
Auswirkung einer generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen auf die CO₂-Emissionen

Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Auswirkung einer generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen auf die CO₂-Emissionen

Eine Studie auf Basis des statistischen
Dauerzählstellennetzes auf Bundesautobahnen

Projektleitung

Dr. Lutz Pinkofsky und Dr. Bernhard Kollmus

Verkehrsstatistik und Verkehrsablauf

Dirk Heuzeroth, Anke Fitschen, Arnd Fitschen, Alexander Bloch, Andreas Coumanns,
Matthäus Zelazny

CO₂-Berechnung

Uwe Ellmers, Dr. Ferdinand Farwick zum Hagen, Dr. Jost Gail

Datenmanagement

Dr. Adrian Fazekas und Dr. Ralf Schulze

Impressum

Abteilung:
Straßenverkehrstechnik

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-v6>

Bergisch Gladbach, März 2025

Inhalt

Abkürzungen	7
Abbildungen	8
Tabellen	9
1 Aufgabe	10
1.1 Ziel	10
1.2 Vorgehen	10
2 Bisherige Untersuchungen	11
2.1 CO ₂ -Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland (2010)	11
2.2 Klimaschutz durch Tempolimit (2020)	11
2.3 Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung (2023)	12
2.4 Modellierung der Umweltwirkung von Tempolimit-Maßnahmen auf Autobahnen und außerorts (2024)	15
3 Datengrundlagen	17
3.1 Netzparameter	17
3.2 Dauerzählstellen	18
3.3 Arbeitsstellen	22
3.3.1 Arbeitsstellenlängen im BAB-Netz	23
3.3.2 Geschwindigkeiten in Arbeitsstellen	24
3.4 Floating Car Data (FCD)	29
3.5 Geschwindigkeitsverteilung für die heute unlimitierten Bereiche bei einem generellen Tempolimit 130 km/h	29
3.6 Mittlere Geschwindigkeiten	34
3.7 Vergleich 2014/2024	35
3.8 Fahrleistungsanteile	36
3.9 CO ₂ -Emissionsfaktoren aus dem HBEFA	37
3.10 Fahrzyklen	39

3.11	Simulation der CO ₂ -Emissionsfaktoren mit PHEM	43
3.11.1	Vergleich der Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.2 mit Neuberechnung unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrleistungs- und Flottenzusammensetzung aus TREMOD 6.61	44
3.11.2	Emissionsfaktoren auf Basis der Zyklen aus der WLTP-Datenbank	44
3.11.3	Emissionsfaktoren auf Basis eigener Fahrzyklen und Messdaten	45
4	Berechnung von CO₂-Emissionen	47
4.1	Grundlegende Berechnung	47
4.1.1	Geschwindigkeitsabhängigkeit der CO ₂ -Emissionsfaktoren	47
4.1.2	Dynamischer Fall: Stärkere Berücksichtigung extrem dynamischer Fahrweisen – „Fit dynamisch“	48
4.2	Grundlegende Berechnungsmethode für die CO ₂ -Ersparnis durch ein generelles Tempolimit	49
4.2.1	Erstellung der Ausgangssituation / Ist-Zustand	49
4.2.2	Umlagerung der Fahrleistung unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilungen	50
5	Ergebnisse, Sensitivitäten	52
5.1	Ergebnisse	52
5.2	Sensitivitäten	53
5.2.1	Berechnungsmethode	54
5.2.2	Geschwindigkeiten und Fahrleistung	54
5.2.3	Fahrzyklen und Emissionsfaktoren	54
5.2.4	Fahrleistung in Arbeitsstellen	55
5.2.5	Gesamtemissionen/Eckwert	55
6	Zusammenfassung und Ausblick	56
7	Literatur	59
	Anhang	62

