ (Materialpyramide)		692,92
Betonfundament (m ³)	200	64,52
Armierung Fundament (20 kg Stahl /m)	20	43,60

Summe: 860,77 t CO₂ / km

Ganz analog lässt sich die CO₂-Belastung für die Lärmschutzwand aus Beton bestimmen, nachfolgend sind nur die entsprechenden Berechnungen dargestellt, im Ergebnis kommt man hier auf rund 730 t CO₂ für einen Kilometer.

Build Better! – Make your own pyramid

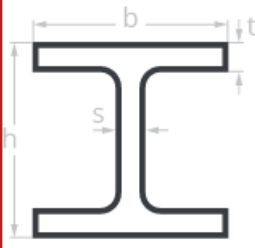
choose materials in the pyramid (click) to include them in the calculator.
See the data used for the materials by double-clicking on the material in the pyramid.

show result in pyramid ↓		reset calculation		type project name		m ²			
material	group	impact / m ³	volume [m ³]	area [m ²]	thickness [mm]	result			
1 Concrete C30/37	minerals	288.0 kg CO ₂ eq/m ³	1250.00 m ³	5000 m ²	250 mm	360.000,0 kg CO ₂ eq			
						360.000,0 kg CO ₂ eq			

Gewicht HEB Träger

Zur Kalkulation des Gewichts eines HEB Trägers:

Gewichtsrechner HEB-Träger



Typ: HEB-Träger

Material: Unlegierter Stahl

Spezifisches Gewicht: 7,85

Einheit: mm cm m

Abmessungen: 300x300 mm

[Ergebnisse drucken](#)

Höhe (H) mm	Breite (b)	Steeg (s) mm
300	300	11
Wandstärke (t) mm	Länge (L)	Stückzahl (Q)
19	5000	200

Ergebnis 120000,0000

Gewicht in Kg

		CO₂
Gewicht Stahlträger (t)	120	261,60
CO ₂ (Materialpyramide)		360,00
Betonfundament (m ³)	200	64,52
Armierung Fundament (20 kg Stahl /m)	20	43,60

Summe: 729,72 t CO₂ / km

Wie bei allen anderen Kalkulationen handelt es sich hier nur um die CO₂-Mengen aus der Materialproduktion; für eine vollständige Betrachtung müssen auch die Aufwände aus Bau

und Errichtung mitberücksichtigt werden, die in Ermangelung konkreter Zahlen nicht näher spezifiziert wurden.

Summa summarum lässt sich festhalten, dass **Schallschutzwände bei ihrer Errichtung durchaus mit Werten im Bereich von 1.000 t CO₂ je km** anzusetzen sind.

3.1.2 Bahnhofsaus- und Bahnhofsneubauten

Auch für die CO₂-Emissionen aus eventuell notwendigen Bahnhofsausbauten oder gar Neubauten können in dieser Studie keine konkreten Aussagen getroffen werden, da bisher keine konkreten Festlegungen hierzu getroffen wurden. Wie in 3.1.1 erfolgen nachfolgend einige grundsätzliche Informationen zum Thema.

Die rund 5.500 Bahnhöfe in Deutschland werden seitens der DB in sieben verschiedene „Preisklassen“ (bis 2017 „Bahnhofs-kategorie“) eingeteilt. Für die Eingruppierung sind sechs verschiedene Kriterien relevant, die nachfolgend mit ihrer prozentualen Gewichtung aufgeführt sind:

- Anzahl Bahnsteigkanten (20%),
- Länge der längsten in Betrieb befindlichen Bahnsteigkante (20%),
- Anzahl Reisende / Tag (20%),
- Anzahl Zughalte / Tag (20%),
- „Personenbedienter Service vor Ort“(15%),
- „Technische Stufenfreiheit“ (5%).

Eine detailliertere Beschreibung der Bahnhofsklassen inkl. Beispielrechnungen sowie eine Liste aller Bahnhöfe mit der jeweiligen Eingruppierung finden sich in (34) und (35).

2023 gehören in Deutschland

- **21** Bahnhöfe zur **Preisklasse 1**, als einziger Bahnhof im Großraum der untersuchten Strecke ist dies **Hannover Hbf**;
- **86** Bahnhöfe zur **Preisklasse 2**, darunter die Bahnhöfe **Bielefeld Hbf, Hamm (Westf.) und Osnabrück Hbf**;
- **256** Bahnhöfe zur **Preisklasse 3**, darunter die Bahnhöfe **Bad Oeynhausen, Minden und Wunstorf**;
- **628** Bahnhöfe zur **Preisklasse 4**;
- **992** Bahnhöfe zur **Preisklasse 5**;
- **2.505** Bahnhöfe zur **Preisklasse 6** und
- **916** Bahnhöfe zur **Preisklasse 7**.

ICE-Bahnsteige sind rund 400 Meter lang, nach aktuellen Vorgaben sollten sie der Barrierefreiheit wegen so ausgelegt sein, dass man ohne Stufen in den ICE einsteigen kann.⁸ Dazu

⁸ Zur Thematik Bahnsteighöhe gibt es seit langem intensive Diskussionen, die andauern. Insbesondere geht es darum, dass aus historischen Gründen Bahnhöfe unterschiedliche Bahnsteighöhen (38 cm, 55 cm, 76cm, 96 cm, jeweils über SO) haben. So kann es passieren, dass Reisende mit einem Rollstuhl an einem Bahnhof in einen Zug barrierefrei einsteigen können, an einem anderen Bahnhof den Zug aber nicht ohne Stufe wieder verlassen können.

müssen die Bahnsteige 76 cm über der Schienenoberkante (SO) liegen. Die Bahnsteige bestehen in der Regel aus armierten Betonsteinen, auf denen Beton-Verbundsteinpflaster verlegt ist. Kalkuliert man eine Bahnsteigbreite von 5 Metern, kommt man mit den zuvor gemachten Angaben bereits auf mehr als **1.500 m³ Beton für einen einzigen ICE-Bahnsteig**. Bahnsteigfundamente sowie spezielle Konstruktionen, wenn die Bahnsteige eines Bahnhofs über unterirdische Tunnel verbunden sind, erfordern weitere CO₂-intensive Baumaßnahmen. Auch ohne konkrete Angaben über noch zu errichtende Bahnsteig- oder Bahnhofsneubauten ist zu erkennen, dass auch hier Tausende Tonnen CO₂ nur aus der Materialproduktion anzusetzen sind.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche oder verlängerte Bahnsteige in existierenden Bahnhöfen nicht immer einfach zu realisieren sind, denn hierzu sind erhebliche Flächen notwendig, die möglicherweise nicht innerhalb des Betriebsgeländes des Bahnhofs liegen und deshalb weitere aufwendige Baumaßnahmen im Bahnhof selbst oder in der Umgebung des Bahnhofs erfordern.

4 Einordnung der berechneten Ergebnisse

4.1 Maßstäbe und Vergleiche

Wie sind diese Mengen an Stahl und Beton sowie die daraus resultierenden CO₂-Mengen einzuordnen? Womit ist das vergleichbar? Wie lassen sich die Emissionen aus dem Bau der Strecke auf die Verkehrsleistung umrechnen? Wie viele Personenkilometer (PKM) und Tonnenkilometer (TKM) müssen auf dieser Strecke an Verkehrsleistung erbracht werden, damit die bei Bau entstehen CO₂-Emissionen zu rechtfertigen sind? Auf diese Fragen sollen in diesem Kapitel Antworten gegeben werden.

Um eine Vorstellung der Mengen an Stahl zu bekommen, die sowohl sichtbar als Schienenstahl aber auch „unsichtbar“ in Form von Armierungs- oder Bewehrungsstahl im Stahlbeton verbaut wird, wollen wir als Vergleich den Pariser **Eiffelturm** heranziehen.



Der 1889 fertiggestellte, 330 Meter hohe Eisenfachwerkturm wiegt **10.100 Tonnen**.

Die gesamte Stahlmenge, die für die knapp 80 km lange Strecke gemäß **Schüßler-Plan Nr. 5** aufzuwenden wäre, beläuft sich auf mehr als **172.000 Tonnen**, also **mehr als 17 Eiffeltürme**.

Auch für die riesigen Betonmengen, die zu verbauen wären, und den Aushub, der beim Bohren der Tunnel oder bei Anlegen der Fundamente für Brückenbauwerke anfällt, wollen wir einen griffigen Vergleich wählen. Im mexikanischen Teotihuacán, südlich von Mexiko-Stadt gelegen, befindet sich die von den Azteken gebaute **Sonnenpyramide**. Sie hat eine Grundfläche fast 50.000 m², bei Seitenlängen von 222m und 225m ist sie 65 m hoch. Das **Volumen** der Pyramide beträgt ziemlich genau **1.000.000 m³**. Nimmt man das gesamte Volumen des Betons, der bei einem Bau gemäß **Schüßler-Plan Nr. 5** notwendig wäre, sind dies mehr **2,1 Mio. m³**, also etwa **2,1 Sonnenpyramiden aus massivem Beton**. Der **Materialaushub** beläuft sich in diesem Fall auf **fast 5 Mio. m³**. Das entspricht dem Volumen von fünf dieser gigantischen Pyramiden.



Auch beim Vorschlag der **Initiative WiduLand e.V.** sind selbstverständlich Ressourcen notwendig. Konkret wären hier **knapp 38.000 Tonnen Stahl** notwendig, also et-

was **weniger als vier Eiffeltürme**. Deutlich sind auch die Unterschiede bei der **Betonmenge**, es fallen lediglich rund **250.000 m³** an, also nur **0,25 Sonnenpyramiden**. Am deutlichsten ist der **Unterschied beim Aushub**, hier werden für den WiduLand-Vorschlag nur **knapp 400.000 m³** kalkuliert, also etwa **0,4 Sonnenpyramiden**.

Werfen wir auch einen Blick auf die sich aus den Materialmengen ergebenden CO₂-Emissionen und versuchen diese anhand von Vergleichen einzuordnen. Für die **Schüßler-Plan Variante** ergeben die für den Bau der Trasse, der Brücken und Tunnel benötigten Materialien

bereits CO₂-Emissionen von **1.083.170 Tonnen**, ohne Schallschutzwände und ohne die Berücksichtigung von Bahnhofserweiterungs- oder Bahnhofsneubauten. Der **WiduLand-Vorschlag** würde gemäß den zuvor erläuterten Berechnungen bei **knapp 177.488 Tonnen** CO₂ liegen, also **weniger als 17%** dessen, was bei einem kompletten Neubau anfiel.

Bezieht man die zusätzlichen Emissionen aus dem Streckenabschnitt Hamm – Bielefeld, dessen Neubau auf Grundlage des Schüßler-Plans Nr. 5 ebenfalls notwendig wäre, mit ein, so stehen insgesamt **1.280.830 Tonnen CO₂ für den Schüßler-Plan Nr. 5 und Deutschlandtakt** „nur“ **177.488 Tonnen CO₂ für den Vorschlag von WiduLand** gegenüber. In diesem Vergleich kommt der WiduLand-Vorschlag sogar nur auf **knapp 14% der Emissionen** gegenüber der komplett neu zu errichtenden Hochgeschwindigkeitsstrecke. **Bei den nachfolgenden Ausführungen vergleichen wir aber weiterhin nur die Emissionen für die beiden Varianten des Streckabschnitts Hannover – Bielefeld**, um nicht den Vorwurf zuzulassen, dass in dieser Studie Äpfel mit Birnen verglichen würden. Für die weitere Diskussion im Zuge konkreter Baumaßnahmen ist es aber wichtig, diesen Aspekt im Blick zu behalten.

1 Million Tonnen CO₂ mögen im weltweiten Vergleich gar nicht so viel sein; der weltweite Ausstoß bewegt sich aktuell bei etwa 38 Gigatonnen jährlich, das sind 38.000 Millionen Tonnen, Deutschland steuert dazu rund zwei Prozent bei, das sind 750-760 Millionen Tonnen pro Jahr. Fast acht Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen gehen dabei auf das Konto der Zement- und Betonindustrie.

1 Million Tonnen sind 1 Milliarde Kilogramm (1.000.000.000 kg) oder 1 Billion Gramm (1.000.000.000.000 g). Wenn wir über Mobilität sprechen, geht es immer darum, die CO₂-Emissionen ins Verhältnis zur erbrachten Verkehrsleistung zu setzen. Dabei muss, wie in Abschnitt 1.1 aufgezeigt, immer das komplette, komplexe Verkehrssystem betrachtet werden, also inklusive aller notwendigen Infrastrukturen. Gerade die landgebundenen Verkehrssysteme Schiene und Straße sind besonders infrastruktur-intensiv, da sie im Gegensatz zur Luftfahrt und zu internationalen Seeschifffahrt eine aufwendige und CO₂-intensive Wege-Infrastruktur benötigen.

Wenn also mehr als 1 Million Tonnen CO₂ bereits beim Bau einer 78 km langen Bahntrasse entstehen, dann sind diese auf die CO₂-Gesamtrechnung der zukünftig auf dieser Strecke erbrachten Verkehrsleistung anzurechnen. Kalkulieren wir die Nutzungsdauer beispielsweise auf 50 Jahre nach Fertigstellung, dann entspricht dies rein rechnerisch immer noch mehr als 21.663 Tonnen CO₂ pro Jahr. Wie viele Reisende müssen Jahr für Jahr auf dieser Strecke fahren, damit sich das im Laufe der Zeit amortisiert? Präziser ausgedrückt muss die Frage lauten, wie **viele Reisende es gelingt, zusätzlich zu den bereits heute mit der Bahn reisenden Personen aus anderen Verkehrssystemen auf die Schiene zu bringen?** Denn diejenigen, die heute schon auf der Strecke unterwegs sind, fahren bereits Bahn auf der bereits existierenden Strecke, für die muss die neue Trasse nicht gebaut werden. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass es gelingt, 1 Million Reisende pro Jahr zusätzlich auf dieser Strecke für die Bahn zu gewinnen, die bisher nicht mit der Bahn unterwegs sind. Selbst bei dieser, wie wir in 4.3 noch sehen werden, sehr optimistischen Abschätzung, ergibt dies **für jeden geleisteten Personenkilometer eine CO₂-Belastung von etwa 278 Gramm nur aus der Produktion der Materialien zum Bau der Strecke!** Die Rechnung ist einfach:

21.663 Tonnen jährlich sind 21.663.000.000 Gramm dividiert durch 1.000.000 Reisende dividiert durch 78 km:

$$21.663.000.000 / 1.000.000 / 78 = 277,77$$

Das sind dann aber nur die CO₂-Emissionen aus dem Bau der Infrastruktur. Auch die Fahrzeuge müssen gebaut und gewartet werden und die Energie zur Fortbewegung ist entgegen weitverbreitetem Wunschdenken niemals aufwandsfrei und emissionsfrei zu haben.

Die CO₂-Emissionen, die sich aus dem Bau der Verkehrsmittel im Straßenverkehr (PKW) in Deutschland ergeben, liegen bei etwa 33 Gramm je PKM; sowohl für den Schienenverkehr (Züge) als auch für den Luftverkehr (Flugzeuge) gibt es plausible Annahmen, dass sie aufgrund der höheren Verkehrsleistung von Zügen und Flugzeugen deutlich darunter liegen; Details hierzu findet der interessierte Leser in (1)⁹.

Bei der **Antriebsenergie lagen die CO₂-Emissionen** in den Jahren vor der Corona-Pandemie bei rund 85 Gramm je PKM im Straßenverkehr, bei rund 90 Gramm im Luftverkehr, bei etwa **45 Gramm im Fernverkehr der Deutschen Bahn** und bei **77 Gramm im Regional- und Nahverkehr**. Die Details zu diesen Berechnungen finden sich in (1) und (2), die Aufteilung der Energiemengen im Bahnverkehr auf Fernverkehr, Regio- und Nahverkehr sowie Güterverkehr findet sich in (36).

Für das Verkehrssysteme Schiene kommen extrem hohe CO₂-Belastungen aus dem Bau der Wege-Infrastruktur hinzu, die aus den großen Mengen an Beton und Stahl resultieren, die in Tunnel, Brücken, in der festen Fahrbahn und in den Schienen verbaut sind, hinzu kommen weitere Belastungen durch das Kupfer für die Elektrifizierung. **Der Vorschlag von WiduLand, die existierende Strecke weiter zu nutzen und dabei zu ertüchtigen, setzt auf deutlich weniger Neubauten und bessere Nutzung der bereits vorhandenen Infrastruktur.**

Geht man auch hier davon aus, dass es gelingen wird, 1.000.000 Reisende pro Jahr zusätzlich zu Bahnreisenden zu machen, entstehen somit „nur“ 45,52 Gramm CO₂ je PKM (16% im Vergleich zum Schüßler-Plan) aus dem Bau der Infrastruktur. Das ist immer noch eine Menge, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass jede Verringerung der angenommenen Fahrgastzahlen innerhalb eines Zeitraums von 50 Jahren zu einer höheren CO₂-Belastung je PKM führen würde.

Doch wie realistisch ist es anzunehmen, dass man auf dieser Strecke jedes Jahr mit 1 Million zusätzlicher Fahrgäste rechnen kann und was fallen zwischenzeitlich für weitere CO₂ emittierende Aufwände an? Dieser Frage widmen wir uns in den Abschnitten 4.2 und 4.3.

4.2 *Wartung von Bahntrassen*

Nach Angaben der Bahn sind voraussichtlich nach etwa 30 Jahren die Schienen komplett auszutauschen, die gut 240 t Stahl für einen Kilometer zweigleisige Strecke fallen dann erneut an. Bei Gleisbetten aus Schotter und Schwellen geht man heute von 30 bis 40 Jahren Haltbarkeit aus, für die „feste Fahrbahn“ gibt es noch keine wirklich ausreichenden

⁹ Hintergrund ist, dass sowohl Züge aber insbesondere Flugzeuge im Laufe ihrer gesamten Einsatzzeit (25 Jahre oder länger) eine sehr viel größerer Verkehrsleistung verbringen, wodurch sich die CO₂-Emissionen aus Bau und Wartung auf ungleich mehr PKM verteilen.

Erfahrungswerte bzgl. der Haltbarkeit; von 10-20 Jahre länger bis hin zu 10 Jahre kürzer verglichen mit dem „klassischen Schotterbett“ liegen hier die Erwartungen weit auseinander. In jedem Fall wiederholen sich aber die Aufwände inkl. der sich aus der Materialproduktion und dem Bau resultierenden Öko- und Schadstoffbilanzen im Laufe der Zeit. Die ICE-Strecken, auf denen Ende der 80er-Jahre des vorigen Jahrhunderts die ersten ICE-Züge unterwegs waren, werden bereits nach rund 30 Jahren von der Bahn faktisch neu gebaut (Schiene, Gleisbett, Oberleitungsmasten, Elektrifizierung und Steuerungstechnik) (37), (38).

Zudem sind während des Betriebs einer Bahnstrecke regelmäßige Wartungsarbeiten durchzuführen. Schienen unterliegen erheblichem Verschleiß, weshalb sie nach einigen Jahrzehnten der Nutzung ausgetauscht werden müssen. Um den Verschleiß in Grenzen zu halten, ist regelmäßiges Schleifen notwendig, je nach Beanspruchung kann dies ein bis zwei Mal jährlich bis hin zu alle drei bis vier Jahre nötig sein. Auch die Frage, ob es sich um Kurvenschienen oder Schienen auf geraden Strecken handelt, spielt eine Rolle. Das erste Schienenschleifen findet bereits unmittelbar nach dem Streckenbau statt, noch bevor der reguläre Fahrbetrieb aufgenommen wird.

Auch Bauwerke wie Brücken und Tunnel müssen regelmäßig inspiziert und gewartet werden. Wenn diese Wartungsarbeiten unterlassen werden, müssen sehr viel schneller Neubauten erfolgen; eine Tatsache, die derzeit an vielen Stellen in Deutschland zu beobachten ist.

Alle derartige Wartungsmaßnahmen sind immer zwingend auch mit CO₂-Emissionen verbunden, und das nicht nur, weil sie energieaufwendig sind. Dies bedeutet, dass der CO₂-Fußabdruck einer Bahntrasse im Laufe der Jahre weiter ansteigt, was bei ganzheitlicher Betrachtung selbstverständlich in die Komplettrechnung aufgenommen werden muss. Da diese Aspekte in der Vergangenheit jedoch niemals im Kontext einer CO₂-Belastung analysiert wurden, fehlen schlicht die Zahlen, um konkrete zusätzliche Emissionsmengen ermitteln zu können. Es zeigt sich aber, dass die zuvor getroffene Annahme, eine Trasse nach Abschluss der Bauarbeiten fünfzig Jahre ohne weitere Aufwände zu betreiben, illusorisch ist.

4.3 Verkehrsprognosen der Bahn

In Abschnitt 4.1 hatten wir unterstellt, dass nach Fertigstellung der Baumaßnahme eine Million Passagiere jedes Jahr zusätzlich auf der dann neuen Hochgeschwindigkeitsstrecke unterwegs sein werden. Wie realistisch ist das?