Abkürzungen

ASB	Anweisung StraßeninformationsBank
BAB	Bundesautobahn
BISStra	Bundesinformationssystem Straße
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BPA	Busse und Pkw mit Anhänger
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DZ	Dauerzählstelle
DZV	Dauerzählstellen-Verzeichnis
EF	Emissionsfaktor
FCD	Floating Car Data
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
LCL	Location Code List
LNfz	leichte Nutzfahrzeuge
LVo	Leichtverkehr ohne Anhänger
MIA	Management- und Informationssystem für Arbeitsstellen
PKW	Personenkraftwagen
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
RPA	relative positive Beschleunigung
SGV	schwerer Güterverkehr
SNfz	schwere Nutzfahrzeuge
TREMODO	Transport Emission Model
VAS	Verkehrsanalyzesystem
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
WLTC	Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung

Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht der Fahrzeugklassen und –gruppen.....	19
Abbildung 2: Lage der eingeflossenen Geschwindigkeits-DZ und aller DZ.....	21
Abbildung 3: q-v-Kurven für die Szenarien ohne Arbeitsstelle bei v=80km/h	26
Abbildung 4: q-v-Kurven für die Szenarien mit Arbeitsstelle bei v=80km/h	28
Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung freie Strecke (ohne Tempolimit) 2024	30
Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Niedrigere Befolgung“	31
Abbildung 7: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Höhere Befolgung“	33
Abbildung 8: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Begrenzer“	34
Abbildung 9: Grafische Gegenüberstellung der Mengenverteilung über die Geschwindigkeitsklassen bei Tempolimit 100, 120 und ohne Tempolimit 2014/2024.....	36
Abbildung 10: CO ₂ -Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.2 für PKW	39
Abbildung 11: Zyklus im hohen Geschwindigkeitsbereich aus WLTP-Datenbank aufgeteilt in zwölf Teilzyklen mit Einstufen nach dynamischen (rot) und weniger dynamischem Fahrverhalten (blau) nach [STEVEN 2024].	41
Abbildung 12: Beispiel einer Messfahrt auf der Strecke BAB 7 zwischen hier Quickborn und Flensburg.	42
Abbildung 13: CO ₂ -Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.2 mit neu berechneten Emissionsfaktoren für einige HEBFA-Fahrzyklen mit v _m > 90 km/h	44
Abbildung 14: CO ₂ -Emissionsfaktoren (PKW) aus der Literatur und auf Basis der WLTP- Fahrzyklen bei hohen Geschwindigkeiten.....	45
Abbildung 15: CO ₂ -Emissionsfaktoren (PKW) aus der Literatur und auf Basis eigener Fahrzyklen bei hohen Geschwindigkeiten.....	45
Abbildung 16: CO ₂ -Emissionsfaktoren aus verschiedenen Simulationen mit PHEM und der Modellierung mit einem Polynom zweiten Grades.....	48
Abbildung 17: CO ₂ -Emissionsfaktoren aus verschiedenen Simulationen mit PHEM und der Modellierung mit einem Polynom zweiten Grades unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren für dynamische Fahrweisen („Fit dynamisch“)	49

Tabellen

Tabelle 1: Arbeitsstellenanteile am Gesamtnetz	23
Tabelle 2: Arbeitsstellenanteile nach angeordneter Geschwindigkeit*	24
Tabelle 3: Netzanteile nach Tempolimits	24
Tabelle 4: Streckenanteile am BAB-Netz, differenziert nach Fahrstreifenanzahl und Ballungsraumklasse	27
Tabelle 5: Streckenanteile nach Längsneigungsklassen im BAB-Netz [BASt 2024b].	27
Tabelle 6: Streckenanteile der Arbeitsstellen, differenziert nach Fahrstreifenanzahl in der Arbeitsstelle und Ballungsraumklasse.....	28
Tabelle 7: Mittlere Geschwindigkeiten des Leichtverkehrs ohne Anhänger je Tempolimit 2024 und Anzahl der eingeflossenen richtungsbezogenen DZ	35
Tabelle 8: Mittlere Geschwindigkeiten für LVo und deren Fahrleistungsanteile je Tempolimit 2024	37
Tabelle 9: Zyklus im hohen Geschwindigkeitsbereich aus WLTP-Datenbank aufgeteilt in zwölf Teilzyklen.	40
Tabelle 10: Verteilung der absoluten CO ₂ -Emissionen für PKW und LNFz auf BAB auf die vorhandenen Tempolimits nach Gewichtung von Fahrleistungsanteilen und Emissionsfaktoren.	50

1 Aufgabe

1.1 Ziel

Im September 2024 wurde die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) beauftragt, eine Studie zu den Auswirkungen einer generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen auf die CO₂-Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs durchzuführen.