Bedauerlicherweise gibt es seitens der Deutschen Bahn weder detaillierte Angaben über geleistete Personenkilometer für einzelne Strecken in abgelaufenen Jahren noch werden konkrete Prognosen für bestimmte Streckenabschnitte veröffentlicht. Hier müsste es sehr viel mehr Transparenz geben, um die mit immensen Kosten verbundenen Maßnahmen, häufig im Bereich von Milliarden Euro, vor den Bürgern und Steuerzahlern zu rechtfertigen. Doch konkrete Anfragen, sowohl zu Zahlen der Vergangenheit als auch zu Prognosen werden mit dem Hinweis auf Vertraulichkeit und Gründen des Wettbewerbsschutzes sowohl durch die Deutsche Bahn als auch das Bundesverkehrsministerium (BMDV) zurückgewiesen. Mit wem die Deutsche Bahn im Fernverkehr auf der Schiene im Wettbewerb steht, sei dahingestellt.

In der Luftfahrt werden beispielsweise seitens des Statistischen Bundesamtes für jegliche bediente Strecken bis auf den einzelnen Passagier heruntergebrochene Zahlen in anonymisierter Form auf Monatsbasis veröffentlicht.

Bevor Infrastrukturmaßnahmen konkret geplant und angegangen werden, werden in der Regel im Vorfeld Nutzen-Kosten-Vergleiche (NKV) gerechnet. NKV sind aufwendige Verfahren, bei denen strikte Regeln gelten sollten, in der die Kosten einer Maßnahme dem *volkswirtschaftlichen Nutzen* gegenübergestellt werden. Beim Nutzen von Bahntrassen geht es auch darum, wie viel Verkehr von der Straße und aus der Luft auf die Schiene verlagert werden kann und wie viel CO₂ dadurch eingespart wird. Bekanntermaßen ist es schwierig, die Zukunft vorherzusagen, was die Bedeutung plausibler und realistischer Annahmen im NKV hervorhebt. Nur wenn der NKV positiv ist, also der Nutzen größer sein wird als die Kosten, der errechnete NKV-Wert also größer als 1 ist, sind die Projekte wirtschaftlich zu rechtfertigen und dürfen realisiert werden. Häufig liegen die ermittelten NKV-Werte nur sehr knapp über 1, der Grenze zwischen wirtschaftlich und damit realisierbar, und unwirtschaftlich. Deshalb kommt insbesondere den Verkehrsprognosen eine besondere Bedeutung zu. Dass der im Vorfeld kalkulierte Nutzen neuer Bahnstrecken bei bereits realisierten Strecken nicht immer der späteren Realität entsprach, lässt sich an diversen Beispielen aus der Vergangenheit erkennen.

4.3.1 Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln – Frankfurt

Das Prestige-Projekt der DB in den 1990er-Jahren war die HGS von Köln ins Rhein-Main-Gebiet. Quer durch Westerwald und Taunus wurde eine Strecke gebaut, die neben Dutzenden Talbrücken auch rund 47 Tunnelkilometer benötigt, da Züge aus physikalischen Gründen nur sehr viel geringere Steigungen bewältigen können als dies für Kfz im Straßenverkehr der Fall ist. (Die zur Strecke parallellaufende Autobahn A3 kommt komplett ohne Tunnel aus.) Im März 2000, als die Strecke noch im Bau war, veröffentlichte die DB ihr „Konzept von heute für den Verkehr von morgen“ (39); ein Auszug daraus lautet: **„Die Prognosen für das Fahrgastaufkommen unterstreichen die Bedeutung. Statt 11 bis 12 Millionen Reisende werden bis zum Jahr 2010 jährlich rund 20 bis 25 Millionen Fahrgäste das Angebot nutzen.“**

Nachdem die Strecke 15 Jahre lang in Betrieb war, feierte die DB sich selbst, wenn auch mit ganz anderen Zahlen: **„Riesenerfolg: Schnellfahrstrecke Köln – Rhein/Main mit 220 Millionen Fahrgästen in 15 Jahren“**, hieß es in einer Presseveröffentlichung vom 1. August 2017 (40).

Man muss nicht Mathematik studiert haben, um auszurechnen, dass es in den ersten 15 Jahren nicht 20 bis 25 Millionen, sondern **weniger als 15 Millionen Fahrgäste jährlich** waren, die „das Angebot nutzten, **33% bis 66% weniger als im Jahr 2020 prognostiziert**.

4.3.2 Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München

Bei der Planung der mit 10 Mrd. € erheblich teurer als ursprünglich geplanten HGS Berlin-München wurde noch 2010 unterstellt, dass neben den ICE im Passagierverkehr täglich auch rund 70 Güterzüge in jede Richtung fahren sollten, eine wesentliche Annahme auf der Nutzenseite dieses Projektes; Güterverkehr soll schließlich von der Straße auf die Schiene verlagert werden. Hinweise von Fachleuten, dass die Strecke für Güterzüge nur bedingt bis gar nicht geeignet sei, wurden ignoriert, denn bereits die (damals zu niedrig geschätzten) Kosten wären nicht mehr zu rechtfertigen gewesen. Es kam, wie es kommen musste: Eine *kleine*

Anfrage der Grünen im Bundestag ergab bereits 2018, dass kein einziger Güterzug auf der Strecke unterwegs war (41). Wie das NKV ausgesehen hätte, wenn das Projekt von Beginn an ohne Güterverkehr geplant worden wäre, ist aus heutiger Sicht zwar reine Spekulation, aber der Nutzen-Kosten-Index wäre definitiv schlechter gewesen. Über das Jahr gerechnet sind das **mehr als 50.000 nicht gefahrene Güterzüge, deren Ladung nicht von der Straße auf die Schiene verlagert wurde.**¹⁰

Aber es gibt noch andere fragwürdige Zahlen bei diesem Vorzeigeprojekt der Deutschen Bahn. Nach einem Jahr Betrieb berichtete die Bahn vom Ergebnis einer selbst erstellten Studie, dass es gelungen sei, **jeweils eine Million Reisende** von der Straße und **aus dem Flugzeug zum Umsteigen in den Zug zu bewegen** (42).

Nun ist gerade in der Luftfahrt jeder einzelne Passagier bekannt, man kennt seinen Namen, das Datum, die Flugnummer und sogar den Sitzplatz, auf dem er gereist ist. Und das Statistische Bundesamt veröffentlicht diese Zahlen, natürlich anonymisiert, aber so detailliert, dass man für jede innerdeutsche Flugstrecke Monat für Monat die exakte Anzahl der Passagiere kennt. In der DeStatis-Datenbank (43) lässt sich nachlesen, dass die Passagierzahlen von Berlin nach München und zurück in den Jahren 2015-2019 immer zwischen 1,93 Millionen und 1,98 Millionen gelegen haben, der höchste Wert mit 1.985.300 wurde im Jahr 2018 erreicht. Dies ist genau das Jahr, für das die Bahn behauptet, eine Million Passagiere aus dem Flugzeug in den Zug gebracht zu haben.

Flugpassagiere Berlin – München (beide Richtungen, Linienverkehr)				
2015	2016	2017	2018	2019
1.975.128	1.939.472	1.972.637	1.985.300	1.933.810

Warum macht die Bahn derart irreführende Veröffentlichungen? Will man damit rechtfertigen, dass jeder Reisende, der im Zug auf dieser Strecke unterwegs ist, rund 100 km Umweg in Kauf nehmen muss und durch mehrere Kilometer anderweitig nicht notwendiger Tunnel rasen muss, weil die Strecke unsinnigerweise über Erfurt geführt wurde? Soll von internen Schwierigkeiten abgelenkt werden oder müssen fragwürdige Entscheidungen der Vergangenheit im Nachhinein gerechtfertigt werden?

¹⁰ Die Verlagerung von Gütertransport von der Straße auf die Schiene ist eine allseits gern gestellte Forderung. Allerdings wird hierbei immer unterstellt, dass es grundsätzlich möglich ist, Güter einfach aus dem LKW in den Güterzug umzuladen. Dieser einfache Gedanke ignoriert allerdings die logistischen Anforderungen an den Transport. Massengütertransporte, z.B. Koks oder Eisenerz von einem Hafen zum Stahlwerk, sind definitiv ideal für den Transport mit der Bahn. Solche Transporte nehmen aufgrund wirtschaftlicher Veränderungen allerdings ab. Die Bahn ist im Gegenzug nicht das geeignete System für Gütertransport, wenn es darum geht, eine Million Päckchen und Pakete über Nacht zu einer Million verschiedener Empfänger zu bringen; auch für dringliche Stückguttransporte ist der Zug nur sehr selten das Transportmittel der Wahl. Diese einfachen Beispiele zeigen bereits, dass auch in diesem Kontext die Sachverhalte sehr komplex sind und „einfache Forderungen und Lösungsvorschläge“ gut gemeint sein können, häufig aber als nicht wirklich hilfreich angesehen werden müssen.

4.3.3 Überlegungen zu Verkehrsprognosen der Strecke Hamm – Hannover

Seitens der DB werden neue Hochgeschwindigkeitsstrecken trotz dieser „fragwürdigen Erfolge“ häufig damit begründet, dass es darum gehe, möglichst viele Passagiere der Luftfahrt dazu zu bewegen, auf die Schiene umzusteigen, also mit der Bahn zu reisen. Der Ausbau der Strecke Hamm – Hannover gilt als wichtiger Abschnitt der Verbindung aus dem Rheinland nach Berlin. Derzeit sind die schnellsten Zugverbindungen von Köln Hbf. nach Berlin Hbf. rund 4 ½ Stunden unterwegs; das Ziel der Bahn ist es, diese Strecke in nicht mehr als vier Stunden anzubieten. Auch von Düsseldorf Hbf. sind die schnellsten ICE-Züge aktuell rund 4 ½ Stunden nach Berlin unterwegs.

Für die Behauptung, dass Reisende bereitwillig vom Flugzeug in den Zug umsteigen, sobald die Reisezeit auf der Schiene vier Stunden nicht überschreitet, gibt es weder wissenschaftliche Untersuchungen noch irgendwelche empirischen Daten. Vielmehr wurde 2002 vom damaligen Bahnchef Hartmut Mehdorn eingestanden, dass er die Strecke Berlin – München grundsätzlich fliege, da „Zugfahrten über vier Stunden eine Tortur“ seien. In einer Talkshow gab er damals das Ziel aus, die Strecke Berlin – München in unter vier Stunden anbieten zu wollen. Diese Aussage von Mehdorn wurde später dann dahingehend uminterpretiert, dass alle Geschäftsreisenden bereitwillig vom Flugzeug in den Zug umsteigen, wenn die Bahnreise nicht länger als vier Stunden dauert (44).

Dass es der Bahn entgegen ihrer eigenen Aussage nicht immer gelingt, die Reisenden aus dem Flugzeug zum Umsteigen in den Zug zu bewegen, wurde in Abschnitt 4.3.2 anhand konkreter Zahlen aufgezeigt. Woher die rund 2,5 Millionen Reisenden kommen, die seit der Eröffnung der neuen Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München zusätzlich unterwegs sind, lässt sich nicht ohne Weiteres beantworten. Es ist durchaus möglich, dass durch die Verbindung schlicht zusätzlicher Verkehr generiert wurde; dies kann auch mit den Preisen zu tun haben; in Kapitel 5 werden wir auf einige ökonomische Aspekte in diesem Zusammenhang noch eingehen.

Bleiben wir aber zunächst einmal bei der Annahme, dass eine deutlich schnellere Verbindung vom Rheinland nach Berlin dazu führen würde, dass viele Reisende vom Flugzeug in die Bahn umsteigen würden, auch wenn dies für die Verbindung München – Berlin nicht belegt werden konnte.

Im Rheinland gibt es zwei größere Flughäfen, Düsseldorf und Köln-Bonn, von beiden werden täglich eine Vielzahl von Flügen nach Berlin bzw. zurück angeboten.

Die entsprechenden Zahlen zu den Flugpassagieren in den Jahren 2015 – 2019 (vor Corona) finden sich in (43):

Flugpassagiere Berlin – Düsseldorf (beide Richtungen, Linienverkehr)				
2015	2016	2017	2018	2019
1.114.666	1.145.568	1.142.318	1.196.981	1.233.050

Flugpassagiere Berlin – Köln-Bonn (beide Richtungen, Linienverkehr)				
2015	2016	2017	2018	2019
1.457.284	1.869.515	1.658.010	1.493.901	1.434.719

Die Zahlen für die Strecke Berlin – Düsseldorf sind über die Jahre sehr stabil, mit einer leicht steigenden Tendenz. Für die Strecke Berlin – Köln-Bonn gab es im Jahr 2016 einen deutlichen Anstieg um rund 28%; auch 2017 lagen die Zahlen noch rund 100.000 über dem Niveau von 2015, um dann in den Jahren 2018 und 2019 wieder ungefähr auf das Niveau von 2015 zurückzugehen. Der Anstieg in den Jahren 2016 und 2017 ist im Rückblick auf ein sehr großes Angebot von Berlin-Schönefeld nach Köln-Bonn zurückzuführen, das zusätzlich zu den Flügen nach Berlin-Tegel von sogenannten „Billigfliegern“ bereitgestellt wurde.

In Summe bewegt sich die Anzahl der Flugpassagiere aus dem Rheinland nach Berlin und zurück stabil im Bereich zwischen 2,5 Millionen und 2,7 Millionen jährlich. Unterstellen wir jetzt noch, dass es tatsächlich gelingen würde, 30% dieser Reisenden dazu zu bringen, statt des Flugzeugs die Bahn zu nutzen, dann wären dies etwa **800.000 Fahrgäste im Zug jährlich**, die wegen der Neubaustrecke zwischen Hamm und Hannover zusätzlich unterwegs wären. In 4.1 waren wir bei der Kalkulation der CO₂-Mengen je PKM bereits **von 1.000.000 zusätzlicher Reisenden** jährlich ausgegangen und kamen selbst über eine optimistische Rechnung, das 50 Jahre lang keinerlei weitere CO₂-emittierenden Wartungsarbeiten notwendig wären, bereits auf **mehr als 278 g CO₂ je PKM nur aus dem Bau der Strecke**. Bei „nur“ 800.000 zusätzlichen Reisenden im Jahr hätten wir sogar rund **347 g CO₂ pro PKM**, der auf den Neubau der Strecke zurückzuführen wäre.

Diese Zahlen verdeutlichen eindrucksvoll, dass **die Einsparung von CO₂ kaum als Argument für den Bau solcher Hochgeschwindigkeitsstrecken** herhalten kann.

5 Ökonomische Überlegungen

5.1 Grundlegende Überlegungen zu Kosten und Nutzen im Mobilitäts- umfeld

In der öffentlichen und politischen Diskussion hält sich hartnäckig die Behauptung, dass die Bürger bereitwillig auf die „politisch gewünschten“ Verkehrssysteme umsteigen, sobald diese finanziell attraktiver würden. Im gleichen Atemzug kommt dann die Forderung, die Bahn und den ÖPNV noch stärker staatlich zu subventionieren. Das 9€-Ticket wird gerne als „Beweis“ für diese Behauptung genutzt. Dabei ist es eher ein Beleg dafür, dass der profitierende Teil der Bevölkerung Steuergeschenke sehr gerne annimmt. Aspekte wie Gerechtigkeit oder ökologisches Wohlverhalten werden schnell hintenangestellt, wenn der persönliche Nutzen groß genug ist.

Dass der Bau von Bahnstrecken Millionen Tonnen CO₂ verursacht, die in der Umweltbilanz der Bahn gerne ignoriert werden, ist in den ersten Kapiteln dieses Berichts bereits ausführlich dargelegt worden. Dass der Bau dieser Strecken Milliarden Euro kostet und am Ende oft erheblich teurer wird als ursprünglich geplant, ist ein weiteres Thema, dem wir uns an dieser Stelle widmen müssen.

Da sich die Bahnstrecke Hamm-Hannover, mit der wir uns in dieser Studie schwerpunktmäßig befassen, zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch in einer frühen Planungsphase befindet, gibt es derzeit nur sehr grobe Kostenschätzungen. Wir werden deshalb auch an dieser Stelle erneut auf andere, durchaus vergleichbare Projekte zurückgreifen müssen. Dabei wird deutlich, dass Preissteigerungen von 50% bis 100% und noch höher leider bei fast allen Infrastrukturprojekten der Bahn die Regel sind.

Zum Glück für die Bahnreisenden werden diese Kosten immer vom Staat getragen; ein eigenes Bahnfinanzierungsgesetz macht dies möglich. Dieses Gesetz legt fest, dass Investitionen in die Bahn-Infrastruktur grundsätzlich vom Bund zu tragen sind; die DB ist „nur“ für die Wartung verantwortlich. Befürworter der Bahn werden in diesem Zusammenhang zurecht darauf hinweisen, dass der Bund auch die Straßeninfrastruktur bezahlt. Aus verschiedenen Richtungen kommt regelmäßig auch Kritik daran, dass in der Vergangenheit grundsätzlich mehr Geld des Bundes in den Bau von Straßen als in den Bau von Schienen geflossen ist; erst 2022 war dies seit vielen Jahren erstmals nicht der Fall. Beide Aussagen sind vollkommen richtig! Zur Wahrheit gehört dann allerdings auch die Tatsache, dass im Straßenverkehr eine rund 10-mal so große Verkehrsleistung in Personenkilometer (PKM) erbracht wird, im Güterverkehr ist die Leistung in Tonnenkilometer (TKM) auf der Straße das 6- bis 7-fache der Verkehrsleistung auf der Schiene. Auch bei Betrachtung der ökonomischen Zusammenhänge ist es wichtig, die Kosten in ein korrektes Verhältnis zum Nutzen zu setzen. Der Nutzen ergibt sich aus der erbrachten Verkehrsleistung und was diese für jeden PKM bei einer ganzheitlichen Betrachtung (Vollkostenrechnung) kostet.

Analog zu den Überlegungen, dass der CO₂-Fußdruck einer Transportleistung nur ermittelt werden kann, wenn alle notwendigen Komponenten des jeweiligen Verkehrssystems bzgl. ihrer CO₂-Bilanz korrekt berücksichtigt werden, muss dies bei den Kosten ebenfalls gemacht werden. Zusätzlich ist bei der ökonomischen Betrachtung aber noch ein weiterer Aspekt zu

berücksichtigen: **Wer trägt die Kosten und wer ist Nutznießer der Leistung?** Gerade bei staatlich finanzierten Infrastrukturen (Bahntrassen, Straßen, etc.) ist hier eine Zurechnung der wahren Kosten auf die Nutzer zuweilen schwierig.

Der Staat hat aber nicht nur Ausgaben, um Personen- und Güter-Mobilität zu ermöglichen, sondern diverse Einnahmequellen sprudeln seit Jahrzehnten ebenfalls kräftig. Schaut man sich die Steuereinnahmen und Gebühren an, die unmittelbar mit der Erbringung der Mobilitätsleistung zu tun haben, sind dies in erster Linie Mehrwertsteuer, KFZ-Steuer, Energiesteuer (früher Mineralölsteuer), Versicherungssteuer und (LKW-)Mauteinnahmen. Lohn- und Einkommenssteuern von Beschäftigten sowie Körperschafts- und Gewerbesteuern von Unternehmen bleiben bewusst außen vor, da diese grundsätzlich auch fließen würden, wenn die Arbeitnehmer und Unternehmen mit anderen Dingen befasst wären, solange die gleiche Anzahl an Arbeitnehmern mit gleicher Qualifikation und gleichem Lohn zugrundgelegt wird und angenommen werden kann, dass die Unternehmen die gleichen Gewinne erzielen.¹¹

Die Bahn hat in den Vor-Corona-Jahren 2018 und 2019 zwischen 5,8 Mrd. € und 6 Mrd. € Umsatz im Fernverkehr und jeweils knapp 9 Mrd. € Umsatz mit DB Regio gemacht. Waren in der Vergangenheit Fernverkehrsumsätze mit dem vollen Umsatzsteuersatz besteuert, ist die Mehrwertsteuer für Bahnfahrten inzwischen unabhängig von der Entfernung auf 7% reduziert worden. Aus den rund 15 Mrd. Umsatz im Personenverkehr ergeben sich also knapp 1 Mrd. €, die von den Fahrgästen als Mehrwertsteuer an den Staat entrichtet werden.¹²

Demgegenüber stehen für den Motorisierten Individualverkehr (MIV) jährlich rund 40 Mrd. € an Energiesteuer (früher Mineralölsteuer), die Deutschlands Autofahrer Jahr für Jahr über ihre Tankrechnung an den Staat abführen. Da auf diese Steuer und den restlichen Teil des Benzinpreises 19% USt. erhoben werden, kommen noch einmal mehr als 15 Mrd. € zusammen. Für rund 3,5 Mio. KFZ zum Durchschnittspreis von etwa 30.000 €, die jährlich neu zugelassen werden, kommen durch die USt. beim Verkauf 16 Mrd. € hinzu. Auch für sämtliche Reparatur- und Wartungsleistungen, TÜV-Gebühren, Service-Checks, werden 19% des Nettopreises an den Staat fällig. Die Maut aus dem Güterverkehr belief sich 2018 auf mehr als 5 Mrd. € und auch die Tatsache, dass jeder KFZ-Besitzer sein Fahrzeug versichern muss (was wichtig und richtig ist), führt jährlich zu einem größeren Milliardenbetrag an Versicherungssteuer, die dem Staat zufließen. Auch die rund 10 Mrd. € an KFZ-Steuer müssen auf der Einnahmeseite des Staates gebucht werden.

Die Einnahmen des Staates aus dem Straßenverkehr übersteigen die Ausgaben des Staates für die Wege-Infrastruktur um ein Vielfaches; beim Schienenverkehr ist es umgekehrt. Die zuvor genannten Zahlen sollten nicht dahingehend fehlinterpretiert werden, dass sie ein Plädoyer für geringere Steuern im MIV sind oder, dass die Autofahrer als „Melkkühe der

¹¹ Inwieweit diese Annahme volkswirtschaftlich realistisch ist, sei dahingestellt; über die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Automobilindustrie für Deutschland ist von diversen Experten schon viel geschrieben worden. Eine tiefere Erörterung dieser Thematik gehört aber nicht zum Untersuchungsauftrag dieser Studie.

¹² Der Einfachheit halber ignorieren wir hier die Tatsache, dass vorsteuerabzugsberechtigte Unternehmen die USt nicht bezahlen müssen bzw. diese als Vorsteuerabzug geltend machen können. Dies gilt für alle inländischen Ausgaben gleichermaßen, unabhängig davon, ob mit der Bahn, dem Auto oder dem Flugzeug gereist wird.

Nation“ bemitleidet werden sollen. Wie auch bei der Diskussion um CO₂ im Verkehrsumfeld geht es darum, Transparenz zu schaffen und derzeit existierende Sachverhalte zu erläutern.

Bei einer ökonomischen Vollkostenrechnung und Umlegung der Kosten auf den Verursacher bzw. Nutzer, also den Reisenden, der ein Verkehrssystem nutzt, müsste Bahnfahren grundsätzlich sehr viel teurer sein.

5.2 Kostenabschätzung zur Neubaustrecke Hamm – Hannover

Für die Neubaustrecke zwischen Bielefeld und Hannover wurden im Bundesverkehrswegeplan 2030 (BVWP) „Haushaltsrelevante Projektkosten“ in Höhe von knapp 1,9 Mrd. € veranschlagt (45). In dieser Summe sind „**Ausbau-/Neubaukosten**“ in Höhe von **knapp 1,4 Mrd. €** enthalten. Der Ausbau dieser Strecke ist im BVWP mit der Dringlichkeitseinstufung „Vordringlicher Bedarf“ enthalten.

Im Jahr 2015 hat die Deutsche Bahn die Kosten für diese Baumaßnahme bereits mit **rund 5 Mrd. €** angegeben; begründet wurde diese Kostensteigerung seinerzeit mit Anforderungen aus dem „Deutschlandtakt“ (46), die es aufgrund neuer Vorgaben des Bundesverkehrsministeriums inzwischen zu erfüllen gelte. Eine „Kleine Anfrage“ an die Bundesregierung im Sommer 2022 führte zu der Aussage, dass die Bahn inzwischen **Kosten in Höhe von 8,4 Mrd. €** für den Bau dieser Strecke kalkuliere; die erneute Steigerung um mehr als 50% wurde mit der allgemeinen Kostensteigerung aufgrund von Inflation begründet (47), . (Die kumulierte Inflation in Deutschland aus den offiziellen Inflationsraten der Jahre 2015 bis 2022 belief sich auf knapp 17% (48), (49).)

Da es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine festgelegte Trasse gibt und auch kein Planfeststellungsverfahren durchgeführt wurde, sind alle diese Zahlen noch mit großer Vorsicht zu betrachten. Das Einzige, das aufgrund von Erfahrungen in der Vergangenheit unwahrscheinlich ist, ist, dass es billiger werden wird. Interessant ist, dass es bereits zu erheblichen Kostensteigerungen gekommen ist, während das Projekt sich noch in einer vorläufigen Planungsphase befindet und bevor der erste Spatenstich getätigt wurde.

Die nachfolgenden Beispiele zeigen, dass es in den vergangenen Jahrzehnten kein größeres Infrastrukturprojekt der Bahn gegeben hat, bei dem nicht auch während der Bauphase erhebliche Kostensteigerungen, in der Regel einhergehend mit Verschiebungen des Fertigstellungstermins, gegeben hat.

5.3 Kostenprognosen der Bahn

Wir betrachten nachfolgend einige Infrastruktur-Projekte des Schienenverkehrs aus den letzten Jahren. Insbesondere geht es dabei um die geplanten und tatsächlich angefallenen Kosten, aber auch um die zeitlichen Abläufe, da die stark gestiegenen Kosten nicht selten auch mit erheblichen Verzögerungen beim Bau einhergingen.

5.3.1 Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln – Rhein/Main

Die 170 km lange Strecke Köln-Frankfurt wurde Ende der 1980er-Jahre geplant; erste Schätzungen gingen von Baukosten in Höhe von 3,3 Mrd. D-Mark (1,7 Mrd. €) aus. Nachdem die Trasse festgelegt war, wurden die Baukosten mit **5 Mrd. DM (2,6 Mrd. €)** veranschlagt. 1995

wurde zwischen Bahn und Bund eine Finanzierungsvereinbarung nach dem Bundesschienenwegeausbaugesetz getroffen, in der von Gesamtkosten in Höhe von **7,775 Mrd. DM (3,96 Mrd. €)** ausgegangen wurde. In diesen Kosten war die Anbindung des Flughafens Köln-Bonn, die noch einmal zusätzlich mehr als eine Mrd. DM kosten sollte, nicht enthalten. Eine Wirtschaftsprüfungsgesellschaft ermittelte bereits Mitte 2000 zu erwartende **Kostensteigerungen von bis zu 2,765 Mrd. DM (1,41 Mrd. €)** und im März 2002 informierte die DB ihren Aufsichtsrat, dass von **Gesamtkosten in Höhe von 6,0 Mrd. €** ausgegangen werden müsse. Mitte des Jahres 2002 wurde dann der Betrieb auf der Strecke aufgenommen; die wahren Kosten von rund 6 Mrd. € wurden somit erstmals wenige Monate vor der Aufnahme des Fahrbetriebs kommuniziert. Gegenüber der Kostenplanung, die nach Festlegung der Trasse erfolgt war (2,6 Mrd. €), lagen die **endgültigen Baukosten demnach 130% über Plan** (25). Die Kosten für die neu errichteten Bahnhöfe in Siegburg/Bonn, Montabaur und Limburg-Süd sind in diesen Zahlen übrigens nicht erhalten.

Während die Baukosten kontinuierlich anstiegen, verschob sich die Inbetriebnahme der Strecke immer wieder nach hinten. **Ursprünglich war die Eröffnung für 1998 geplant**, dann sprach man von 1999. Mitte 1998, als der Bau bereits in vollem Gange war, wurde die kommerzielle Inbetriebnahme für Mai 2001 datiert, letztendlich wurde die Zulassung für die komplette Strecke als Hochgeschwindigkeitsstrecke zum **1. August 2002 erteilt und der Fahrgastbetrieb aufgenommen. Vier Jahre später als geplant** (25).

5.3.2 Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München

Diese Strecke war Teil des „Verkehrsprojektes Deutsche Einheit Nr. 8“, dem größten Schienenverkehrsprojekt nach der Wiedervereinigung Deutschlands im Jahr 1990 und Teil der Bundesverkehrswegepläne 1992 und 2003.

1993 wurden die **Projektkosten auf 12,4 Mrd. DM (6,34 Mrd. €)** geschätzt. Nach detaillierter Planung ging man im Jahr 1994 bereits von mehr als **15 Mrd. DM (rund 8 Mrd. €)** aus. Damals war die Fertigstellung für das Jahr 2000 geplant. Ende 2011 lagen die geschätzten Gesamtkosten bereits bei **10,3 Mrd. €**. Auf die fragwürdigen Aussagen der Deutschen Bahn zur Nutzung dieser Strecke und auch auf die im Nutzen-Kosten-Vergleich geplanten Güterzüge, die gar nicht unterwegs sind, wurde in Abschnitt 5.3.2 bereits hingewiesen. Jetzt gilt es für diese Strecke festzuhalten, dass auch sie gegenüber den ersten Planungen um **mehr als 60% teurer** wurde. Detaillierte Informationen finden sich in (50), (51), (52), scherzhaft wurde diese Strecke aufgrund der unsinnigen und besonders Tunnel-intensiven Streckenführung zwischenzeitlich auch als die „teuerste U-Bahn Deutschlands“ bezeichnet (53).

5.3.3 ICE-Trasse Ulm – Stuttgart und Stuttgart 21 (S21)

Auch bei schwäbischen Projekten der Bahn kommt es zuweilen zu dramatischen Preissteigerungen. Die bereits 2004 geplante Neubaustrecke zwischen Wendlingen und Ulm wurde ursprünglich mit Kosten in Höhe von gut **2 Mrd. € kalkuliert**. Im Jahr 2010 wurden in der Presse bereits **Kostensteigerungen auf 2,89 Mrd. €** beklagt (54). Doch auch hier war die erste Empörung etwas verfrüht; bei der Aufnahme des Regelbetriebs 2022 waren die Kosten auf fast **4 Mrd. € angestiegen** (55), für 15 Minuten kürzere Fahrzeit. Den vollständigen

Vorteil dieses Projektes werden die Züge allerdings erst dann ausspielen können, wenn der unterirdische Hauptbahnhof in Stuttgart endlich fertig sein wird, ursprünglich auf Dezember 2019 datiert. Bekanntermaßen wird an diesem Bahnhof noch immer gebaut, derzeit (Frühjahr 2023) geht man davon aus, dass der Bahnhof im Dezember 2025 in Betrieb gehen soll.

Es zeigt sich, dass es in den letzten Jahren bei allen größeren Bahnprojekten nicht nur zu dramatischen Kostensteigerungen während der Bauzeit, sondern auch zu unglaublich langen Verzögerungen bei der Fertigstellung gekommen ist. Im Fall von S21 ist die **Bauzeit von knapp 10 Jahren (02/10 – 12/19) um 60% auf 16 Jahre** gestiegen, wobei das die aktuelle Planung ist. Ob der Bahnhof bis Ende 2025 tatsächlich fertig sein wird, eine Betriebsgenehmigung erhalten haben wird und den Betrieb aufgenommen haben, kann Stand heute niemand verbindlich zusagen. Die in (30) gemachten Ausführungen lassen gewisse Zweifel daran gerechtfertigt erscheinen.

Aber zurück zu den Kosten von Stuttgart 21. Es ist das Prestigeprojekt der Bahn im 21. Jahrhundert und finanziell bereits seit Jahren ein absolutes Desaster. Bei der 1995 unterzeichneten **Rahmenvereinbarung kalkulierte man Kosten in Höhe von rund 2,5 Mrd. €**; eine von der Bahn selbst durchgeführte „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung“ ergab Kosten von **2,8 Mrd. €**. Bereits 2008, lange vor Beginn der Bauarbeiten im Februar 2010, hatte die Landesregierung das Vorhaben auf gut 3 Mrd. € taxiert, im gleichen Jahr prophezeite der **Bundesrechnungshof** bereits **Mehrkosten in Höhe von 2 Mrd. €**. Im Nachhinein stellt sich die Frage, auf Basis welcher Zahlen bei einem solchen Projekt überhaupt ein seriöser Nutzen-Kosten-Vergleich erfolgen konnte? Verschiedene Behörden und ein sehr renommiertes Verkehrsplanungsbüro wiesen zudem darauf hin, dass nach ihren Berechnungen die **Kosten im Bereich von 6,7 bis 8,7 Mrd. €** liegen werden. 2016 wird von FDP und Grünen der Antrag im Bundestag eingebracht, das NKV für Stuttgart 21 neu zu berechnen, was von der Bundesregierung abgelehnt wird. Inzwischen geht man von **10 Mrd. € Gesamtkosten** aus. Da sich die Bauarbeiten noch mindestens weitere 2 ½ Jahre hinziehen werden und gerade im Bausektor aktuelle Kostensteigerungen von 15% jährlich keine Seltenheit sind, wird erst die Zukunft zeigen, wie realistisch diese Abschätzung ist.

Interessant ist bei diesem Mammutprojekt, dass inzwischen einiges dafür spricht, dass bereits bei der Unterzeichnung der Finanzierungsverträge im April 2009, also noch vor Baubeginn, bereits damals bekannte, wesentliche Kostensteigerungen schlicht verschwiegen wurden. Im November 2009 legte der damalige Bahn-Chef Rüdiger Grube eine „Sollbruchstelle“ für Stuttgart 21 bei gut 4,5 Mrd. € fest. Sollte diese Grenze überschritten werden, müssten die Projektträger (Deutsche Bahn, Bund, Land Baden-Württemberg, Stadt Stuttgart, Flughafen Stuttgart, Verband Region Stuttgart) erneut über die Finanzierung sprechen. Wie gesagt, diese Sollbruchstelle lag damals um etwa 50% über der Planung; heute liegt man bereits bei mehr als dem Doppelten der „Sollbruchstelle“, ist noch längst nicht fertig, baut aber eifrig weiter.

Eine ausführliche Dokumentation der Pleiten und Pannen sowie des Finanzierungsdesasters von S 21 wurde vom Südwestrundfunk (SWR) erstellt (56), darüber hinaus finden sich Informationen auch in (30) und (57).

5.3.4 Kostenexplosion beim Ausbau der S13

Dass es nicht immer bundesweit bekannte Neu- und Ausbauprojekte der Bahn sind, die sowohl zeitlich wie kostenmäßig vollkommen aus dem Ruder laufen, zeigt dieses letzte Beispiel¹³ aus dem Rheinland. Es handelt sich um den Ausbau der S-Bahn-Line 13 auf der rechtsrheinischen Strecke zwischen Bonn-Oberkassel und Troisdorf. Auf dieser 13 km langen Strecke erfolgt ein viergleisiger Ausbau, zu den bestehenden zwei Gleisen kommen zwei weitere hinzu. Begonnen haben die Arbeiten 2016, die Fertigstellung war für 2026 geplant. Offensichtlich sind **10 Jahre nicht ausreichend, um 13 km zweigleisige Bahnstrecke zu einer bereits existierenden Strecke hinzuzufügen**, denn inzwischen (Frühjahr 2023) ist die Fertigstellung auf 2028 verschoben. Doch nicht nur der Zeitplan war offensichtlich zu ambitioniert, auch bei einem kleinen und regionalen Projekt schafft die Bahn es nicht, die Kosten angemessen zu kalkulieren. Anfang 2023 wurde bekannt, dass die geplanten Baukosten von rund 500 Mio. € auf 750 Mio. € steigen werden, das sind glatte 50% Kostensteigerung (58).

Zu einem wahren Schildbürgerstreich entwickelte sich dieses Bahnausbauprojekt aber dadurch, als in der Öffentlichkeit bekannt wurde, dass die mit dem Ausbau der Gleise prognostizierten zusätzlichen Züge auch nach Fertigstellung der Gleise nicht werden fahren können, weil an anderer Stelle eine ebenfalls notwendige, zusätzlichen Bahnbrücke schlicht „vergessen“ wurde, (59). Die mediale Aufarbeitung dieses „Planungsfehlers“ ergab, dass die für den Ausbau zwischen Bonn-Oberkassel und Troisdorf verantwortliche Projektgruppe bei sich selbst keine „Zuständigkeit“ für den weiteren Verlauf der Strecke ab Troisdorf Richtung Köln sah (60), bei der Bahn selbst die „fehlende Brücke“ aber seit Jahren bekannt war (61). Erst durch einen Gutachter des Bundes wurde festgestellt, dass ohne die Brücke der auf der Ausbaustrecke zusätzlich geplante Verkehr über Troisdorf hinaus gar nicht würde fahren können (62); gut sechs Jahre, nachdem mit den Bauarbeiten zum viergleisigen Ausbau der Strecke begonnen worden war.

5.4 Verantwortlichkeit für Kosten und Nutzen von Infrastruktur

Die im Abschnitt 5.3 beschriebenen Beispiele scheinen alle einem gewissen Trend zu folgen. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem alle planungsrechtlichen Hürden zu bewältigen sind und mit dem Bau begonnen werden kann, werden die Kosten der Baumaßnahme zumindest in der öffentlichen Diskussion möglichst klein gehalten. Gleichmaßen wird von einem sehr hohen Nutzen ausgegangen; zuweilen wird sogar ein Nutzen unterstellt, der bereits vor Beginn der Bauarbeiten von Fachleuten infrage gestellt wird, wie zuvor in Abschnitt 4.3.2 für den Güterverkehr für die HGS Berlin – München ausgeführt.

Eine echte, betriebswirtschaftlichen Kriterien standhaltende Wirtschaftlichkeitsrechnung wird dabei aber definitiv nicht gemacht und diese ist vermutlich von den Verantwortlichen

¹³ Die Liste mit Bahnprojekten, die weder im Rahmen der veranschlagten Kosten noch innerhalb der geplanten Bauzeit fertiggestellt wurden, ließe sich beliebig lang fortsetzen. Einen zusätzlichen Nutzen im Rahmen dieser Studie hätte das nicht. Bereits die bisherigen Beispiele führen unmittelbar vor Augen, dass die Kostenabschätzungen während der Planung von katastrophaler Qualität sind. Diese Aussage wird hier ausschließlich auf Basis der dargestellten Zahlen, Daten und Fakten getroffen. Es wird bewusst KEINE Aussage darüber gemacht, ob diese Fehleinschätzungen auf Unvermögen der handelnden Personen, auf Unwägbarkeiten der Bauvorhaben, oder gar auf bewusstem „Schönrechnen“ beruhen. Letzteres würde bedeuten, dass gezielt versucht wird, politische Entscheidungen, denen ein NKV zugrunde liegt, im Vorfeld in eine bestimmte Richtung zu beeinflussen.

auch gar nicht gewollt. Ist das Bauprojekt erst einmal begonnen, kommt irgendwann der Zeitpunkt des „*Point of no Return*“, nachdem es keinen Stopp und keine Umkehr mehr gibt. Dann muss das Projekt zu Ende geführt werden, um jeden Preis. Aufgrund der sehr langen Zeitdauern sind in der Regel diejenigen, die den Start des Projektes verantwortet haben, auch längst nicht mehr in der gleichen Rolle verantwortlich. So wurde beispielsweise die erste Rahmenvereinbarung für Stuttgart 21 im Jahr 1995 getroffen. Seit dieser Zeit gab es bei der Deutschen Bahn mit Heinz Dürr, Johannes Ludewig, Hartmut Mehdorn, Rüdiger Grube und Richard Lutz fünf Vorstandsvorsitzende; die Liste der Bundesverkehrsminister im gleichen Zeitraum ist mit Matthias Wissmann, Franz Müntefering, Reinhard Klimmt, Kurt Bodewig, Manfred Stolpe, Wolfgang Tiefensee, Peter Ramsauer, Alexander Dobrindt, Christian Schmidt, Andreas Scheuer und Volker Wissing mehr als doppelt so lang. Dass diese 11 Verkehrsminister in 28 Jahren aus vier verschiedenen Parteien (CDU, SPD, CSU, FDP) kommen, sollte in einer Demokratie nicht kritisiert werden; ob die unterschiedlichen politischen Überzeugungen aber hilfreich sind, wenn es um die Bewertung von Nutzen und Kosten geht, soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden. Bei S 21 spielt zudem das Land Baden-Württemberg eine wichtige Rolle und dort hat es im gleichen Zeitraum sieben verschiedene Landesverkehrsminister gegeben.

In jedem Fall kann jeder der Verantwortlichen in den letzten Jahrzehnten bei fast jeder Baumaßnahme der Bahn zurecht behaupten, dass er „das Projekt geerbt“ habe und nur „fortführen müsse“, was die zuvor Verantwortlichen angerichtet haben. Verantwortung und Verantwortlichkeit für zusätzliche Milliardenbeträge bei den Kosten und für jahrelange Verzögerungen wird sich niemand der im Laufe der Jahre handelnden Personen zurechnen lassen.