1.2 Vorgehen

Zunächst wurden die wesentlichen, bestehenden Untersuchungen im Zusammenhang mit CO₂-Emissionen und generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ausgewertet. Auf dieser Basis wurde festgelegt, die vorliegende Studie am methodischen Vorgehen in [LANGE et al 2020] zu orientieren.

Im Zentrum der Berechnung stehen die Emissionsfaktoren (EF) für CO₂ für verschiedene mittlere Fahrgeschwindigkeiten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) sowie der Eckwert für die CO₂-Emissionen auf Autobahnen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (LNFz) aus dem etablierten Emissionsberechnungsmodell „Transport Emission Model“ (TREMOM). Das Berechnungsverfahren wurde – unterstützt vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und kurzfristig extern Beauftragten – um Fahrzyklen und Emissionsfaktoren im hohen Geschwindigkeitsbereich erweitert. Die CO₂-Einsparung ergibt sich durch eine Umlagerung der Fahrleistungsanteile der heute unlimitierten Abschnitte für die relevanten Fahrzeugarten in andere Geschwindigkeitsbereiche, für die entsprechend geringere CO₂-Emissionsfaktoren zum Tragen kommen.

Hierzu waren aus dem bestehenden Dauerzählstellennetz und anderen Informationsquellen wie dem Verkehrsanalyzesystem (VAS – [BASt 2024a]) und dem Management- und Informationssystem für Arbeitsstellen der Autobahn GmbH (MIA – [Autobahn GmbH des Bundes 2024]) die entsprechenden Fahrleistungsanteile zu ermitteln. Die Dauerzählstellen (DZ) sind sensortechnisch in der Lage detailliert Geschwindigkeiten zu erfassen. Im Projektverlauf wurde in enger Zusammenarbeit mit der Autobahn GmbH eine für die Fragestellung repräsentative Auswahl an DZ identifiziert, welche softwaretechnisch im benötigten Detaillierungsgrad und qualitätsgesichert Geschwindigkeitsdaten für das Bezugsjahr 2024 lieferten. Hiermit konnten zum einen die benötigten Geschwindigkeitsverteilungen für heute unlimitierte Abschnitte und zum anderen Szenarien zu den Befolgungsraten für ein künftiges generelles Tempolimit auf diesen heute unlimitierten Abschnitten abgeleitet werden. Darüber hinaus konnten die Fahrleistungsanteile des Leichtverkehrs je Geschwindigkeitsbereich am gesamten richtungsbezogenen Bundesautobahn-Netz (BAB-Netz) bestimmt werden.

2 Bisherige Untersuchungen

2.1 CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland (2010)

Im Sachstandsbericht „CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland“ des Umwelt-Bundesamtes aus dem Jahr 2010 [RODT et al. 2010] wird ein Maßnahmenbündel zur Senkung der CO₂-Emissionen des Verkehrs vorgeschlagen. Die enthaltenen Maßnahmen ergänzen bzw. überlagern sich dabei teilweise. Das zugrunde liegende Trendszenario zur Ableitung von Minderungspotenzialen der einzelnen Maßnahmen wurde mit dem Modell „TREMOD“ berechnet, hierbei wurden 2010 bereits beschlossene Maßnahmen einbezogen. Einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf Autobahnen wurde nach den Modellierungen ein jährliches Reduzierungspotential an CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2020 von 3,2 Mio. t, bis zum Jahr 2030 von 2,9 Mio. t zugeordnet, was mit einer Reduzierung der Pkw-bedingten CO₂-Emissionen auf Bundesautobahnen um 9 % gleichgesetzt wurde. Da ein Gesamt-Reduzierungspotential über alle bewerteten Maßnahmen nicht angegeben wurde, kann aufgrund der erwähnten Überlagerungswirkungen der Einzelmaßnahmen ein prozentualer Anteil der Wirkung des Tempolimits an der Wirkung aller Maßnahmen nur grob qualitativ geschätzt werden. Dieser ist jedoch im unteren einstelligen Bereich anzusiedeln.