Unabhängig von den politisch und auf Unternehmensseite Verantwortlichen lässt sich aber im konkreten Fall häufig „nachrechnen“, wie Kosten und Nutzen tatsächlich im Verhältnis stehen. Der Stuttgarter Hauptbahnhof wird aktuell von rund 300.000 Reisenden täglich genutzt. Im Jahr sind dies mehr als 100 Millionen, wenn wir der Einfachheit halber unterstellen, dass auch an Samstagen sowie Sonn- und Feiertagen die gleiche Anzahl an Reisenden den Bahnhof nutzt. Niemand kann vorhersehen, welche Mobilitätsformen in 30 oder 50 Jahren von der nächsten und übernächsten Generation präferiert werden, weil die im Mobilitätsfeld zu erwartenden Innovationen erheblich und von wahrhaft disruptiver Natur sein werden. Trotzdem unterstellen wir für diese Beispielrechnung an dieser Stelle, dass über einen Zeitraum von 30 Jahren die Anzahl der Reisenden gleichbleibt, dann reden wir über insgesamt 3,2 Mrd. Reisende. Das heißt, dass 30 Jahre lang jeder Reisende bei jeder Ankunft und bei jeder Abfahrt mehr als drei Euro für die Nutzung des Bahnhofs zahlen müsste, nur um die Baukosten zu finanzieren. Ein Pendler, der morgens hin und abends wieder zurückfährt, müsste über sein Ticket jeden Tag mehr als sechs Euro „Bahnhofbenutzungsgebühr“ zahlen.

Und selbst diese Rechnung ist geschönt, denn die Kapitalkosten, die seit nunmehr 12 Jahren bereits anfallen und in den nächsten Jahrzehnten weiter anfallen werden (kalkulatorisch mit mind. 6% anzusetzen), müssten auch noch berücksichtigt werden. Wenn der Bahnhof dann im Betrieb sein wird, kommen zudem noch laufenden Kosten für Reinigung, Strom für Rolltreppen, Fahrstühle und Beleuchtung, etc. hinzu. Von Wartungsarbeiten und deren Kosten, die im Laufe von 30 Jahren definitiv anfallen werden, wollen wir an dieser Stelle gar nicht sprechen. Selbst wenn die Kosten über 50 Jahre verteilt würden, haben wir immer noch

etwa 2 Euro pro Fahrgast und Bahnhofsnutzung nur für die reinen Baukosten. Diese Beträge und alle anderen Kosten müssten im Laufe der Jahre natürlich mindestens um die jährliche Inflationsrate steigen, denn für einen Euro, der bei Baubeginn im Jahr 2010 verbaut wurde, müsste bereits heute, nach Berücksichtigung der kumulierten Inflation von fast 30% in den letzten 13 Jahren, 1,30 € zurückgezahlt werden.

Es wird deutlich, dass Projekte wie Stuttgart 21 aus kaufmännischer Sicht überhaupt nicht zu rechtfertigen sind; selbst wenn die Kosten im Rahmen der ersten realistischen Abschätzung geblieben wären. In Deutschland ist es seit geraumer Zeit üblich, Milliardensummen in die Subventionierung der Bahn mit Umweltschutzaspekten zu rechtfertigen, weil im Schienenverkehr angeblich weniger CO₂ emittiert wird. Dass diese falsche Betrachtungsweise nur aufgeht, wenn man die enormen CO₂-Belastungen aus dem Bau der Infrastruktur ignoriert, anstatt sie korrekterweise auf die Verkehrsleistung umzulegen, haben wir in Kapitel 2 ausführlich dargestellt. Was die CO₂-Betrachtung für S 21 angeht, können wir unter Zugrundelegung der gleichen Annahmen bzgl. Anzahl Reisenden betrachten: Ein sehr renommiertes Verkehrsberatungsunternehmen hat in (63) konkret berechnet, dass allein durch die Produktion der Materialien für den Bau von S 21 mind. 1,9 Mio. Tonnen CO₂ emittiert werden; diese Studie stammt aus dem Jahr 2017, als man noch davon ausging, dass der Bahnhof bis heute längst in Betrieb sein würde. Allein aus der Tatsache, dass nach wie vor gebaut wird, lässt sich ableiten, dass erhebliche weitere CO₂-Emissionen angefallen sind und auch zukünftig anfallen werden. In Summe werden die CO₂-Emissionen für den Bau von S 21 2 Mio. Tonnen deutlich übersteigen; der Einfachheit halber rechnen wir jetzt aber mit 2 Mio. Tonnen oder 2 Mrd. Kilogramm CO₂. Legen wir diese enorme Menge auf die Reisenden der kommenden 30 oder 50 Jahre um, so kommen wir auf rund **600 Gramm CO₂ für jede einzelne Nutzung** des Bahnhofs durch einen Reisenden (30 Jahre) bzw. **365 Gramm CO₂ für jede Nutzung über einen Zeitraum von 50 Jahren**.

Wie gesagt, das sind nur die CO₂-Emissionen aus dem Bau des Bahnhofs, auch in den nächsten Jahrzehnten werden für Wartung und Betrieb weitere Emissionen anfallen, die hinzuge-rechnet werden müssen. Zu beachten gilt auch, dass diese CO₂-Mengen verursacht werden, ohne dass es zur irgendeiner zusätzlichen Transportleistung kommt. Es dreht sich ja „nur“ um das Ersetzen eines bereits existierenden Bahnhofs durch einen neuen Bahnhof. Aus der Perspektive des Klimaschutzes ist zudem zu berücksichtigen, dass alle diese Emissionen bereits angefallen sind oder bis zur Fertigstellung noch anfallen werden. Sie sind somit sofort klimawirksam und werden dies nach aktuellem Stand der Forschung für die nächsten rund 100 Jahre sein.

5.5 Kosten-Nutzen-Betrachtung für die Strecke Bielefeld – Hannover

Unterstellen wir an dieser Stelle, dass es wirklich bei reinen Baukosten in Höhe von 8,4 Mrd. € bleibt, auch wenn dies aufgrund der zuvor beschriebenen Beispiele als sehr unrealistisch anzunehmen ist. Wie viele Reisende müssen in welchem Zeitraum zusätzlich befördert werden, damit diese enormen Kosten zu rechtfertigen sind? Wichtig sind in diesem Zusammenhang zwei Aspekte. Einerseits dürfen wirklich nur die „**zusätzlichen Reisenden**“ gezählt werden, denn für die Personen, die heute schon mit dem Zug auf der Strecke unterwegs sind, kann angenommen werden, dass sie dies auch zukünftig auf der bisherigen Strecke tun werden. Wenn Fahrgäste von der alten auf die neue Strecke umsteigen, ist dadurch die alte

Strecke weniger frequentiert, die Verkehrsleistung auf dieser Strecke nimmt ab. Das heißt, dass sowohl die ökonomischen wie auch die ökologischen Kosten je PKM auf dieser Strecke ansteigen, weil diese zum großen Teil als Fixkosten beim Bau der Strecke bereits angefallen sind.

Zudem wird die Bahn argumentieren, dass auch Güterzüge auf der Strecke unterwegs sein werden, dass also Frachtverkehre ebenfalls in die ökonomische Nutzenrechnung einbezogen werden müssen. Dies ist grundsätzlich richtig, dazu müsste man aber im Vorfeld sehr viel genauer wissen, welche Frachtmenge über die Jahre dort bewegt werden. In Abschnitt 4.3.2 haben wir am Beispiel der Neubaustrecke Berlin – München gesehen, wie geschönt gerade diese Zahlen zuweilen sind, denn entgegen den politischen Planungen ist dort kein Güterzug unterwegs. Für die folgenden Überlegungen bleiben wir deshalb bei Abschätzungen im Personenverkehr.

Legt man 8,4 Mrd. € auf die zu erwartende Transportleistung bei Reisenden um, so benötigt man bereits 840 Mio. Fahrgäste (in welchem Zeitraum auch immer), um die Kosten je Fahrt auf „nur 10,- €“ zu bringen. Es muss nochmals verdeutlicht werden, es geht hier nur um die Strecke von Bielefeld nach Hannover, das sind knapp 80 km. Selbst bei einer unrealistischen Nutzungsdauer von **50 Jahren**, müssten **Jahr für Jahr 16,8 Mio. Fahrgäste zusätzlich** auf dieser Strecke unterwegs sein; rechnet man nur **30 Jahre**, wären **jedes Jahr 28 Mio. Reisende zusätzlich notwendig**. Abgesehen davon, dass diese Anzahl an Reisenden schlicht nicht realistisch ist, wären für die meisten Menschen auch Bahntickets unerschwinglich, wenn allein für die Baukosten einer solch kurzen Strecke für jede Fahrt ein Preis von 10,- € zugrunde gelegt werden müsste. Und dies nur für die reinen Baukosten dieses Streckenabschnitts, ohne Kapitalkosten, ohne Einbeziehung der Inflation, ohne dass ein Zug angeschafft, Bahnhöfe gebaut und unterhalten werden oder Personal angemessen bezahlt wird.

In Abschnitt 4.3.3 hatten wir gesehen, dass die Anzahl der Flugpassagiere von Köln/Bonn bzw. Düsseldorf nach Berlin und zurück in den letzten Jahren vor Corona im Bereich zwischen 2,4 und 2,7 Millionen jährlich lag. Um die Strecke wie zuvor dargelegt mit „zusätzlichen Reisenden“ entsprechend auszulasten, **müssten nicht nur 100% aller Flugreisenden aus dem Rheinland nach Berlin auf die Bahn umsteigen, sondern es müssten zusätzlich zu all diesen umgestiegenen Fluggästen noch sechs bis zehn Mal mehr Menschen Jahr für Jahr auf der Bahnstrecke unterwegs sein.**

Bei diesen Zahlen zeigt sich sofort, dass es selbst bei der Annahme, dass die Kosten im Rahmen der heutigen Planung blieben, bereits **keinerlei betriebswirtschaftliche Rechnung mehr geben kann, die den Bau einer solchen Strecke rechtfertigt**. Auch eine heute vollkommen unbekannte Größe im Güterverkehr wird niemals dazu führen, dass eine solide ganzheitliche Kostenrechnung eine Rechtfertigung für ein solches Vorhaben hergibt.

Abschließend in diesem Kapitel noch eine grundlegende Anmerkung zum Thema Fracht- und Güterverkehre. Es ist einfach zu fordern, dass „mehr Güter von der Straße auf die Bahn verlagert“ werden müssen. Betrachtet man nur die reine Masse in Tonnen und die Wegstrecke in km und schaut dann auf die Transportleistung in Tonnenkilometer (tkm), so zeigt sich, dass der Anteil des Güterverkehrs auf der Schiene in den letzten zehn Jahren kontinuierlich zwischen 17% und 19% gelegen hat. Auf der Straße werden Jahr für Jahr zwischen 70% und

73% der Frachtverkehrsleistung erbracht.¹⁴ Dies, trotz aller bereits erfolgten Bestrebungen, Verkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern. In der Diskussion über die Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene wird häufig nicht berücksichtigt, dass die **logistischen Anforderungen im Vordergrund** stehen müssen. Welche Güter eignen sich für den Transport mit der Bahn? Zweifellos trifft dies auf Massengüter zu, die in sehr großen Mengen von einem Standort zu einem anderen Standort zu bewegen sind. Für Eisenerz oder Koks, das von Schiffen im Hafen zum Stahlwerk gebracht werden muss, ist die Bahn das ideale Verkehrsmittel. Tausende Tonnen Fracht, die alle über die gleiche Wegstrecke zu bewegen ist. Ähnlich sieht es für PKW aus, die von einem Automobilwerk zu einem Überseehafen zur Verschiffung transportiert werden müssen.

In der Regel sind solche Transporte von ihrer Anforderung her auch nicht extrem zeitkritisch; sicher müssen auch hier Termine eingehalten werden, aber wenn von vorneherein eingeplant wird, dass der Transport zwei oder drei Tage oder auch eine Woche benötigt, dann ist dieser Zeitrahmen Teil der logistischen Anforderung und durch einen Schienentransport durchaus zu erfüllen.

Ganz anders sieht es aus, wenn über Nacht Hunderttausende einzelne Päckchen von einem oder mehreren Zentrallagern zu Hunderttausenden verschiedenen Empfängern zu transportieren sind. Hier ist die Schiene das denkbar ungünstigste Verkehrssystem, denn es gehört zur logistischen Anforderung, dass der Transport innerhalb weniger Stunden erfolgt. Gleiches gilt für Stückguttransporte, wenn beispielsweise spezielle Ersatzteile schnell zum Empfänger zu bringen sind, oder wenn verderbliche Ware (Obst, Gemüse, Blumen) zu Discountern, Supermärkten oder anderen Einzelhandelsgeschäften zu transportieren ist.

Betrachtet man jetzt die bereits veränderte und sich weiter verändernde Situation des Wirtschaftsgeschehens in Deutschland und Europa, bei der Schwerindustrie eine geringere und Dienstleistungsaufgaben eine größere Rolle einnehmen, kommt schnell die Erkenntnis, dass die Transportvorgänge, die ideal für Schienenverkehr sind, tendenziell eher abnehmen. Von daher darf bezweifelt werden, ob es gelingen wird, einen in Relation zu den anderen Verkehrssystemen signifikant größeren Anteil von Fracht- und Güterverkehr (zurück) auf die Schiene zu bringen. Hier sind die politischen Verantwortlichen auch dahingehend gefordert, ideologische Wunschvorstellungen durch realistische Einschätzungen zu ersetzen und falschen Erwartungen der Öffentlichkeit entgegenzutreten.

Ganz konkret heißt dies für den hier untersuchten Streckenabschnitt von Bielefeld nach Hannover: Wie viel Güterverkehr ist zukünftig auf dieser Strecke zu erwarten? Was ist eine realistische Größe für die Anzahl der Güterzüge, die hier täglich verkehren werden. Dass die Strecke für Güterzüge geeignet sein wird, wird an in diesem Zusammenhang zunächst einmal vorausgesetzt.

¹⁴ Die restlichen Güter werden in der Binnenschifffahrt, über Pipelines (Öl, Gas) und als Luftfracht transportiert.

6 Physikalische Aspekte von Mobilität

In einem Gastbeitrag für das unabhängige Journalismus-Portal „The Pioneer“ hat der Autor dieser Studie Anfang 2023 über „die Macht der Physik“ im Verkehrsumfeld geschrieben (64).

Man kann nicht über Mobilität reden und versuchen, innovative und effiziente Verkehrssysteme zu entwickeln, ohne sich über einige grundlegende physikalische Sachverhalte im Klaren zu sein. Für die weitere Betrachtung ist es deshalb hilfreich, sich die eine oder andere Physikstunde aus dem Schulunterricht wieder ins Gedächtnis zu rufen.

Jede Form von Mobilität, jeder einzelne Bewegungsvorgang, gleichgültig ob Personen oder Güter transportiert werden, unabhängig davon, ob Fahrräder, Autos, Busse, Züge oder Flugzeuge zur Fortbewegung eingesetzt werden, gehorcht den Gesetzen der Physik. Wie alle Naturwissenschaften und auch die zur präzisen Beschreibung naturwissenschaftlicher Zusammenhänge eingesetzte Mathematik, ist Physik unideologisch und neutral, sie gilt im gesamten Universum, sie kümmert sich nicht um Parteiprogramme und Mehrheitsmeinungen, sie ist vollständig emotionslos und es spielt in der Physik keine Rolle, ob Reisende ein „gutes oder schlechtes Gefühl haben“, wenn ein bestimmtes Verkehrsmittel genutzt wird. Physikalische Gesetzmäßigkeiten können weder durch demokratisch getroffene Beschlüsse noch durch autokratisch verordnete Vorgaben beeinflusst oder verändert werden.

Entscheidend für die aus physikalischen Gesetzen abgeleitete, notwendige Antriebsenergie bei jeglichen Transportvorgängen sind folgende Kenngrößen:

- die **Geschwindigkeit**, mit der sich das Transportmittel bewegt,
- die zu bewegende **Gesamtmasse**,
- die Anzahl der **Beschleunigungsvorgänge**, die im Laufe der Transportleistung anfallen,
- sowie die **Hubarbeit**, also die zu leistende Arbeit, die während des Transports zur Überwindung der Schwerkraft notwendig ist.

Da die zu bewegende Masse sowohl für Beschleunigungsvorgänge als auch bei der Hubarbeit eine entscheidende Rolle spielt, betrachten wir zunächst, welche Masse für jeweils eine Person bewegt werden muss: Beim Zug nehmen wir den ICE 3 als Beispiel, der auf eine Leermasse von rund 408 Tonnen und, je nach Baureihe, 425-460 Plätzen kommt; so dass unter Zugrundelegung der durchschnittlichen Auslastung der DB von 55% (2017) bis 56% (2019) fast **1,7 Tonnen Zuggewicht pro Passagier** zu bewegen sind (65), (66). Selbst bei voller Auslastung der Züge fallen 935 kg Zuggewicht für jeden Passagier an, der in einem ICE 3 unterwegs ist.

Auch im Nah- und Regionalverkehr der Bahn in Deutschland sind die Verhältnisse zwischen Nutzlast und zu bewegender Gesamtmasse nicht wirklich besser. Dort häufig eingesetzte Züge haben Leermassen zwischen 120 t und 168 t (67). Für die Auslastung der Regio- und Nahverkehrszüge auf der betrachteten Strecke zwischen Hamm und Hannover liegen bedauerlicherweise überhaupt keine Zahlen vor, so dass beispielhaft auf eine andere Strecke verwiesen werden muss. Stellt man die von der Bahn angegebenen Zahlen über gefahrene Zugkilometer, geleistete Personenkilometer sowie Sitzplätze in den Zügen in Relation, ergibt sich

beispielsweise für den RE8 (RB27) zwischen Koblenz und Mönchengladbach eine Auslastung von durchschnittlich 44% - 53% auf dem Teil der Strecke, der zum Nahverkehr Rheinland in Nordrhein-Westfalen gehört (68). Für die Auslastung auf dem Streckenabschnitt in Rheinland-Pfalz liegen keine Zahlen vor; sie muss als geringer angenommen werden, da es sich um ein deutlich weniger dicht besiedeltes Gebiet handelt. Selbst bei der zuvor genannten Durchschnitts-Auslastung von rund 50% ergeben sich „Zugmassen“ von deutlich mehr als 1 t pro Fahrgast (67). Da gerade im Regional- und Nahverkehr die Zugauslastung sehr stark von den Tageszeiten abhängt, gibt es für vier bis fünf Stunden täglich höhere Auslastungen, über rund 10 Stunden am Tag werden aber häufig nur 20 oder 30 Fahrgäste in Zügen mit weit mehr als 100 t Leergewicht transportiert.

Bereits diese Zahlen zeigen, welche systemimmanenten Defizite im Verkehrssystem Schiene vorliegen, denn die zu bewegende Gesamtmasse ist eine der entscheidenden Größen bei den weiteren Berechnungen. **Die Züge sind im Verhältnis zur Nutzlast (die Reisenden), die sie transportieren, viel zu schwer.**

Der Vollständigkeit halber und um bessere Vergleichsmöglichkeiten zu haben, werden wir in diesem Kapitel auch ein Stück weit auf die physikalischen Zusammenhänge bei den Verkehrssystemen Straße und Luftfahrt eingehen.

Die in Deutschland zugelassenen KFZ haben aktuell ein durchschnittliches Gewicht von 1,5 Tonnen je Fahrzeug, Tendenz steigend. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge haben im Vergleich der jeweiligen Fahrzeugtypklassen in der Regel eine größere Masse als KFZ mit Verbrennungsmotor, was aus dem hohen Gewicht der Batterien resultiert. Zwar wird seit Jahren überall auf der Welt an effizienteren Batterien geforscht und es wurden auch bereits große Fortschritte erzielt, aber die heute verbauten Energiespeicher für elektrisch angetriebene PKW bringen selbst für Kleinwagen mit geringer Reichweite schnell 250 kg auf die Waage. Da für eine Kilowattstunde (kWh) elektrische Leistung in der Batterie nach wie vor 6 bis 8 kg Gewicht anfallen, bringt allein die Antriebsbatterie für größere Fahrzeuge mit 70 bis 100 kWh Leistung 500 kg und mehr Leergewicht mit sich. Dies wird auch durch die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren leichteren Elektroantriebe nicht kompensiert. Bei Hybrid-Fahrzeugen, die sowohl über Verbrennungsmotor als auch Elektromotor verfügen, demzufolge auch sowohl einen Tank für Kraftstoff und eine mehr oder weniger leistungsstarke Batterie für den Elektroantrieb haben müssen, ist das Verhältnis zwischen Fahrzeugmasse und Nutzlast häufig noch schlechter.

Im Folgenden gehen wir von einem Fahrzeugleergewicht bei PKW von 1,5 Tonnen aus. Da die Fahrzeuge durchschnittlich nur mit 1,5 Personen besetzt sind, ergibt sich ein Fahrzeuggewicht von rund 1.000 kg für jede im PKW transportierte Person.

Wie sieht es mit dem Gewicht im Flugzeug aus? Das größte im innerdeutschen Luftverkehr eingesetzte Flugzeug, der Airbus A321 hat ein Leergewicht von 47,5 Tonnen; verteilt auf die 200 Plätze und die durchschnittliche Auslastung von rund 82% (69) fliegen hier „nur“ 290 kg Flugzeuggewicht für jeden Passagier mit.

Bei Flugzeug und Auto mit Verbrennungsmotor ist noch zu berücksichtigen, dass auch die Antriebsenergie in Form von Kraftstoff komplett innerhalb des Verkehrsmittels mitzuführen ist. Aus (1) ist zu entnehmen, dass im Straßenverkehr durchschnittlich 17 kg Treibstoff je

Fahrzeuginsasse mitgeführt werden müssen, im innerdeutschen Flugverkehr sind es durchschnittlich 57 kg je Passagier. Unterstellen wir weiterhin, dass eine Person inkl. Gepäck unabhängig vom Verkehrsmittel 100 kg „Nutzlast“ auf die Waage bringt, so haben wir folgende durchschnittlichen Gesamtmassen zu bewegen: KFZ: 1.117 kg/Person; ICE3: 1.800 kg/Person; Airbus A321: 447 kg/Person.

6.1 Berechnungen zum Energieverbrauch

Betrachten wir zunächst die für die Beschleunigung notwendige Energie, die durch die Masse und die Endgeschwindigkeit bestimmt wird, wobei der Energiebedarf quadratisch mit der zu erreichenden Geschwindigkeit steigt¹⁵.

Die pro Person zu beschleunigende Gesamtmasse haben wir zuvor bereits bestimmt, sodass wir die notwendige Energie zur Beschleunigung von einer Person im ICE aus dem Stand auf 300 km/h unmittelbar aus folgender Formel ableiten können:

$$\text{Energiemenge (in J)} = 0,5 * \text{Masse (in kg)} * \text{Geschwindigkeit (in m/s)}^2$$

$$\mathbf{1.800 \text{ kg auf } 83,3 \text{ m/s (300 km/h) beschleunigen} \rightarrow 0,5 * 1.800 * 83,3^2 = \mathbf{6.250 \text{ kJ}}}$$

Jetzt wird der Zug auch in Zukunft nicht permanent mit 300 km/h unterwegs sein können; vielmehr wird es auch weiterhin Streckenabschnitte geben, auf denen langsamer gefahren werden muss, so dass sich viele weitere Beschleunigungsphasen ergeben. Da bei der Beschleunigung die Endgeschwindigkeit quadratisch in den Energiebedarf eingeht, ist eine Beschleunigungsvorgang von 120 km/h auf 200 km/h mit einer Masse von 1.800 kg mit 1.777 kJ oder von 200 km/h auf 270 km/h (2.285 kJ) sehr viel energieintensiver als eine Beschleunigung von 0 auf 120 km/h (1.000 kJ).

Reist eine Person mit dem ICE von Köln nach Berlin, so wird der durchgehende ICE auch in Zukunft Zwischenhalte haben, an denen er zum Stillstand kommt; anschließend ist dann erneut eine Beschleunigung auf die Reisegeschwindigkeit notwendig. Die aktuell schnellsten Verbindungen aus dem Rheinland nach Berlin halten auf dem Weg an mindestens sieben weiteren Bahnhöfen, von denen jeweils aus dem Stand auf die Reisegeschwindigkeit beschleunigt werden muss. Wenn es tatsächlich gelingt, alle Strecken zwischen den Haltebahnhöfen so auszubauen, dass der Zug mindestens einmal die Geschwindigkeit von 300 km/h erreicht, erfordert dies für **jeden Fahrgast auf der gesamten Strecke eine Energiemenge von 50.000 kJ nur für die Beschleunigungsvorgänge aus den Bahnhöfen heraus**. Selbst wenn die Maximalgeschwindigkeit „nur“ 270 km/h beträgt, beläuft sich notwendige Beschleunigungsenergie für acht Beschleunigungen von 0 km/h auf 270 km/h auf 40.504 kJ. Beträgt die **Maximalgeschwindigkeit „nur“ 220 km/h, reduziert sich die Energiemenge für acht Beschleunigungsvorgänge aus dem Stand auf knapp 27.000 kJ**. Eine Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit um etwa 25% führt zu einer Energieeinsparung bei der Beschleunigung von gut 45%.

¹⁵ Die physikalische Einheit für Energie ist Joule (J); da wir es aber bei diesen Überlegungen immer mit Tausenden Joule zu tun haben, verwenden wir Kilojoule (kJ). Häufig liest man auch von Megajoule (MJ), das sind 1.000 kJ oder 1.000.000 J. Zur weiteren Einordnung: 1 Wattsekunde (Ws) elektrischer Leistung entspricht 1 J, so dass 1 Kilowattstunde (kWh) elektrischer Leistung mit einer Energiemenge von 3,6 MJ gleichzusetzen ist.

Anders sieht es aus, wenn ich mit dem Flugzeug unterwegs bin, denn dort gibt es grundsätzlich nur einen Beschleunigungsvorgang, beim Start, und einen „Verzögerungsvorgang“ (Bremsen) bei der Landung. Allerdings wird bei der einen Beschleunigung auf sehr viel größere Geschwindigkeiten beschleunigt, im Linienverkehr auf etwa 875 km/h (0,8 Mach, 80% der Schallgeschwindigkeit). Die zu beschleunigende Masse je Passagier ist aber deutlich geringer als im Flugzeug:

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

Der einzelne Beschleunigungsvorgang ist zwar deutlich energieintensiver als beim Zug, aber das wiederholte Anhalten und erneute Beschleunigen des Zuges wirkt sich über die insgesamt zurückzulegende Strecke für die Bahnfahrt negativ aus.

Selbst bei der stark vereinfachten Rechnung, die wir zuvor für die Zugfahrt durchgeführt haben und die dem komplexen Bewegungsprofil einer Bahnfahrt in keiner Weise gerecht wird, benötigt der Zugreisende ein Vielfaches der Beschleunigungsenergie im Vergleich mit dem Passagier im Flugzeug, weil dort eine sehr viel geringere Masse nur einmal beschleunigt werden muss.

Auch im Regionalverkehr der Bahn zeigt sich bei der energetischen Betrachtung der Beschleunigungsvorgänge dieses grundsätzliche Defizit, das Bahnfahren mit häufigem Anhalten und danach erneut notwendigem Beschleunigen kennzeichnet. Fährt eine Person beispielsweise mit Zügen des Regionalverkehrs von Hamm nach Hannover (RE6 Hamm bis Minden, S1 Minden bis Hannover) gibt es in Summe 23 Zwischenhalte auf der rund 180 km langen Strecke; es sind also alle 7 bis 8 km sehr energieintensive Beschleunigungen von 0 auf 140 km/h notwendig. Unterstellen wir lediglich ein Zuggewicht von 1 t pro Passagier, sodass als Gesamtmasse 1.100 kg zu veranschlagen sind, erfordern 24 Beschleunigungsvorgänge von 0 auf 140 km/h eine Gesamtenergie von mehr als 18.000 kJ. Fährt der Zug außerhalb der Stoßzeiten, sodass die zu bewegende Zug-Masse 3 t für jeden Fahrgast ausmacht, erhöht sich dieser Wert auf das Dreifache, also mehr als 54.000 kJ.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass für eine abschließende energetische Bewertung der gesamten Zugfahrt auch berücksichtigt werden muss, dass moderne Elektrolokomotiven (und auch elektrisch betriebene bzw. Hybrid-PKW) **beim Bremsen Energie zurück in das Stromnetz** (bzw. die Batterie) einspeisen (**rekuperieren**) können. Im Verhältnis zur notwendigen Gesamtenergie ist dies jedoch nur ein Bruchteil dessen, was für die Vielzahl an Beschleunigungsvorgängen notwendig ist. Die Deutsche Bahn gibt die Strommenge, die insgesamt durch **Bremsenergieerückspeisung** eingespart werden konnte, für **die Jahre 2016 bis 2018 mit 7% (2016, 2017) und 9% (2018)** an (70). Für die in dieser Studie dargestellten Zahlen, deren detaillierte Berechnungen in 9.4 aufgeführt sind, wurden die von der Bahn publizierten verbrauchten Energiemengen verwendet, bei denen die durch Rekuperation zurückgewonnene Energie bereits in Abzug gebracht und deshalb berücksichtigt ist.

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

Als nächstes wenden wir uns den Fahrtwiderständen und insbesondere dem **Luftwiderstand** zu, der ebenfalls eine wichtige Größe bei der energetischen Betrachtung von Mobilität

darstellt. Die Kraft, die notwendig ist, um den Luftwiderstand zu überwinden, bestimmt sich aus der Luftdichte, dem „Widerstandsbeiwert c_w “, der „(Stirn-)Fläche“ des Verkehrsmittels (beim Flugzeug Flügelfläche) sowie der Geschwindigkeit. Die Luftdichte ρ (Rho, in kg/m^3) ist abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchte; der „ c_w -Wert“ (auch Strömungswiderstandskoeffizient genannt) ist bei einem Zug von der Gesamtlänge und der Form der Lokomotive und des letzten Wagens abhängig, der erste Wagen eines ICE bzw. die Lokomotive und der letzte Wagen sind mit je rund 0,2-0,25 zu berücksichtigen, die Wagen dazwischen mit je 0,1.

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

Für die Zugfahrt wird unterstellt, dass ein ICE 3 mit einem Gesamt- c_w -Wert von 1,1, einer Geschwindigkeit von 300 km/h (83,3 m/s) und in einer Luftdichte (ρ) von $1,225 \text{ kg/m}^3$ unterwegs ist. Zur Überwindung der sich aus diesen Zahlen errechnenden Luftwiderstandskraft von rund 51 kN (Kilonewton) über eine Entfernung von 1.000 m wird eine Energie von mehr als 51 MJ benötigt, wie sich aus nachfolgender Formel errechnen lässt:

$$\text{Energienmenge (in J)} = 0,5 * \text{Stirnfläche (in m}^2) * c_w\text{-Wert} * \text{Luftdichte } \rho \text{ (in kg/m}^3) * \text{Geschwindigkeit (in m/s)}^2$$

Wenn, wie bei der durchschnittlichen Auslastung der Bahn rund 55% der gut 400 Plätze in diesem Zug besetzt sind, ergibt dies etwa **223 kJ pro PKM**; die zur Überwindung des Luftwiderstands für jeden Fahrgast notwendig sind. Fährt der Zug mit einer Geschwindigkeit von „nur“ 200 km/h, sind es lediglich **99 kJ je PKM**. Es zeigt sich deutlich, was es konkret bedeutet, wenn die Geschwindigkeit mit einem „quadratischen Faktor“ in solche Berechnungen eingeht. Eine **Erhöhung der Geschwindigkeit um 50%** (von 200 km/h auf 300 km/h) **benötigt nicht etwa das 1,5-fache der Energie, sondern die 2,25-fache Energie** nur zur Überwindung des Luftwiderstandes. Bei Fahrten durch enge Tunnel steigt die notwendige Energie wie zuvor erläutert nochmals erheblich an.

Einen erheblichen Einfluss auf die zur Überwindung des Luftwiderstands notwendige Energie lässt sich auch im PKW beobachten. Unterstellen wir einen Standard-PKW mit einer Stirnfläche von 3 m^2 , einem c_w -Wert von 0,3 sowie der durchschnittlichen Auslastung von lediglich 1,5 Personen, resultiert dies bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h in 479 kJ je PKW zur Überwindung des Luftwiderstands, bei 180 km/h sind es aber bereits 919 kJ/PKM. Die Erhöhung der Geschwindigkeit um knapp 40% führt fast zu einer Verdopplung der notwendigen Energie zur Überwindung des Luftwiderstands. Hier spielt vor allem auch die sehr schlechte durchschnittliche Auslastung der PKW eine Rolle. Sitzen drei Personen im Fahrzeug,

verbessert sich der Wert bei 130 km/h auf 240 kJ/PKM, bei vier Personen sind es 180 kJ/PKM. Der Luftwiderstand ist nicht von der Masse abhängig, die bewegt wird, sondern lediglich von der Fahrzeugform, der Luftdichte und der Geschwindigkeit!

Die höhere Geschwindigkeit im Flugzeug lässt natürlich den Luftwiderstand stark ansteigen, wobei die geringere Luftdichte (in Reiseflughöhe nur etwa 35% bis 40% des Wertes am Boden) und auch der sehr geringe cw-Wert von Flugzeugen einen positiven Effekt haben. Trotzdem muss von etwas mehr als 800 kJ je PKM ausgegangen werden. Tabellen zu allen Berechnungen mit weiteren Beispielen finden sich in Abschnitt 9.4, weitergehende Überlegungen zur „Mechanischen Bewegungseffizienz“ der Verkehrssysteme in (1).

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

$$\text{Energiemenge (in J)} = \text{Masse (in kg)} * g * h \text{ (in m)}$$

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

Um die Hubarbeit für eine Fahrstrecke bestimmen zu können, bedarf es eines exakten Höhenprofils der Strecke, ähnlich den Profilen, die von Radrennen bekannt sind. Dabei müssen auch Brücken und Tunnel berücksichtigt sein, da diese Bauwerke dazu führen, dass die Strecke „ebener“ wird. Der energetischen Bilanz des Antriebs sind diese Bauwerke definitiv förderlich, allerdings auf Kosten einer immensen CO_2 -Belastung beim Bau. Führen landgebundene Verkehrssysteme durch hügeliges oder gar gebirgiges Terrain, ist die notwendige Hubarbeit, die für einen Fahrgast im Zug geleistet werden muss, aufgrund der durchschnittlich vier Mal höheren Masse (1.800 kg), die angehoben werden muss, oftmals erheblich höher als die Hubarbeit für einen Passagier im durchschnittlich ausgelasteten Flugzeug (447 kg), auch wenn das Flugzeug auf 9.000 m oder mehr steigt.

Für einhundert Höhenmeter sind bei einer Masse von 1.800 kg (ein Reisender im ICE 3) 1.766 kJ Energie notwendig, um die Hubarbeit zu verrichten, im Durchschnitts-PKW bei 1.117 kg Masse sind es 1.096 kJ, im Flugzeug bei den unterstellten 447 kg Gesamtmasse für jeden Passagier sind es 439 kJ. Bei der Hubarbeit gibt es im Gegensatz zur Beschleunigung und zur Überwindung des Luftwiderstands keine Komponenten, die quadratisch in die Berechnung der notwendigen Energiemenge einfließen, aber die unverhältnismäßig großen Massen schlagen hier auch mit ihrem lediglich linearen Faktor voll durch.

6.2 CO₂-Belastung durch die Antriebsenergie

Natürlich gilt es jetzt auch zu betrachten, wieviel CO₂ durch die eigentliche Verbrennung des Kraftstoffes bzw. bei der Erzeugung des Stroms für die Fortbewegung des Verkehrsmittels entsteht. Hier ist zunächst einmal wichtig, dass bei Kraftstoffen nicht Masse (kg) und Volumen (l) vermischt werden, was in der öffentlichen Diskussion immer wieder zu beobachten ist. Da Kohlenwasserstoffe leichter als Wasser sind, entspricht 1 l Benzin rund 0,75 kg, bei Kerosin sind es rund 0,785 kg und bei Dieselmotoren etwa 0,83 kg. Jeweils 1 kg dieser Kohlenwasserstoffe verbrennt zu 3,1 – 3,2 kg CO₂, im Weiteren wird ein Wert von 3,15 kg CO₂ für jeweils 1 kg verbrannten Kraftstoffes zugrunde gelegt (71). Wessen Kfz also z.B. 8 l Benzin (6 kg)/100km verbraucht, produziert 189 g CO₂ pro km; bei einem Kfz, das mit 5 l Diesel/100km auskommt, sind es analog 131 g/km. Der BUND gibt den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß deutscher PKW für 2017 mit 128 g pro km an; mit der durchschnittlichen Auslastung von 1,5 Personen ergibt dies 85 g CO₂/PKM (72). Ähnliche Werte ergeben sich, wenn der Kraftstoffverbrauch moderner Mittelklassewagen ins Verhältnis zur erbrachten Verkehrsleistung gesetzt wird. Die oftmals deutlich niedrigeren Werte der Automobilhersteller sind den niedrigeren Verbräuchen geschuldet, die fast ausschließlich in normierten Fahrzyklen erreicht werden, die nicht der Realität entsprechen.

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

Im Flugverkehr lag der Verbrauch aller deutscher Fluggesellschaften 2018 bei 3,55 l/100 PKM durchschnittlich (73), das entspricht 90 g CO₂/PKM¹⁶.

Beim Strom beliefen sich unter Berücksichtigung des in Deutschland üblichen Strommix und des Inlandsverbrauches im Jahr 2016 die CO₂-Emissionen auf 0,572 kg/kWh, 2017 waren es

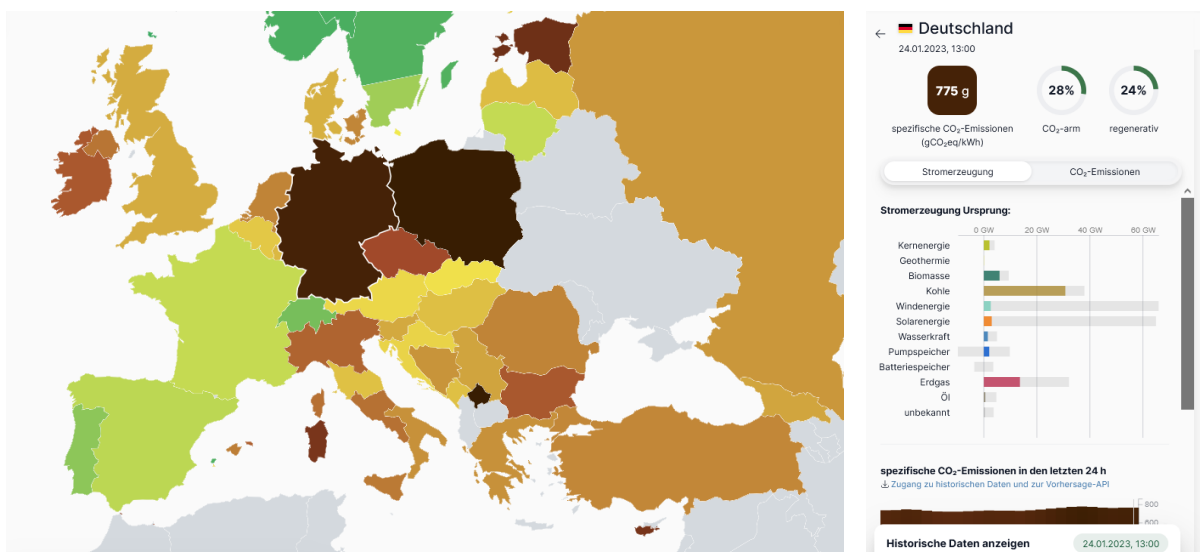
¹⁶ Bei den Diskussionen um THG-Emissionen im Luftverkehr fließt in der öffentlichen Diskussion häufig auch der sogenannte RFI (Radiative Forcing Index) in die Berechnung mit ein. Hierzu ist festzuhalten, dass einer der „geistigen Väter“ des RFI, ein international angesehener Atmosphärenphysiker, sich von der weit verbreiteten „Anwendung des RFI“ vollständig distanziert und diese schlicht als „unsinnig“ und „missbräuchlich angewendet“ bezeichnet (89). Im wissenschaftlichen Umfeld hat man zwischenzeitlich den ERF (Effective Radiative Forcing) Index entwickelt, der in der Fachliteratur beschrieben wird (88). Zudem werden bei Berechnungen des RFI fast immer sämtliche Treibstoffe der Luftfahrt mit einbezogen, ohne dabei zwischen ziviler Luftfahrt und militärischer Luftfahrt zu trennen. Das wäre ungefähr so, als wenn man in die Emissionen des Straßenverkehrs eines Landes sämtliche durch die jeweiligen Landstreitkräfte verursachten Emissionen einbezöge.

0,534 kg/kWh und 2018 dann nach vorläufigen Berechnungen 0,518 kg/kWh. Diese, offiziell vom Umweltbundesamt veröffentlichten Zahlen werden in dieser Untersuchung grundsätzlich für alle CO₂-Berechnungen zum Stromverbrauch zugrunde gelegt (74), (75).

So ist es schlicht unzulässig zu behaupten, die Bahn fahre im Fernverkehr ausschließlich mit Ökostrom und damit emissionsfrei (76) (77), denn auch bei Windstille im Winter fahren elektrisch betriebene Züge mit bis zu 300 km/h durch die Landschaft, wobei der Strom dann weder aus Windrädern noch aus Solaranlagen kommen kann. Für einen fairen Vergleich muss stets die Schadstoffbilanz des insgesamt in einem Land verfügbaren Strommix betrachtet werden. Strom ist weder grün noch blau noch schwarz, Strom sind Elektronen, die durch einen Leiter fließen, ohne „Bewusstsein“ durch welche Primärenergie sie ursprünglich ange-regt wurden¹⁷.