2.2 Klimaschutz durch Tempolimit (2020)

In der Studie „Klimaschutz durch Tempolimit“ des Umwelt-Bundesamtes aus dem Jahr 2020 [LANGE et al 2020] wurde das CO₂-Einsparpotential bei Anordnung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf Autobahnen abgeschätzt. Eine wesentliche Datengrundlage der zugehörigen Berechnungen bildete die Auswertung „Geschwindigkeiten auf Bundesautobahnen in den Jahren 2010 bis 2014“ [LÖHE 2016] der BAST. Hieraus wurden die mit Breiten von 10 km/h klassierten Mittelwerte der an DZ im Autobahnnetz ermittelten Geschwindigkeiten (Geschwindigkeits-Histogramm) genutzt, wobei nach DZ an Abschnitten mit einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 120 km/h (Histogramm 120) und an Abschnitten ohne eine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Histogramm frei) unterschieden wurde. Für die Berechnungen der Effekte des Tempolimits wurde eine Verteilung der Geschwindigkeiten auf den unlimitierten Abschnitten gemäß Histogramm 120 unterstellt. Ferner wurde angenommen, dass für das Prognosejahr 2018 die unveränderten Histogramme (120 und frei) der Analysejahre 2010 bis 2014 verwendet werden können. Die Wirkung eines Tempolimits von 120 km/h auf Abschnitten mit einem bestehenden Tempolimit von 130 km/h wurde ebenfalls berücksichtigt. Da jedoch in [LÖHE 2016] keine Histogramme für Abschnitte mit einem Tempolimit von 130 km/h enthalten sind, konnte dies ausschließlich auf Basis der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten auf diesen Abschnitten erfolgen.

Zusätzlich wurden aus [LÖHE 2016] die Anteile der Fahrleistungen auf den Teilen des Autobahnnetzes ohne und mit Geschwindigkeitsbeschränkung herangezogen.

Als wesentliche Eingangsgrößen arbeitet Lange mit den Geschwindigkeitsverteilungen, die aus der BAST-Veröffentlichung [LÖHE 2016] stammen. Ebenso werden daraus die Fahrleistungsanteile der einzelnen Geschwindigkeitsintervalle entnommen. Für die Berechnung der CO₂-Emissionen arbeitet [LANGE et al. 2020] sowohl mit den EF, die im HBEFA 4.1 enthalten sind, als auch vereinzelt mit eigens für den hohen Geschwindigkeitsbereich ermittelten EF. Mittels einer Regressionskurve für die CO₂-Emissionswerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit werden für die mittleren Geschwindigkeiten der Intervalle der BAST-Veröffentlichung die CO₂-Emissionen pro Fahrzeugkilometer bestimmt. Als Eckwert werden dafür die CO₂-Emissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen auf Autobahnen aus TREMOD 6.02 genutzt. Die CO₂-Ersparnis errechnet sich durch Umschichtung der Fahrleistungsanteile gemäß den Geschwindigkeitsverteilungen ohne und mit Tempolimit. Die Methodik in [LANGE et al 2020] ist transparent und verwendet auf nachvollziehbare Art Eingangsdaten, die zusammen mit den Daten aus HBEFA und dem Emissionsvorhersagemodell TREMOD für die Berechnung benötigt werden. Dazu werden Fahrzyklen des HBEFA 4.1, ergänzt durch unveröffentlichte Autobahnzyklen, verwendet.

Insgesamt lässt sich der Berechnungsweg nachvollziehen und liefert ein belastbares Ergebnis. Allerdings konzentriert sich [LANGE et al. 2020] auf ein Tempolimit von 120 km/h und schätzt den erwarteten Wert für ein Limit von 130 km/h lediglich ab.