Politische Entscheidungen haben dazu geführt, dass die Menge an CO₂, die in Deutschland bei der Stromproduktion entsteht, trotz aller Bemühungen um eine ökologische Energie-wende nicht gesunken, sondern gestiegen ist und in den nächsten Jahren vermutlich weiter ansteigen wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weniger Gas zur Stromerzeugung ver-wendet werden kann und mangels entsprechender Mengen an Wind- und Solarstrom wieder verstärkt auf Stein- und Braunkohle zurückgegriffen werden muss. Letztere haben mit mehr rund 800 und 1.150 Gramm CO₂ je kWh besonders schlechte CO₂-Bilanzen (78).

Die jeweils aktuelle Situation des CO₂-Ausstoßes je kWh erzeugten Stroms in Deutschland und einigen anderen Staaten bzw. Regionen lässt sich heutzutage online gut nachverfolgen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Situation in Deutschland am 24. Januar 2023 um 13:00



¹⁷ Die Behauptung der Bahn, sie fahre im Fernverkehr zu 100% mit „Ökostrom“ und damit CO₂-frei, wird damit begründet, dass sie in Summe so viel regenerativ erzeugten Strom einkauft, wie sie im Fernverkehr verbraucht. Dabei wird schlicht ignoriert, dass dieser Strom weder komplett ohne CO₂-Emissionen erzeugt werden kann und vor allem in der erforderlichen Menge nicht immer zur Verfügung steht. Auch in Zukunft wird es Situationen geben, bei denen unabhängig von der installierten Leistung an Wind- oder Solarstrom nicht genügend Strom aus regenerativen Quellen verfügbar sein wird, und ein ICE, der von Frankfurt nach Paris unterwegs ist, wird während seiner Fahrt spätestens in Frankreich auch mit Strom aus Kernenergie angetrieben, weil in Frankreich nach wie Strom aus Kernkraftwerken ins Netz eingespeist wird.

Uhr, der spezifische CO₂-Ausstoß des in Deutschland erzeugten Stroms belief sich zu diesem Zeitpunkt auf 775 g/kWh.

*Abbildung: Spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in D, 24.01.23, 13:00 Uhr
Quelle: ElectricityMaps, app.electricitymaps.com (79)*

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass entgegen weit verbreiteter anders lautender Stimmen, auch Strom aus Kernkraftwerken oder aus Wind- und Solarenergie niemals CO₂-frei ist und es auch auf absehbare Zeit nicht sein wird. Sowohl Kraftwerke wie auch Solarzellen und Windräder müssen industriell gefertigt, transportiert, aufgebaut, in Betrieb genommen und dauerhaft betrieben werden, gleiches gilt für jegliche Infrastruktur zum Verteilen des Stroms bis zum Verbraucher. Strom lässt sich auch niemals verlustfrei transportieren, transformieren, von Gleichstrom in Wechselstrom oder umgekehrt umwandeln. Dem Gedanken einer ganzheitlichen Ursache- und Wirkungsbetrachtung entsprechend, muss dies alles ebenso in die Rechnung mit eingehen, wie beispielsweise die zuvor bereits erwähnten Raffinerie- und Verteilkosten für die Produktion von Kraftstoffen. Bereits bei Betrachtung nur der in einem Windrad verbauten Materialien sowie des Fundaments aus Stahlbeton, das für die Aufstellung erforderlich ist (80), wird schnell deutlich, dass es schlicht falsch ist, dass Wind- oder Solarenergie als „Zero-Emission“ Energie bezeichnet wird, auch wenn es inzwischen in der Werbung für Elektro-PKW gerne behauptet wird.

Die zuvor genannten CO₂-Mengen, die bei der Stromerzeugung entstehen, müssen also bei elektrisch betriebenen Zügen bzw. Elektroautos berücksichtigt werden. Ein ICE 3 hat eine Dauerleistung von 8.000 kW; die wird zwar im Betrieb nicht immer vollständig abgerufen werden, aber wenn der Zug mit einer Leistung von 60%-65% über einen Zeitraum von einer Stunde fährt (ungefähr die Fahrtzeit zwischen Hamm und Hannover), so kommen 5.000 kWh auf die Rechnung, die 2,6 t CO₂ entsprechen. Etwas genauer lässt sich die CO₂-Belastung pro PKM für Bahnfahrten in Deutschland aus folgenden Daten ermitteln: Die Bahn selbst gibt die Gesamt-Traktionsenergie für 2017 mit 10.190 GWh zzgl. 436 Mio. Liter Dieselmotorkraftstoff an (65); für 2019 waren es 9.552 GWh und 410,6 Mio. l Diesel (66). Auf den Fernverkehr fielen davon 32,8 % des Stroms und 2,5 % des Diesels. Für den Nah- und Regionalverkehr waren es 43,2% des Stroms sowie 76,1% des Dieselmotorkraftstoffs, die übrigen Strom- und Dieselmengen entfielen auf den Güterverkehr (36).

Für den Fernverkehr ergibt sich aus diesen Zahlen eine CO₂-Belastung nur für die Antriebsenergie von 45 g/PKM im Jahr 2017, für 2019 waren es 37 g/PKM, im Regio-Verkehr waren es 77 g/PKM 2017 und 71 g/PKM 2019. Alle diesbezüglichen Angaben der Bahn beziehen sich auf Netto-Strommengen, die zuvor bereits erwähnten Leitungs- und Umwandlungsverluste sowie die bei Bau und Wartung der elektrischen Infrastruktur entstehenden Emissionen sind unberücksichtigt und müssen bei vollständiger Betrachtung noch hinzuaddiert werden. Sämtliche Detailberechnungen für die hier aufgeführten Zahlen befinden sich im Anhang im Abschnitt 9.5.

Es sei an dieser Stelle auch erwähnt, dass Vergleiche von Schadstoffemissionen verschiedener Verkehrssysteme insbesondere dann sehr schwierig sind, wenn einzelne Verkehrsmittel durch Verbrennungsmotoren, andere durch Strom angetrieben werden. Hier gibt es seit Jahren sehr ideologiegetriebene Diskussionen, in denen sich die Anhänger verschiedener Lager gegenseitig beschuldigen, das jeweils favorisierte Verkehrsmittel schön zu rechnen und

andere Verkehrsmittel schlechter aussehen zu lassen als sie es tatsächlich sind. Beispiele hierfür finden sich in (81), (75) und (82), („Fliegen vs. Bahnfahren“, „Diesel-PKW vs. Elektro-PKW“). Gerade die zuletzt referenzierte Studie hat eine Flut von Stellungnahmen, Gegendarstellungen, Er widerungen der Gegendarstellungen, Meta-Berichte über diese Studie und daraus resultierende Kommentare und Gegenberichte, etc. ausgelöst, die einer sachlichen Diskussion nicht dienlich waren. Ein fairer und ganzheitlicher Vergleich muss ausschließlich anhand konkreter Zahlen, Daten und Fakten erfolgen, die Argumentation sollte sich plausibel aus wertfrei ermittelten Sachverhalten ergeben.

6.3 Luftlinie oder landgebundene Entfernung

Was bei einem Vergleich verschiedener Verkehrssysteme bzgl. der Bewegungseffizienz auch noch zu berücksichtigen ist, sind die tatsächlichen Entfernungen, die zwischen zwei Orten liegen. Bei landgebundenen Verkehrsmitteln wie Bahn und Straße sind zum Teil erheblich längere Strecken zurückzulegen als im Flugzeug. Für drei typische Strecken in Deutschland, Frankfurt-München, München-Hamburg oder Berlin-München fallen beispielsweise bei Bahn- und Autofahrten zwischen 35% und 43% mehr Kilometer an als die Luftlinienentfernung zwischen den jeweiligen Orten ausmacht¹⁸. Korrekterweise sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch im Luftverkehr nicht immer die kürzeste Luftlinienentfernung zwischen zwei Flughäfen veranschlagt werden darf. Vorgeschriebene An- und Abflugrouten sowie die Notwendigkeit zur Staffelung des Flugverkehrs und auch wetterbedingte Routenführungen können zur Folge haben, dass Umwege von bis zu 20% der kürzesten Strecke geflogen werden müssen. Doch auch dann ist immer noch davon auszugehen, dass die tatsächliche zurückzulegende Strecke kürzer ist als die eines landgebundenen Verkehrsmittels. Da die Schadstoffvergleiche in dieser Studie vielfach und wo immer möglich auf PKM bezogen sind, wären beispielsweise 600 km Luftlinie selbst dann 800 km landgebundener Strecke vorzuziehen, wenn die Gesamt-CO₂-Belastung pro PKM auf der Luftlinienstrecke um 30% wäre.

¹⁸ Für den Straßenverkehr haben wir in diesem Kontext unterstellt, dass primär das Fernstraßennetz in Deutschland genutzt wird; bei Verwendung von Nebenstraßen und bei Fahrten durch Tschechien auf der Strecke München – Berlin können die Fahrstrecken kürzer sein, die berechnete Fahrdauer verkürzt sich dadurch aber nicht.

7 Weitere ökologische Aspekte von Verkehrssystemen

Bisher sind wir in unseren Überlegungen fast ausschließlich auf die klimarelevanten Emissionen und hier speziell auf CO₂ eingegangen, weil dies der wichtigste anthropogene Faktor im Zusammenhang mit dem Klima ist. Selbstverständlich gibt es aber noch weitere ökologische Aspekte wie etwa Lärm, Vibrationen und andere Immissionen, oder auch Flächenbedarf der jeweiligen Verkehrssysteme, die zu berücksichtigen sind. Auch bei diesen Themen ist es wichtig, die jeweiligen „Belastungen“ bei ganzheitlicher Betrachtung inhaltlich korrekt zu ermitteln und anschließend auf die Verkehrsleistung umzulegen. Diese Aspekte sind für eine Gesamtbetrachtung ebenfalls bedeutsam und verschiedentlich auch bereits untersucht worden, aber nicht Teil dieser Studie.

Es gibt darüber hinaus aber noch einen weiteren wichtigen Aspekt im Zusammenhang mit CO₂-Emissionen, der an dieser Stelle erläutert werden muss. Dieser steht in unmittelbarem Zusammenhang mit Innovation und technischem Fortschritt. Beispielsweise konnte in der Luftfahrt der durchschnittliche Verbrauch von 6,3 l Kerosin pro 100 PKM im Jahr 1990 auf 3,55 l im Jahr 2018 gesenkt werden (73); das entspricht einer Einsparung von 44%, die sich 1:1 auf die CO₂-Emissionen überträgt, von 159 g/PKM auf 90 g/PKM.

Es zeigt sich, dass Fortschritt und Innovationen dazu führen, dass die gleiche Leistung effizienter erbracht werden kann, was in diesem und vielen anderen Fällen auch positive Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Ähnliche Effizienzsteigerungen konnten bei Verbrennungsmotoren für PKW erreicht werden, wobei jedoch gleichzeitig ein Trend zu größeren und leistungsstärkeren Antrieben in den Fahrzeugen zu verzeichnen war, sodass die sich aus der Innovation ergebenden, möglichen positiven Umweltauswirkungen wieder zunichte gemacht wurden. 1995 betrug die durchschnittliche Leistung der in Deutschland zugelassenen Neuwagen 70 kW (95 PS), 2013 waren es bereits 101 kW (137 PS). Dann glaubte man einige Jahre, das Ende sei erreicht (83), doch 2019 hatte man nach erneut zehn Jahren mit Jahr für Jahr steigenden Motorisierungen einen Durchschnittswert von 116 kW (158 PS), (84), (85). Der gegenüber 1995 um 66% gestiegenen durchschnittlichen Motorenleistung steht deshalb „nur“ eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der daraus resultierenden CO₂-Emissionen um 19% gegenüber. Effizienzsteigerungen durch Innovationen und neue Technologien kommen hier in ihren Auswirkungen nicht vollumfänglich zum Tragen, da andere Entwicklungen zumindest ein Stück weit entgegenwirken.

Ganz anders verhält es sich mit den CO₂-Emissionen, die beim Bau von Infrastrukturen entstehen. Diese fallen ausschließlich zum Zeitpunkt des Baus an. Die Baumaßnahme selbst wird oft mit der sehr langen Lebensdauer des Bauwerks begründet, über die sich der ökologische Aufwand amortisieren soll. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn sind dies, wie wir inzwischen wissen, 30 Jahre für Schienen, feste Fahrbahn und Elektrifizierung. Für die dem Verkehrssystem zuzurechnende CO₂-Belastung bedeutet dies aber, dass Innovation und Fortschritt Jahrzehnte lang keine Wirkung zeigen können. Ganz konkret fallen auch die in den 1990er Jahren beim Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Köln und Frankfurt entstandenen CO₂-Emissionen oder für die im letzten Jahrzehnt gebaute Strecke Berlin - München, die auch heute und in Zukunft den Reisenden noch zugerechnet werden müssen, nach wie vor in dem Maße an, wie es Stand der Technik zum Zeitpunkt des Baus war. Alle in der

Stahl- und Betonproduktion in den letzten 20 Jahren erzielten Verbesserungen und alle Innovationen bei Dieselmotoren von Baufahrzeugen (Katalysator, Partikelfilter, Verbrauchsreduzierung, etc.) bleiben dann ohne Wirkung, denn die bereits in die Umwelt ausgestoßenen Millionen Tonnen CO₂ werden ja nicht wieder eingefangen, nur weil es zu einem späteren Zeitpunkt bessere Technologien gab oder geben wird.

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

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

8 Fazit

Die Abschätzungen zu den CO₂-Emissionen im untersuchten Bahnausbaukorridor und insbesondere die unterschiedlichen Ergebnisse bei Betrachtung der beiden vorgestellten Alternativen macht eindrucksvoll deutlich, dass die auf **Antriebsenergie fokussierte Betrachtung vollkommen unzureichend und demzufolge unzulässig ist**. Das weitgehende oder gar vollständige **Ignorieren der jeweils notwendigen Infrastrukturen liefert ein verzerrtes Bild sowohl des ökologischen Fußabdrucks als auch der ökonomischen Sachverhalte**.

Der **immense CO₂-Fußabdruck von Stahl, Aluminium, Kupfer, und Beton (Zement)**, den hauptsächlich Materialien beim Bau von Wege-Infrastruktur für das Verkehrssystem Schiene **muss in der ökologischen Betrachtung zwingend mitberücksichtigt werden**.

Die derzeit in Deutschland angewendeten **Bewertungsmethoden für neue Bahntrassen und andere Bahnprojekte bilden die enormen CO₂-Mengen, die beim Bau emittiert werden, nicht annähernd korrekt ab**. Im Gegensatz zum Bau von Wege-Infrastruktur für das Verkehrssystem Straße werden Bauvorhaben des Schienenverkehrs systematisch und methodisch fragwürdig „geschönt“. Auch in anderen Untersuchungen und Studien zu ähnlichen Themenfeldern in anderen Regionen wird hierauf explizit hingewiesen. Das in der Fachwelt weithin anerkannte Verkehrsberatungsunternehmen **VIEREGG-RÖSSLER** aus München schreibt in einer kürzlich erschienenen Studie (86): *„So ist der Fernbahntunnel Frankfurt entsprechend dieser äußerst fraglichen Systematik als ‚Flachlandstrecke‘ eingestuft. Diese Implausibilitäten sind als zweifelsfreie Fehler im Bewertungssystem zu sehen, die erhebliche Auswirkungen auf die Bundesverkehrswegeplanung der Schiene haben dürften und umgehend korrigiert werden müssten.“*

Speziell im hier betrachteten Bahnausbau-Korridor und den in dieser Studie untersuchten Alternativen sind insbesondere folgende Sachverhalte zu berücksichtigen:

- Ein Neubau der Strecke (durch den Vorzugskorridor 1) gemäß Schüßler-Plan Nr. 5 wird mit mehr als 1 Million Tonnen CO₂ etwa **die sechsfachen CO₂-Emissionen** verursachen wie ein Ausbau entsprechend des Vorschlags von WiduLand.
- Der Deutschland-Takt für den Korridor Köln-Berlin funktioniert nur, wenn auch der Abschnitt Hamm-Bielefeld auf eine Höchstgeschwindigkeit von 300km/h ausgebaut wird. Betrachtet man den gesamten Korridor Hannover-Hamm werden sogar knapp **1,3 Mio. t CO₂** freigesetzt.
Damit erhöht sich der Faktor im Vergleich zur vorgeschlagenen WiduLand-Variante auf **das Siebenfache**, da bei dieser Variante keine Änderungen im Streckenabschnitt Bielefeld-Hamm erforderlich sind.
- Selbst bei **sehr optimistischen Annahmen von zukünftigen zusätzlichen Fahrgastzahlen** auf der Strecke Hannover-Bielefeld (Hamm) und der Annahme, dass die Baukosten im Rahmen der heutigen Planung blieben, zeigen die Berechnungen, dass eine **Hochgeschwindigkeitsstrecke Hannover-Bielefeld (Hamm)** im Vergleich zur

vorgeschlagenen WiduLand-Variante **weder ökologisch noch ökonomisch zu rechtfertigen ist.**

- Untersuchungen zu prognostizierten und tatsächlich eingetretenen Kosten größerer Bahnprojekte der letzten Jahrzehnte zeigen deutlich, dass **Kostensteigerungen um 50% bis 100% die Regel sind und in Einzelfällen auch deutlich darüber hinaus gehen.** Wären die tatsächlich angefallenen Kosten bereits im Vorfeld korrekt in den zwingend vorgeschriebene Nutzen-Kosten-Vergleich (NKV) eingeflossen, hätten diese Projekte niemals realisiert werden dürfen.
- Konkrete **Fahrgastzahlen der Bahn**, detailliert ausgewiesen nach Fahrtstrecken zwischen Bahnhöfen, sind für die Öffentlichkeit bedauerlicherweise **auch im Jahr 2023 nicht verfügbar.** In Einzelfällen **seitens der Bahn prognostizierte Zahlen zur Entwicklung des Bahnverkehrs** auf in den letzten Jahren gebauten Strecken wurden **nachweislich verfehlt.** Seitens der Bahn behauptete **Verlagerungen von Verkehr vom Flugzeug auf die Schiene** können auf der Basis konkreter durch das Statistische Bundesamt veröffentlichter Passagierzahlen im Flugverkehr **nicht bestätigt** werden.
- Vor dem Hintergrund, dass Energie auch in Zukunft eine knappe und teure Ressource sein wird, ist es unabdingbar, **Mobilitätsleistungen so energieeffizient wie möglich durchzuführen.** Der von der Deutschen Bahn für die Zukunft geplante **Hochgeschwindigkeitsverkehr im Deutschlandtakt ist keineswegs energieeffizient.**

Im Zusammenhang mit den Diskussionen zur CO₂-Reduzierung im Mobilitätssektor muss aus naturwissenschaftlicher Sicht immer wieder betont werden, dass es **für das Klima vollkommen irrelevant ist, wo auf der Welt CO₂ entsteht und emittiert wird.**

Zudem müssen alle **Verkehrssysteme ganzheitlich** betrachtet werden, was die Einbeziehung nicht nur der Antriebsenergie, sondern auch Bau und Wartung der Verkehrsmittel und vor allem Bau und Wartung sämtlicher systemspezifischer Infrastruktur zwingend macht. Nur mit **dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise lassen sich sowohl der CO₂-Fußabdruck einer Transportleistung als auch die ökonomischen Kosten korrekt ermitteln und zuordnen.**

Der **Schlüssel und der bei weitem größte Hebel zur Verringerung von CO₂** im Zusammenhang mit Mobilität liegt in der **effizienteren Nutzung der existierenden Systeme auf der Basis heute bereits vorhandener Infrastruktur.**

9 Anhang

EÜ: Eisenbahnüberführung; KrBw: Kreuzungsbauwerk; SÜ: Straßenüberführung.

Für weitere Abkürzungen siehe „Verzeichnis der Abkürzungen im Eisenbahnwesen“ (87).

9.1 Auflistung der untersuchten Bauwerke nach Schüßler-Plan Nr. 5 (Hannover - Bielefeld)

9.1.1 Brücken und Überführungsbauwerke

Bauwerk	Bezeichnung	Überführung über	# Brücken	# Gleise	Länge (m)
KrBw	VzG 1700 + 1750/1751	Straße	1	2	590,00
EÜ	B441 Landschaftsstraße	Straße/Gewässer	1	2	300,00
EÜ	Altes Dorf	Straße	1	2	30,00
EÜ	von-Holthusen-Straße	Straße	1	2	30,00
EÜ	Talbrücke BAB2 + VW-Logistik	Straße, Gewerbe, Gewässer	1	2	2.000,00
EÜ	Waltringhäuser Weg	Straße	1	2	30,00
EÜ	Ackerweg	Weg	1	2	30,00
KrBw	KrBw Strecke VzG1761 ü 1700n	Eisenbahn	1	2	30,00
SÜ	SÜ: Breitenhast (Feldweg)	Eisenbahn	1	2	30,00
EÜ	Dammstraße	Straße	1	2	30,00
EÜ	Flütstraße	Straße	1	2	30,00
EÜ	Wehrweg	Weg	1	2	30,00
KrBw	KrBw Strecke VzG1700	Eisenbahn	1	2	380,00
EÜ	Flutbach	Gewässer	1	2	4,00
EÜ	Bahnhofs-/Industriestraße	Straße	1	2	14,00
EÜ	Fussgänger	Weg	1	2	5,00
EÜ	Hessbach (Bach)	Gewässer	1	2	7,00
SÜ	Vornhagen	Eisenbahn	1	2	79,00
EÜ	Vornhäger Bach (Bach)	Gewässer	1	2	8,00
EÜ	Bornau	Gewässer	1	2	14,00
EÜ	Lüdersfelder Straße	Straße	1	2	20,00
SÜ	SÜ Lüdersfelder Straße / L 445	Eisenbahn	1	2	114,00
SÜ	SÜ Dülwaldstraße	Eisenbahn	1	2	50,81
EÜ	Lauenhäger Straße	Straße	1	3	8,00
EÜ	Hülse (Bach)	Gewässer	1	4	5,00
EÜ	Herminenstraße	Straße	1	5	6,00
EÜ	Fussgängertunnel Bf. Stadthagen	Weg	1	7	3,35
EÜ	Bahnhofsstraße	Straße	1	7	25,00
EÜ	Krummer Bach	Gewässer	1	2	10,00
EÜ	NBS: Acker-/Wanderweg	Weg	1	2	6,00
KrBw	VzG 1700 über VzG1700n (NBS)	Eisenbahn	1	2	5,00

EÜ	EÜ über BAB2	Straße	1	2	220,00	
EÜ	Talbrücke	Straßen, Felder	1	2	1.120,00	
EÜ	Talbrücke	Straßen, Felder	1	2	400,00	
EÜ	Talbrücke Weser	Gewässer, Straße, Häuser	2	2	1.490,00	
EÜ	Talbrücke	Talquerung	2	2	100,00	
EÜ	Talbrücke	Talquerung	2	2	1.030,00	
EÜ	Talbrücke	Talquerung	1	2	1.700,00	
EÜ	Talbrücke	Talquerung	2	2	140,00	
EÜ	Talbrücke	Talquerung, Straße, Felder	1	2	1.830,00	
EÜ	EÜ über BAB2	Straße, Gewerbe	1	2	1.050,00	
EÜ	Talbrücke	Straße, Gewerbe	1	2	230,00	
EÜ	Talbrücke	Straße, Gewerbe, Eisenbahn	1	1	750,00	Daten- quelle:

Dr. Jan Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15)

9.1.2 Tunnel

Bauwerk	Bezeichnung	Tunnelart	# Tunnel	# Gleise	Länge (m)
Tunnel	Tunnel Helsinghausen	Dorfuntertunnelung	1	2	180,00
Tunnel	Enzen	Dorfuntertunnelung	1	2	450,00
Tunnel	Hobbensen	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00
Tunnel	Kirchhorsten 1	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00
Tunnel	Kirchhorsten 2	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00
Tunnel	Südhorsten	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00
Tunnel	Tallensen	Dorfuntertunnelung	1	2	400,00
Tunnel	Flugplatz	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00
Tunnel	Wesergebirgstunnel	Gebirgsquerung	2	2	6.890,00
Tunnel	Löwenbergtunnel	Gebirgsquerung	2	2	1.620,00
Tunnel	Tunnel Uffeln	Gebirgsquerung	2	2	1.230,00
Tunnel	Tunnel Sperlsiek	Gebirgsquerung	2	2	150,00
Tunnel	Tunnel Ebenöde	Gebirgsquerung	2	2	1.600,00
Tunnel	Tunnel Bonneberg 1	Gebirgsquerung	1	2	430,00
Tunnel	Tunnel Bonneberg 2	Gebirgsquerung	1	2	210,00
Tunnel	Tunnel Exter	Gebirgsquerung	2	2	1.240,00
Tunnel	Tunnel Salzuflen	Gebirgsquerung	2	2	2.750,00
Tunnel	Tunnel Heidenloh	Hausquerung	1	2	120,00

Datenquelle: Dr. Jan Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15).

9.2 Auflistung der untersuchten Bauwerke auf der Strecke Hamm – Bielefeld

9.2.1 Brücken und Überführungsbauwerke

Art	Bezeichnung	Art	# Brücken	# Gleise	Länge (m)
EÜ	Münsterstraße (Ost)		1	1	17,4
KrBw	KrBw Überführung VzG 2960 n. Paderborn ü. VzG 1700	Eisenbahn	1	2	6,7
KrBw	Kreuzung VzG1700 VzG2990		1	2	11,6
EÜ	Münsterstraße (West)		1	3	34,4
EÜ	Südring (4spurig)	Straße	1	4	3,4
EÜ	Fussgängertunnel Sunderweg -> Park (Bockschatzteich)	Weg	1	4	45,8
EÜ	Winterstraße / A33	Straße	1	4	6,0
EÜ	Winterstraße	Straße	1	4	8,0
EÜ	Asholts Hof	Straße	1	4	6,6
EÜ	Warendorfer Strasse	Straße	1	4	22,2
EÜ	Bokelstraße	Straße	1	4	8,3
EÜ	Am Reiherbach	Straße	1	4	8,2
EÜ	Reiherbach	Gewässer	1	4	10,7
EÜ	Am Röhrbach	Straße	1	4	7,8
EÜ	Röhrheide	Straße	1	4	8,1
EÜ	Osnabrücker Landstraße VzG1700	Straße	1	4	10,8
EÜ	Osnabrücker Landstraße VzG2990	Straße	1	4	18,8
EÜ	Schlangenbach (Bach, Flutgraben)	Gewässer	1	4	34,9
EÜ	Ernst-Abbe-Straße	Straße	1	4	4,9
EÜ	Schlangenbach	Gewässer	1	4	10,2
EÜ	Stadtring Nordhorn	Straße	1	4	9,1
EÜ	Hülsbrockstraße	Straße	1	4	34,4
EÜ	Feuerbornstraße	Straße	1	4	14,2
EÜ	Wiedenbrücker Straße	Straße	1	4	18,9
EÜ	Alter Westring	Straße	1	4	26,9
EÜ	B61 Westring	Straße	1	4	18,6
EÜ	Mecklenburger Weg	Straße	1	4	9,1
EÜ	Im Heidkamp	Straße	1	4	14,9
EÜ	Kiebitzstraße	Straße	1	4	19,9

EÜ	Knisterbachweg	Straße	1	4	15,5
EÜ	Knisterbach (Bach)	Gewässer	1	4	31,7
EÜ	Knisterbachweg (Zufahrt Acker)	Weg	1	4	11,1
EÜ	Wapel	Gewässer	1	4	34,9
EÜ	Hilgenbusch	Straße	1	4	7,3
EÜ	Sudheide	Straße	1	4	8,8
EÜ	Lintelner Flutgraben	Gewässer	1	4	9,5
EÜ	Lintelner Flutgraben (Emser Landstraße)	Straße	1	4	8,6
EÜ	Emser Landstraße	Straße	1	4	6,0
EÜ	Bundesstraße B64	Straße	1	4	2,5
EÜ	Moorweg	Straße	1	4	15,4
EÜ	Emsbrücke	Gewässer	1	4	7,8
EÜ	Nonenstraße		1	4	8,8
EÜ	Georg-Nolte-Weg		1	4	5,3
EÜ	An der Radheide		1	4	5,0
EÜ	Brocken Straße (2)		1	4	9,3
EÜ	Rhedaer Straße 66		1	4	15,9
EÜ	Bergeler Bach (2)		1	4	9,2
EÜ	Rhedaer Straße (Kläranlage Oelde)		1	4	41,2
EÜ	Axtbach		1	4	18,1
EÜ	Verbindung Rhedaer Str. zu Wiedenbrücker Str.		1	4	13,5
EÜ	Lindenstraße		1	4	19,7
EÜ	Schwarzer Weg		1	4	7,3
EÜ	Ennigerloher Straße		1	4	8,6
EÜ	Durchlass ohne Namen		1	4	7,7
EÜ	Vellerner Straße (1), Wirtschaftsweg		1	4	6,8
EÜ	Vellerner Straße (2), Wirtschaftsweg		1	4	9,1
EÜ	Holtkamp/Angelbach		1	4	7,1
EÜ	Ostenfelder Straße		1	4	14,0
EÜ	Harbergstraße		1	4	7,0
EÜ	L586 Rolandstraße		1	4	18,4
EÜ	Frotz-Reuter-Straße		1	4	7,1
KrBw	KrBw Röhrheide	Eisenbahn	1	4	17,7
KrBw	KrBw Strecke TWE Gütersloh-Verl	Eisenbahn	1	4	30,8
KrBw	EÜ VzG 1700+2990 über VzG 2013		1	4	12,6

SÜ	Rhedaer Straße		1	4	12,4
SÜ	Haus-Geist-Weg		1	4	7,6
SÜ	SÜ Zum Hohen Hagen		1	4	11,8
SÜ	SÜ L811 Hammer Straße		1	4	5,4
SÜ	Am Morgenbruch		1	4	8,0
SÜ	SÜ Im Oestricher Holt		1	4	7,6
EÜ	Gütersloher Str	Straße	1	5	4,7
EÜ	Fussgängertunnel Graphiastr<->Cheruskerstr	Weg	1	5	9,5
EÜ	Am Bachschemm	Weg	1	5	11,8
EÜ	Dalke	Gewässer	1	5	15,7
EÜ	Dalkestraße	Straße	1	5	5,5
EÜ	Konrad-Adenauer-Ring		1	5	2,8
EÜ	Lütkeweg		1	5	19,7
EÜ	Gebrüder-Kerkmann-Platz		1	5	16,3
EÜ	Dolberger Str. / Südstraße		1	5	11,1
EÜ	Werse		1	5	16,6
EÜ	Hans-Sachs-Straße / Oelmühlenkamp		1	5	13,4
EÜ	Leerfeldweg		1	5	14,3
EÜ	Frielicker Weg		1	5	21,8
SÜ	SÜ Dasbecker Weg		1	5	35,4
EÜ	Grüner Weg / Zum Geisterholz		1	6	5,9
EÜ	Afyonring		1	6	13,1
EÜ	Ennigerloher Straße		1	7	10,2
SÜ	B474 Dyckerhoffstraße		1	7	28,1
EÜ	Kaiserstraße	Straße	1	9	17,6
EÜ	Carl-Miele-Straße	Straße	1	14	5,1
EÜ	Friedrich-Ebert-Straße	Straße	1	16	17,9
EÜ	Ummelner Straße	Straße	2	4	24,0
EÜ	Isselhorster Straße	Straße	2	4	87,6
EÜ	Brocken Straße (1)		2	4	8,1
EÜ	Warendorfer Strasse		2	6	9,9
EÜ	Hellbach		2	7	71,7
EÜ	Werner-Habig-Straße		2	8	14,3
EÜ	Im Werl		2	8	9,8
EÜ	Daimlerstraße		2	8	20,4

EÜ	Pixeler Straße	Straße	2	12	20,4
EÜ	Cheruskerstraße	Straße	3	5	16,6
EÜ	Wilhelmstraße		3	9	8,9
EÜ	Am Bosenberg		4	4	12,2
EÜ	Brocker Straße (3), Wirtschaftsweg		1	4	9,9
SÜ	SÜ Hoher Hagen		1	4	16,4

Datenquelle: Dr. Jan Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15)

9.2.2 Tunnel

Da es sich auf dieser Strecke bezogen auf die Länge des jeweiligen Bauwerkes nicht um „echte Tunnelbauwerke“ handelt, sind alle nachfolgend aufgeführte Bauwerke bzgl. der CO₂-Emissionen wie Überführungsbauwerke betrachtet worden.

Art	Bezeichnung	Art	# Brücken	# Gleise	Länge (m)
Tunnel	Grippenbach (eingetunnelt)	Gewässer	1	4	11,9
Tunnel	Tüggenbach (eingetunnelt)	Gewässer	1	4	3,3
Tunnel	Im Sielen (Brücke, Tunnel?)	Weg	1	4	4,2
Tunnel	Klaverbach im Tunnel unter Bahnstrecke		1	4	4,3
Tunnel	Bergeler Bach (1)		1	4	5,0
Tunnel	Bleichgraben		1	4	6,9
Tunnel	Haarbach		1	4	2,2
Tunnel	Richterbach		1	4	2,3
Tunnel	Entwässerungsgraben zum Ennigerbach		1	4	6,4
Tunnel	Durchlass Hellbach (2)		1	6	1,3

Datenquelle: Dr. Jan Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15)

9.3 Auflistung der untersuchten Bauwerke gemäß Vorschlag Widu-Land e.V.

9.3.1 Brücken und Überführungsbauwerke

Bauwerk	Bezeichnung	Überführung über	# Brücken	# Gleise	Länge (m)
EÜ	Flutbach	Gewässer	1	2	4,00
EÜ	Bahnhofs-/Industriestraße	Straße	1	2	14,00
EÜ	Fussgänger	Weg	1	2	5,00
EÜ	Hessbach (Bach)	Gewässer	1	2	7,00
SÜ	Vornhagen	Eisenbahn	1	2	79,00
EÜ	Vornhäger Bach (Bach)	Gewässer	1	2	8,00
EÜ	Bornau	Gewässer	1	2	14,00
EÜ	Lüdersfelder Straße	Straße	1	2	20,00
SÜ	SÜ Lüdersfelder Straße / L445	Eisenbahn	1	2	114,00
SÜ	SÜ Dülwaldstraße	Eisenbahn	1	2	50,81
EÜ	Lauenhäger Straße	Straße	1	3	8,00
EÜ	Hülse (Bach)	Gewässer	1	4	5,00
EÜ	Herminenstraße	Straße	1	5	6,00
EÜ	Fussgängertunnel Bf. Stadthagen	Weg	1	7	3,35
EÜ	Bahnhofsstraße	Straße	1	7	25,00
EÜ	Krummer Bach	Gewässer	1	2	10,00
EÜ	Acker-/Wanderweg	Weg	1	2	6,00
EÜ	Kalter Bach	Gewässer	1	2	5,00
SÜ	Im Bruch	Eisenbahn	1	2	25,00
SÜ	Stemmer Straße	Eisenbahn	1	2	39,00
EÜ	Gehle (Bach)	Gewässer	1	2	4,00
EÜ	Riepackstraße	Straße	1	4	11,00
EÜ	Fußgängertunnel Hp Kirchhorsten	Weg	1	2	6,00
SÜ	Bahnhofsstraße	Eisenbahn	1	2	68,00
EÜ	Gehle (Bach, 2)	Gewässer	1	2	6,00
SÜ	SÜ Zur Brücke	Straße	1	2	50,00
SÜ	SÜ Tallenser Straße	Straße	1	2	23,00
EÜ	Bückeburger Aue	Gewässer	1	2	17,00
EÜ	Unterm Bogen	Straße	1	2	8,00
SÜ	SÜ Lehnstraße	Eisenbahn	1	2	13,46
Düker	Schlossbach	Gewässer	2	2	10,00
EÜ	Heidornweg	Weg	1	2	8,33
EÜ	Bückeburger Aue (Bach)	Gewässer	1	2	16,27
EÜ	Kleine Aue (Bach)	Gewässer	1	2	14,52
SÜ	SÜ Hoher Weg	Eisenbahn	1	4	45,00

Bü	Eveser Straße	Straße	1	4	15,87	
SÜ	SÜ Hoher Weg	Eisenbahn	1	4	45,00	
EÜ	Aue (Bach, für Widulandstrecke 2990)	Gewässer	1	2	24,76	
EÜ	Aue (Bach)	Gewässer	1	2	24,76	
SÜ	Schaumburger Weg	eisenbahn	1	2	35,00	
SÜ	SÜ B482	Eisenbahn	1	2	10,09	
SÜ	SÜ B482 (Widulandstrecke 2990)	Eisenbahn	1	2	10,09	
SÜ	SÜ B482 (Widulandstrecke 1700)	Eisenbahn	1	2	10,09	
KrBw	KrBw VzG 1700 ü VzG 2990	Eisenbahn	1	2	380,00	
KrBw	VzG 1700 + 1750/1751	Straße	1	2	590,00	
EÜ	B441 Landschaftsstraße	Straße/Gewässer	1	2	300,00	
EÜ	Altes Dorf	Straße	1	2	30,00	
EÜ	von-Holthusen-Straße	Straße	1	2	30,00	
EÜ	Talbrücke BAB2 + VW Logistik	Straße, Gewerbe, Gewässer	1	2	2.000,00	
EÜ	Waltringhäuser Weg	Straße	1	2	30,00	
EÜ	Ackerweg	Weg	1	2	30,00	
KrBw	KrBw Strecke VzG1761 ü 1700n	Eisenbahn	1	2	30,00	
SÜ	SÜ: Breitenhast (Feldweg)	Eisenbahn	1	2	30,00	
EÜ	Dammstraße	Straße	1	2	30,00	
EÜ	Flütstraße	Straße	1	2	30,00	
EÜ	Wehrweg	Weg	1	2	30,00	
KrBw	KrBw Strecke VzG1700	Eisenbahn	1	2	380,00	Daten- quelle: Dr. Jan

Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15).

9.3.2 Tunnel

Bauwerk	Bezeichnung	Tunnelart	# Tunnel	# Gleise	Länge (m)
Tunnel	Tunnel Bückeburg Scheie	Hausunterquerung	1	2	450,00
Tunnel	Tunnel Bückeburg Kornmarsch	Hausunterquerung	1	2	450,00
Tunnel	Tunnel Helsinghausen	Dorfuntertunnelung	1	2	180,00
Tunnel	Enzen	Dorfuntertunnelung	1	2	450,00
Tunnel	Hobbensen	Dorfuntertunnelung	1	2	500,00

Datenquelle: Dr. Jan Hinrich Thies, zur Verfügung gestellte Listen und (15).

9.4 Physikalische Beispielrechnungen

9.4.1 Beschleunigungsenergie je Passagier

Energie für Beschleunigung pro Passagier						
$0,5 * m * v^2$						
	Masse (kg)	v_A (km/h)	v_E (km/h)	v_A (m/s)	v_E (m/s)	kJ
ICE 3	1.800	0	60	0	16,67	250
		60	120	16,67	33,33	750
		120	180	33,33	50,00	1.250
		180	220	50,00	61,11	1.111
		220	270	61,11	75,00	1.701
		270	290	75	80,56	778
		0	120	0	33,33	1.000
		0	270	0	75,00	5.063
		0	300	0	83,33	6.250

PKW	1.117	0	130	0	36,11	728
		80	100	22,22	27,78	155
		80	130	22,22	36,11	452
		100	130	27,78	36,11	297
		0	150	0	41,67	970

A 321	447	0	0,8 Mach	0	243,00	13.197
--------------	-----	---	----------	---	--------	---------------

v_A : Anfangsgeschwindigkeit

v_E : Endgeschwindigkeit

9.4.2 Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro PKM

Energie zur Überwindung des Luftwiderstands pro km							#	
$0,5 * \rho * c_w * A * v^2$							Passa- gieri	kJ pro PKM
Rho (kg/m ³)	c _w	A (m ²)	v (km/h)	v (m/s)	kJ			
ICE 3	1,225	1,1	11	80	22,22	3.660	231	16
				100	27,78	5.719		25
				150	41,67	12.867		56
				180	50,00	18.528		80
				200	55,56	22.874		99
				230	63,89	30.251		131
				250	69,44	35.741		155
				270	75,00	41.688		180
			300	83,33	51.467		223	

PKW	1,225	0,3	3	50	13,89	106	1,5	71
				80	22,22	272		181
				130	36,11	719		479
				150	41,67	957		638
				180	50,00	1.378		919

A 321	0,466	0,08	122	0,8 Mach	243,00	134.282	164	819
--------------	-------	------	-----	----------	--------	----------------	-----	-----

0,8 Mach: 80% der Schallgeschwindigkeit (relativ zur Umgebungsluft; effiziente Reisegeschwindigkeit für Verkehrsflugzeuge; Geschwindigkeit über Grund i.d.R. abweichend und maßgeblich von Geschwindigkeit der sich bewegenden Umgebungsluft abhängig).