Ein Vergleich der Berechnung des Einsparpotentials unter Heranziehung der Histogramme 120 vs. Heranziehung der mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten auf Abschnitten mit einem Tempolimit von 120 km/h zeigte, dass letztere Methodik das Einsparpotential tendenziell unterschätzt.

Im Ergebnis wurden eine Reduzierung der CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs auf Autobahnen um 2,9 Mio. t (Tempolimit 120 km/h) bzw. 2,2 Mio. t (Tempolimit 130 km/h) prognostiziert, was einer Reduzierung der CO₂-Emissionen (Pkw und LNFz) auf dem Autobahnnetz von 6,5 bzw. 5,7 % entspricht. In [RODT et al. 2010] wurde die Reduktion mit 9 % der CO₂-Emissionen auf dem Autobahnnetz quantifiziert. Die Differenz zwischen [RODT et al. 2010] und [LANGE et al. 2020] wurde durch den Rückgang der auf Autobahnen gefahrenen Geschwindigkeiten begründet.

2.3 Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung (2023)

In [SCHMAUS et al. 2023] wurden die Auswirkungen von Tempolimits nicht nur für den Kraftfahrzeugverkehr auf Autobahnen, sondern auch für Außerortsstraßen des Basisnetzes untersucht, mit dem Ziel, die potenzielle Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Status quo abzuschätzen. Als wesentliche Datengrundlagen, insbesondere für den Bereich der Autobahnen, dienten hierbei:

- Straßennetzdaten und Floating-Car-Data für Pkw (FCD) der Firma TomTom: Die Netzdaten wurden zur Informationsgewinnung bzgl. Längen und angeordneter zulässiger Höchstgeschwindigkeiten verwendet, die FCD dienten der Ableitung der gefahrenen Pkw-Geschwindigkeiten im Netz. Die Studie erwähnt, dass Auswertungen der FCD Unschärfen erkennen ließen, welche „nahelegten, dass in den Pkw-Fahrgeschwindigkeitsdaten ein nicht unerheblicher Anteil von Lkw-Geschwindigkeitsdaten enthalten war“ [SCHMAUS et al. 2023], wobei „die bereits aggregierte Form der Rohdaten

sowie die fehlende Dokumentation bezüglich der Unterscheidung zwischen Pkw und Lkw durch den Datenanbieter keine Bereinigung zuließen“. Die Histogramme, welche den Geschwindigkeitsklassen mit einer jeweiligen Breite von 10 km/h die zugehörigen Fahrleistungsanteile zuordneten, zeigten daher einen „überproportional hohen Fahrleistungsanteil in der Geschwindigkeitsklasse 80-90 km/h. Die aggregierten Daten ließen keine eindeutige Aussage über die Gründe dafür zu, legten jedoch zwei Punkte nahe. Erstens ist vermutlich ein gewisser Anteil durch Baustellenbereiche mit reduzierter zulässiger Höchstgeschwindigkeit bedingt. Zweitens [...war] nicht auszuschließen, dass darin ein gewisser Anteil Lkw enthalten ist“ [SCHMAUS et al. 2023].

Die Straßennetzdaten wurden ferner mit OpenStreetMap-Daten verglichen.

- Modell „Validate“ der Firma PTV: Dieses deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell mit über 20.000 Verkehrszellen wurde – zusammen mit ausgewählten regionalen Verkehrsnachfragemodellen – für die Ermittlung der relevanten Fahrleistungsanteile sowie – „primär“ [SCHMAUS et al. 2023] – für die Quantifizierung szenarienbasierter Maßnahmenwirkungen herangezogen.
- DZ: Es wurden Daten von 125 DZ an Autobahnen und Bundesstraßen in Nordrhein-Westfalen sowie die Daten der DZ der BASt (Autobahnen und Bundesstraßen) genutzt.
- EF: Für die Berechnung der CO₂-Emissionen werden Emissionsfaktoren aus dem HBEFA, Version 4.1, genutzt, wobei auf die Kategorisierung nach Verkehrssituationen abgehoben wird. Verkehrssituationen unterscheiden sich insbesondere durch den Straßentyp, die zulässige Geschwindigkeit und den Verkehrszustand. Für die Verkehrssituationen sind charakteristische Fahrzyklen hinterlegt, mit deren Hilfe die Emissionsfaktoren bestimmt wurden. Die Fahrzyklen sind so gewählt, dass sie das Fahrverhalten für eine Verkehrssituation bestmöglich repräsentieren. Dadurch sind auch Geschwindigkeitsüberschreitungen in den Fahrzyklen und damit Emissionsfaktoren abgebildet.

Zur Bestimmung der CO₂-Ersparnis durch ein Tempolimit werden Fahrleistungsanteile, die bestimmten HBEFA-Verkehrssituationen zugewiesen sind, umgeschichtet und zwar von Verkehrssituationen, die für den Fall ohne Tempolimit maßgebend sind, in Verkehrssituationen für die Fälle, in denen Geschwindigkeitsbeschränkungen vorhanden sind. Die jeweiligen CO₂-Emissionen mit und ohne Tempolimit ergeben sich durch Multiplikation der Fahrleistungen in den zu Grunde gelegten Verkehrssituationen mit den zugehörigen Emissionsfaktoren.

Die erforderliche Bestimmung der umzulegenden Fahrleistungsanteile wurde mit Validate vorgenommen, außerdem wurde im Projekt zur Abbildung der Verkehrsmittelwahl zusätzlich ein entsprechendes Modell erstellt. Hierbei diente die vorliegende Pkw-Nachfragematrix des Status quo (ohne Tempolimit) als Ausgangsbasis, Zählwerte dienten der Validierung. Die Wirkung eines allgemeinen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen wurde in mehreren Stufen quantifiziert:

- Im Netzmodell wurden unter Ceteris-Paribus-Bedingungen auf den unlimitierten Abschnitten die HBEFA-Fahrzyklen im Hinblick auf das Zielszenario dieses ersten Schritts (Allgemeines Tempolimit von 120 km/h auf Autobahnen) angewandt. Der daraus resultierende Emissionsrückgang wurde mit dem oben beschriebenen Verfahren quantifiziert. Zur Abbildung des prognostizierten Fahrverhaltens bei einem allgemeinen Tempolimit von 120 km/h wurden für die im Status quo nicht mit einem Tempolimit versehenen Strecken die HBEFA-Fahrzyklen für ein Tempolimit von 120 km/h herangezogen.
- Es wurden in einem zweiten Schritt zusätzlich Routenwahleffekte berücksichtigt, welche sich aufgrund durch das Tempolimit veränderter (i. e. in erster Linie verlängerter) Reisezeiten auf BAB ergeben. Grundsätzlich wäre bei der Einführung eines allgemeinen Tempolimits in dieser Hinsicht jedoch zu bedenken, dass sich derartige Routenwahleffekte auch in erheblichem Maße in Bereichen mit sensiblem Umfeld (Ortsdurchfahrten, Stadtstraßen, Räume mit Erholungsfunktion u. ä.) einstellen würden. Daher ist tendenziell damit zu rechnen, dass dies wiederum entsprechende Maßnahmen zu Beschränkungen oder Verboten des Verkehrs nach sich ziehen könnte, um die unerwünschten Auswirkungen auf die betroffenen Bereiche bzw. Schutzgüter zu reduzieren bzw. zu unterbinden. Vergleichbar war dies - insbesondere nach Schaffung der entsprechenden straßenverkehrsrechtlichen Rechtsgrundlage – nach Einführung der allgemeinen Lkw-Maut auf Autobahnen zu beobachten. In einem weiteren – für die vorliegende Aufgabenstellung nur bedingt relevanten – Modellierungsschritt wurde auf dem Basisnetz im Außerortsbereich eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h implementiert, welche die beschriebenen Routenwahleffekte wiederum auf eine „*sehr geringe*“ [SCHMAUS et al. 2023] Ausprägung reduzierte.
- Es wurden in einem dritten Schritt außerdem noch Nachfrageeffekte (Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl), welche sich aufgrund des Tempolimits ergeben, berücksichtigt und in der Bilanzierung abgebildet. Die Abbildung dieser Effekte erfolgte mit einem sog. Elastizitätenansatz auf empirischer Basis, welcher insgesamt auch die Qualitäten des ÖPNV-Angebots berücksichtigt. Es kann jedoch nicht beurteilt werden, inwiefern dabei auch die – insbesondere nach dem Erhebungszeitraum der dargestellten Studie zu beobachtende – unzureichende Bedienungs- bzw. Betriebsqualität insbesondere im Bereich des schienengebundenen ÖPNV abgebildet wird.