9.4.3 Energie zur für 100 m Hubarbeit je Passagier

Energie für 100 m Hubarbeit pro Passagier
 $F_G * h = m * 9,81 * h$

	Masse (kg)	Höhe (m)	kJ
ICE 3	1.800	100	1.766

PKW	1.117	100	1.096
------------	-------	-----	--------------

A 321	447	100	439
--------------	-----	-----	------------

9.5 Energetische Berechnungen und CO₂-Ausstoß für Bahnfahrten

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen Deutsche Bahn 2017:

Traktionsenergie						
		kWh	CO ₂ in kg			
Traktionsstrom Bahn 2017	100,00%	10.190.000.000	5.441.460.000			
Fernverkehr	32,80%	3.342.320.000	1.784.798.880			
Regio-/Nahverkehr	43,20%	4.402.080.000	2.350.710.720			
Güterverkehr	24,00%	2.445.600.000	1.305.950.400			
		Liter	CO ₂ in kg	CO ₂ in kg aus Strom + Diesel	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂
Dieserverbrauch Bahn 2017	100,00%	436.000.000	1.139.922.000	6.581.382.000		
Fernverkehr	2,50%	10.900.000	28.498.050	1.813.296.930	40.548.000.000	44,72 g/PKM
Regio-/Nahverkehr	76,10%	331.796.000	867.480.642	3.218.191.362	41.876.000.000	76,85 g/PKM
Güterverkehr	21,50%	93.740.000	245.083.230	1.551.033.630	92.651.000.000	16,74 g/TKM

Annahmen: Alle kWh-Angaben als Nettostrommengen; Leitungs- und Umwandlungsverluste sind zusätzlich zu berücksichtigen. Stromverbräuche sonstiger Schienenverkehre sowie von Baustellenverkehren sind nicht berücksichtigt.
CO₂-Menge in kg / kWh: 0,534 Quelle: UBA

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen Deutsche Bahn 2019:

Traktionsenergie						
		kWh	CO ₂ in kg			
Traktionsstrom Bahn 2019	100,00%	9.552.000.000	4.947.936.000			
Fernverkehr	32,80%	3.133.056.000	1.622.923.008			
Regio-/Nahverkehr	43,20%	4.126.464.000	2.137.508.352			
Güterverkehr	24,00%	2.292.480.000	1.187.504.640			
		Liter	CO ₂ in kg	CO ₂ in kg aus Strom + Diesel	Transportleistung (PKM/TKM)	CO ₂
Dieserverbrauch Bahn 2019	100,00%	410.600.000	1.073.513.700	6.021.449.700		
Fernverkehr	2,50%	10.265.000	26.837.843	1.649.760.851	44.151.000.000	37,37 g/PKM
Regio-/Nahverkehr	76,10%	312.466.600	816.943.926	2.954.452.278	41.634.000.000	70,96 g/PKM
Güterverkehr	21,50%	88.279.000	230.805.446	1.418.310.086	88.237.000.000	16,07 g/TKM

Steuerungsinfrastruktur						
		kWh	CO ₂ in kg			
Strom Steuerungsinfrastruktur 2019						
Weichensteuerung / Signale		196.000.000	101.528.000			
Weichenheizung		131.500.000	68.117.000			
				CO ₂ insges. Steuerungsinfr.		
				169.645.000		
Fernverkehr			27,40%	46.479.452	44.151.000.000	1,05 g/PKM
Regio-/Nahverkehr			49,07%	83.237.108	41.634.000.000	2,00 g/PKM
Güterverkehr			23,55%	39.958.685	88.237.000.000	0,45 g/TKM

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

Annahmen: Alle kWh-Angaben als Nettostrommengen; Leitungs- und Umwandlungsverluste sind zusätzlich zu berücksichtigen. Stromverbräuche sonstiger Schienenverkehre sowie von Baustellenverkehren sind nicht berücksichtigt.
CO₂-Menge in kg / kWh: 0,518 Quelle: UBA

10 Literaturverzeichnis

1. Radermacher, K. und Herrmann, A. *Ganzheitliche ökologische Bilanzierung von Verkehrssystemen*. [Hrsg.] Friedrich Naumann Stiftung für die Freiheit e.V. 2021. ISBN 978-3-948950-14-9.
2. Radermacher, K. Ökologische Betrachtung von Verkehrssystemen - Ein ganzheitlicher Systemvergleich. [Hrsg.] H. Proff. *Transforming Mobility - What Next?2022*. s.l. : Springer Gabler, 2022, S. 763 - 780.
3. Brandenburg, Landesamt für Umwelt. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 19.] <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de>.
4. FIZ, Karlsruhe. EnEff:Industrie,. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://eneff-industrie.info/quickinfos/energieintensive-branchen/daten-zu-besonders-energiehungrigen-produktionsbereichen/>.
5. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Informationsblatt für CO2-Faktoren. 15. 11 2021.
6. UBA. Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung. [Online] 2010. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4362.html>.
7. Energiewirtschaft, Forschungsgesellschaft für. CO2 Verminderung in der Metallerzeugung, S.4. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.]
8. Umweltagentur, NÖ Energie- und Aluminium. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.wir-leben-nachhaltig.at/aktuell/detailansicht/aluminium/>.
9. Wikipedia. Zement, Umweltschutzaspekte. [Online] [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Zement#Umweltschutzaspekte>.
10. Klimabilanz Zementindustrie. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.chemietechnik.de/klimabilanz-der-zementindustrie/>.
11. Welt. Klimakiller Beton. [Online] 2011. [Zitat vom: 15. 12 2019.] https://www.welt.de/print/die_welt/debatte/article13499011/Klimakiller-Beton.html.
12. ZDF. Zement - Der heimliche Klimakiller. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-zement---der-heimliche-klimakiller-100.html>.
13. Deutschlandfunk. Klimasünder Beton - Ein Baustoff sucht seinen Nachfolger. [Online] 20. 12 2020. [Zitat vom: 24. 12 20.] https://www.deutschlandfunk.de/klimasuender-beton-ein-baustoff-sucht-nachfolger.740.de.html?dram:article_id=488355.
14. Ricke., K. L. und Caldeira, K. Maximum warming occurs about one decade after a corbondioxide emission. [Online] 2014. [Zitat vom: 06. 01 21.] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/12/124002/pdf>.
15. Schröder, S. und Thies, J.H. *Effizienter Bahnausbau im Korridor Hamm -- Hannover*. Bahnzentrum Ingenierbüro, Bielefeld. 2022.

16. Deutsche Bahn. Brückenkarte der DB. [Online] [Zitat vom: 15. 11 2022.] <https://bruecken.deutschebahn.com/br%C3%BCckenkarte>.
17. —. Datensatz Geo-Brücke (Stand 01/2019). [Online] [Zitat vom: 15. 11 2022.] https://download-data.deutschebahn.com/static/datasets/geo-bruecke/geo-bruecke_2019.zip.
18. Motschall, M. und Bergmann, T. *Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland*. Öko-Institut e.V. im Auftrag des BM Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2015.
19. Deutsche Bahn. Deutschlands Eisenbahnbrücken. [Online] [Zitat vom: 17. 04 2023.] <https://bruecken.deutschebahn.com/>.
20. Statista. Anzahl der Tunnel im Besitz der Deutsche Bahn AG in den Jahren 2012 bis 2022. [Online] [Zitat vom: 15. 07 2013.] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13361/umfrage/anzahl-der-tunnel-im-besitz-der-db-ag/>.
21. BMDV. Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten. [Online] [Zitat vom: 21. 08 2023.] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/tunnel-zahlen-daten-fakten.html>.
22. Wikipedia. Oberleitung. [Online] [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Oberleitung>.
23. Giegrich, Liebich, Fehrenbach. UBA, Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle. [Online] 2007. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ableitung-von-kriterien-zur-beurteilung-einer>.
24. Bahn. Erster Oberleitungsmast gestellt. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/no_cache/projekt/aktuell/archiv-suche/news-archiv-detail/news/1432-erster-oberleitungsmast-gestellt/newsParameter/detail/News/.
25. Wikipedia. Schnellfahrstrecke Köln-Rhein_Main. [Online] [Zitat vom: 12. 04 2023.] https://de.wikipedia.org/wiki/Schnellfahrstrecke_K%C3%B6ln%E2%80%93Rhein/Main.
26. DB_Energie. Über uns. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/db-energie-unternehmen/unternehmen-1345392>.
27. NBS, ARGE. Web Archive: ARGE NBS Los A. [Online] 2019. <https://web.archive.org/web/20060208054606/http://www.arge-nbs.de/deutsch/strassenbau/index.php>.
28. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. *Lärmschutz im Schienenverkehr*. 2022.
29. Umweltbundesamt. *Lärmbonus bei der Bahn? Ist die Besserstellung der Bahn im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern noch gerechtfertigt?* 2010.
30. Luik, A. *Schaden in der Oberleitung: Das geplante Desaster der Deutschen Bahn*. 3. Edition. s.l. : Westend, 2019. ISBN: 978-3864892677.

31. Centre for Industrialised Architecture (CINARK) at the Royal Danish Acadademy. The Construction Material Pyramid. [Online] [Zitat vom: 21. 11 2022.] <https://www.materialpyramiden.dk>.
32. Centre for Industrialised Architecture at the Royal Danish Academy. [Online] [Zitat vom: 21. 11 2022.] <https://royaldanishacademy.com/cinark/about-cinark>.
33. Kloeckner Metals Germany. Gewichtsrechner IPE-/HEA-/HEB-/HEM-Träger. [Online] [Zitat vom: 13. 02 2023.] <https://facts.kloeckner.de/tools/stahltraeger-gewicht-berechnen/>.
34. Wikipedia. Preisklasse (Bahnhofskategorie) von DB Station&Service. [Online] [Zitat vom: 28. 03 2023.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Preisklasse>.
35. DB Station & Service AG. Stationspreisliste.
36. Bundestag, Deutscher. *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der FDP Fraktion betreffend "Energieverbrauch der Deutschen Bahn AG"*. 2020.
37. Tagesschau. Tagesschau. *Bahn sperrt Hauptstrecken monatelang*. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutschebahn-sanierung-101.html>.
38. Spiegel_Online. Bahnpassagiere müssen längere Fahrzeit einplanen. [Online] 2019. [Zitat vom: 05. 10 20.] <https://www.spiegel.de/reise/aktuell/ice-strecke-hannover-goettingen-30-minuten-laengere-fahrzeit-ab-11-juni-a-1268770.html>.
39. DB Projektbau GmbH. *Ein Konzept von heute für den Verkehr von morgen*. 2020.
40. Deutsche Bahn - Regionalbüro Düsseldorf. Riesenerfolg: Schnellfahrstrecke Köln - Rhein/Main mit 220 Millionen fahrgästen in 15 Jahren. 1. August 2017.
41. Süddeutsche Zeitung. Kein einziger Güterzug auf der Vorzeigestrecke. [Online] 14. 02 2019. [Zitat vom: 26. 04 23.] <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/deutsche-bahn-schnelltrasse-berlin-muenchen-gueterverkehr-1.4328369>.
42. SYSTEM BAHN. Ein Jahr Schnellfahrstrecke Berlin - München: Reisende wechseln vom Flieger zur Bahn. 19. 01 2019.
43. Statistisches Bundesamt. DeStatis-Datenbank. [Online] [Zitat vom: 14. 11 2022.] https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html.
44. Der Spiegel. Mehdorns Geständnis: Lange Bahnfahrten sind eine Tortur. [Online] 2002. [Zitat vom: 29. 03 2023.] <https://www.spiegel.de/reise/aktuell/mehdorns-gestaendnis-lange-bahnfahrten-sind-eine-tortur-a-219160.html>.
45. BMDV. Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. [Online] [Zitat vom: 11. 04 2023.] <https://www.bvwp-projekte.de/schiene/2-016-V01/2-016-V01.html>.
46. sma+, intraplan, VIACon. *Abschlussbericht zum Zielfahrplan Deutschlandtakt - Grundlagen, Konzeptionierung und wirtschaftliche Bewertung*. 2021.

47. Schäffler, F. Kosten für Aus- bzw. Neubau der ICE-Strecke Bielefeld – Hannover explodieren – Steigerung um fast 70% erwartet. [Online] [Zitat vom: 12. 04 23.] <https://frank-schaeffler.de/kosten-fuer-aus-bzw-neubau-der-ice-strecke-bielefeld-hannover-explodieren-steigerung-um-fast-70-erwartet/>.
48. Inflationsraten in Deutschland. [Online] [Zitat vom: 12. 04 23.] <https://www.finanztools.de/inflation/inflationsraten-deutschland>.
49. Mindener Tageblatt. ICE-Strecke zwischen Bielefeld und Hannover wird wohl teurer. [Online] 06. 09 2022. [Zitat vom: 12. 04 23.] <https://www.mt.de/regionales/ICE-Strecke-zwischen-Bielefeld-und-Hannover-wird-wohl-teurer-23350973.html>.
50. Wikipedia. Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2023.] https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsprojekt_Deutsche_Einheit_Nr._8.
51. Der Spiegel. Was für eine Fehlplanung. [Online] [Zitat vom: 12. 04 2023.] <https://www.spiegel.de/spiegel/ice-strecke-berlin-muenchen-die-geschichte-einer-fehlplanung-a-1182450.html>.
52. Merkur. Bahn-Fiasko auf der Milliarden-Schnellstrecke Berlin-München. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2023.] <https://www.merkur.de/wirtschaft/berlin-muenchen-peinliches-bahn-fiasko-auf-schnellstrecke-zr-11764751.html>.
53. Süddeutsche Zeitung. Die "teuerste U-Bahn Deutschlands" und ihre 22 Tunnel. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2023.] <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/schnelltrasse-berlin-muenchen-die-teuerste-u-bahn-deutschlands-und-ihre-22-tunnel-1.3547565>.
54. Allgemeine, Augsburg. Kostenexplosion bei ICE-Trasse Ulm-Stuttgart. [Online] [Zitat vom: 15. 03 2023.] <https://www.augsburger-allgemeine.de/bayern/Bahn-Kostenexplosion-bei-ICE-Trasse-Ulm-Stuttgart-id8223231.html>.
55. Tagesschau. Vier Milliarden für 15 Minuten. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2023.] <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/deutsche-bahn-neubaustrecke-stuttgart21-101.html>.
56. SWR. Stuttgart 21: Chronologie der Kostenexplosion. [Online] 23. 01 2023. [Zitat vom: 15. 04 23.] <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart-21-kosten-chronologie-100.html>.
57. Wikipedia. Stuttgart 21. [Online] [Zitat vom: 14. 04 23.] https://de.wikipedia.org/wiki/Stuttgart_21.
58. General-Anzeiger Bonn. Kosten bei Ausbau der S13 explodieren. [Online] 08. 06 2022. [Zitat vom: 10. 02 23.] https://ga.de/bonn/stadt-bonn/bonn-beuel-s13-ausbau-wird-teurer-und-dauert-laenger_aid-70954369.
59. —. Planungsmängel machen Ausbau der S13 erstmal zunichte. [Online] 22. 11 2022. [Zitat vom: 10. 02 23.] https://ga.de/region/sieg-und-rhein/troisdorf/s13-fahrt-erstmal-nur-bis-troisdorf-bruecke-fehlt_aid-80517381.

60. —. S13-Projektgruppe sieht sich für Schienenstrecke ab Troisdorf nicht zuständig. [Online] 29. 11 2022. [Zitat vom: 10. 02 23.] https://ga.de/region/sieg-und-rhein/troisdorf/bonn-rhein-sieg-brueckenverbindung-zu-troisdorf-fehlt_aid-80659701.
61. —. Planungsmängel beim S13-Ausbau waren bekannt - Bahn beginnt erst jetzt mit Planung der „vergessenen Brücke“. [Online] 02. 12 2022. [Zitat vom: 10. 02 23.] https://ga.de/region/sieg-und-rhein/troisdorf/s13-fehlende-bruecke-ist-deutscher-bahn-seit-jahren-bekannt_aid-80831893.
62. —. Gutachter sah die Notwendigkeit der „vergessenen Brücke“ bei Troisdorf. [Online] 29. 12 2022. [Zitat vom: 10. 02 23.] https://ga.de/region/sieg-und-rhein/troisdorf/weitere-probleme-fuer-die-s13-vergessenen-bruecke-bei-troisdorf_aid-81731951.
63. Rößler, K. Quantifizierung der THG-Emissionen des Projekts Stuttgart 21. [Online] 2017. [Zitat vom: 15. 12 2019.] https://www.umstieg-21.de/assets/files/thg-endbericht_s21_251017.pdf.
64. Radermacher, K. Mobilitätswende: Die Macht der Physik. [Online] The Pioneer, 26. 01 2023. [Zitat vom: 20. 04 23.] <https://www.thepioneer.de/originals/thepioneer-expert/articles/mobilitaetswende-die-macht-der-physik>.
65. Deutsche Bahn. *Daten & Fakten 2017*. 2018.
66. —. *Daten & Fakten 2019*. 2020.
67. Alstom. Alstom Corodia Continental. [Online] [Zitat vom: 17. 12 20.] https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom_Corodia_Continental.
68. RE 8 - Rhein-Erft-Express und RB 27 - Rhein-Erft-Bahn. [Online] 2020. [Zitat vom: 17. 12 20.] <https://www.nvr.de/streckennetz-und-angebot/linienuebersicht/re-8-rhein-erft-express-und-rb-27-rhein-erft-bahn>.
69. Lufthansa. LH-Group Auslastung 2018. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://newsroom.lufthansagroup.com/german/newsroom/mit-142-millionen-passagieren-im-jahr-2018-ist-die-lufthansa-group-die-nummer-eins-in-europa/s/41337be6-ca07-4298-bf9b-cee7e91c69e3>.
70. Deutsche Bahn. *Deutsche Bahn Integrierter Bericht 2018*.
71. Klimaschutz-Portal. Klimawirkung Luftverkehr. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.klimaschutz-portal.aero/klimakiller-nr-1/klimawirkung-des-luftverkehrs/>.
72. BUND. CO2-Emissionen des Verkehrs. [Online] 2019. <https://www.bund.net/themen/mobilitaet/autos/co2-emissionen/?wc=24308>.
73. Klimaschutz-Portal. Verbrauch senken. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.klimaschutz-portal.aero/verbrauch-senken/>.
74. UBA. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018*. 2019.

75. Eisenkopf, A. Böse Studie: Elektroautos lassen nur woanders verbrennen. [Online] 2019. [Zitat vom: 09. 12 20.] https://www.achgut.com/artikel/boese_studie_elektroautos_lassen_nur_woanders_verbrennen/P15#comment_entries.
76. Deutsche Welle. Wie grün ist die Deutsche Bahn wirklich? [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.dw.com/de/wie-gr%C3%BCn-ist-die-deutsche-bahn-wirklich/a-41894678>.
77. Frankfurter_Rundschau. Die grüne Mär der Bahn. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.fr.de/wirtschaft/gruene-bahn-10991713.html>.
78. Tech-for-Future. CO2 pro kWh: Welche ist die klimafreundlichste Energiequelle? [Online] [Zitat vom: 20. 04 23.] <https://www.tech-for-future.de/co2-kwh-strom/>.
79. Electricity Maps. A real time and historical visualization of the greenhouse gas intensity of electricity production and consumption around the world. [Online] [Zitat vom: 24. 01 23.] <https://www.electricitymaps.com>.
80. Windpark Geisberg - Technik. [Online] [Zitat vom: 09. 12 20.] <https://www.windpark-geisberg.de>.
81. Kuhne, M. Energieverbrauch von Bahn und Flugzeug. [Online] 2015. [Zitat vom: 15. 12 2019.] <https://www.airliners.de/energieverbrauch-bahn-flugzeug-apropos/36592>.
82. Buchal, C., Karl, H.D., Sinn, H.-W. Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz? *ifo Schnelldienst*. 08 2019.
83. Stockburger, C. Spiegel Mobilität: Die Mär vom Mehr. [Online] 2013. [Zitat vom: 11. 12 20.] <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/durchschnittliche-ps-zahl-der-neuwagen-in-deutschland-gesunken-a-931262.html>.
84. Spiegel Mobilität: Deutsche Autofahrer stellen PS-Rekord bei Neuzulassungen auf. [Online] 2020. [Zitat vom: 10. 12 20.] <https://www.spiegel.de/auto/deutsche-autofahrer-stellen-ps-rekord-bei-neuzulassungen-auf-a-742a5bf1-30c5-4eca-8a96-9918b23ccf57>.
85. Statista: urchschnittliche Motorleistung von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2018. [Online] [Zitat vom: 10. 12 20.] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12937/umfrage/entwicklung-der-motorleistung-von-neuwagen/>.
86. VIEREGG - RÖSSLER. *Analyse des Bundesverkehrswegeplans und der 181 Zusatzprojekte für den Deutschland-Takt 3. Entwurf mit Fokus auf Bayern nach den Kriterien Plausibilität, Zielerreichung, Effizienz und Umweltauswirkungen mit dem Zweck einer Priorisierung*. 2023.
87. Wikipedia. Liste von Abkürzungen im Eisenbahnwesen. [Online] [Zitat vom: 29. 03 2023.] https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Abk%C3%BCrzungen_im_Eisenbahnwesen.
88. Lee, D.S. et.al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*. 2021, Bd. 244.

89. Wirtschaftswoche. Tempolimit am Himmel. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. 12 2019.]
<https://www.wiwo.de/politik/deutschland/inlandsfluege-ein-tempolimit-am-himmel-koennte-dem-klima-helfen/25308762.html>.