Für die Bilanzierungen wurde jeweils der gesamte Straßenverkehr im gesamten Straßennetz auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland modelliert.

Die schrittweise Bilanzierung ergab die nachfolgend dargestellte Maßnahmenwirkung jeweils für die einzelnen Stufen. Die Werte „beziehen sich auf den gesamten Straßenverkehr in Deutschland. Die Bezugsmenge (= 100%) enthält also neben dem Pkw-Verkehr auch den Lkw-Verkehr sowie die weiteren, jedoch weniger relevanten Fahrzeugkategorien (z. B. Motorräder) des motorisierten Straßenverkehrs im gesamten Straßennetz“ [SCHMAUS et al. 2023]. Die wiedergegebenen

Änderungsraten zeigen die jeweilige Veränderung der Emissionen „im gesamten deutschen Straßennetz“ [SCHMAUS et al. 2023]:

- Effekt durch die Modellierung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf Autobahnen: Abnahme der CO₂-Emissionen um 2,9 % (4,5 Mio. t CO₂ -Äq)
- Effekt einer zusätzlichen Berücksichtigung der Routenwahleffekte im oben beschriebenen Sinne: Abnahme der CO₂ -Emissionen um 3,6 % (5,8 Mio. t CO₂ -Äq)
- Effekt einer zusätzlichen Berücksichtigung der Nachfrageeffekte im oben beschriebenen Sinne: Abnahme der CO₂ -Emissionen um 4,2 % (6,7 Mio. t CO₂ -Äq)

Dabei gilt jeweils: „Die Werte basieren auf dem Bezugswert von 157,7 Mio. t CO₂ -Äq. Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2018 und sind mit nicht gerundeten Änderungsraten berechnet.“ [SCHMAUS et al. 2023]

2.4 Modellierung der Umweltwirkung von Tempolimit-Maßnahmen auf Autobahnen und außerorts (2024)

In diesem Forschungsprojekt wurden – in Anlehnung an Methodik und Datengrundlage gemäß [SCHMAUS et al. 2023] – die Auswirkungen unterschiedlicher Tempolimits auf Autobahnen und sonstigen Außerortsstraßen in Deutschland auf die erbrachte Fahrleistung und die resultierenden Emissionen ermittelt. Anders als in [SCHMAUS et al. 2023] wurden in diesem Projekt auch die Auswirkungen einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen untersucht. Die in [SCHMAUS et al. 2023] mit Zustand des Jahres 2018 ermittelte Verteilung der Fahrleistung auf die Verkehrssituationen wurde dabei zur Abbildung des Status quo übernommen. Dieses Vorgehen wurde damit begründet, dass *„zum Zeitpunkt der Bearbeitung der vorliegenden Studie keine Daten vorlagen, bei denen sichergestellt werden konnte, dass sie keine bedeutenden Verzerrungen durch die Covid-Pandemie enthalten. Zudem wäre eine Neuberechnung der Grundlagen aus der Studie Flüssiger Verkehr mit einem hohen Aufwand und hohen Kosten verbunden gewesen“*. Dementsprechend erfolgt der Hinweis, dass *„Verhaltensänderungen, die seit dem Jahr 2018 im motorisierten Individualverkehr eingetreten sind, bei Verwendung aktueller Zahlen zu einem veränderten Ergebnis führen können“*.

Methodisch wurden zur Abbildung der Zielszenarien analog zum Vorgehen in [SCHMAUS et al. 2023] die HBEFA-Fahrzyklen entsprechend modifiziert, ferner wurden zunächst die Auswirkungen eines allgemeinen Tempolimits von

- 130 km/h auf Autobahnen und 100 km/h auf autobahnähnlichen Straßen,
- 120 km/h auf Autobahnen und 100 km/h auf autobahnähnlichen Straßen,
- 130 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf autobahnähnlichen Straßen,
- 120 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf autobahnähnlichen Straßen sowie
- 100 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf autobahnähnlichen Straßen

ermittelt.

Diese Szenarien wurden jeweils stufenweise um Modellierungen der Routenwahl- und Nachfrageeffekte (Verkehrsmittelwahl) der Tempolimits ergänzt (siehe Abschnitt 2.3 – die Nachfrageeffekte wurden in [FRIEDRICH et al. 2024] jedoch mittels

Integration des öffentlichen Verkehrs als Verkehrsmittelalternative in das Gesamtmodell abgebildet). Bei diesen beiden Stufen wurde jeweils ein StVO-konformes Verhalten *„ohne systematische Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“* [FRIEDRICH et al. 2024] unterstellt, dies galt jedoch nicht für die auf den Emissionsfaktoren nach HBEFA beruhenden Geschwindigkeitseffekten der ersten Stufe.

Für das Szenario von 130 km/h auf Autobahnen und 100 km/h auf autobahnähnlichen Straßen wurden folgende Wirkungen ermittelt:

- Effekt durch die Modellierung der generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten: Abnahme der CO₂-Emissionen um 1,6 % (2,5 Mio. t CO₂ -Äq)
- Effekt einer zusätzlichen Berücksichtigung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte im oben beschriebenen Sinne: Abnahme der CO₂ -Emissionen um 2,2 % (3,5 Mio. t CO₂ -Äq)

„Nachfragerückgänge aufgrund unterlassener Reisen (z. B. Videokonferenzen) wurden für diese Betrachtung nicht einbezogen.“ [FRIEDRICH et al. 2024] Ferner wurde *„vereinfachend davon ausgegangen, dass der gesamte Rückgang der Fahrleistung im Pkw-Verkehr [...] auf die Schiene verlagert wird“* [FRIEDRICH et al. 2024] – die resultierte je nach Szenario in einem abgebildeten Nachfragezuwachs zwischen 2 und 18 %. Diese Auswirkungen auf den Schienenverkehr wurden in [FRIEDRICH et al. 2024] wie folgt bewertet: *„Für einen Zuwachs in dieser Größenordnung werden die vorhandenen Kapazitäten im Schienenverkehr auf den meisten Relationen ausreichen, auf einzelnen Relationen können zusätzliche Kapazitäten erforderlich sein. Ein Tempolimit auf Autobahnen von 100 km/h ändert das Reisezeitverhältnis Schiene / Pkw deutlich, so dass der öffentliche Verkehr für eine größere Anzahl von Reisenden eine Alternative darstellt. Die resultierenden Zuwächse [...] können auf einzelnen Linien zusätzliche Kapazitäten sowohl im Schienenfernverkehr als auch im Schienen-nahverkehr erfordern.“* Inwiefern diese Einschätzung im Lichte der aktuellen Einschränkungen der Betriebsqualität insbesondere des Schienenfernverkehrs (siehe z. B. [Handelsblatt 2025]) auch nur annähernd zutrifft, kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht abschließend beurteilt werden.

3 Datengrundlagen

3.1 Netzparameter

Zur Ermittlung der Fahrleistungsanteile für die CO₂-Berechnung im BAB-Gesamtnetz und insbesondere zur Aktualisierung relevanter Parameter des Dauerzählstellenverzeichnis (DZV) wurden verschiedene Datenquellen (s. u.) abgefragt und die Daten möglichst automatisiert aufgearbeitet und qualitätsgesichert. Wo eine komplette Automatisierung nicht mit vertretbarem Aufwand umzusetzen war, wurden manuelle Ergänzungen vorgenommen. Zu aktualisieren waren u. a. für jede Richtung einer DZ

- die Anzahl der Fahrstreifen,
- das Vorhandensein von Seitenstreifen,
- angeordnete zulässige Höchstgeschwindigkeiten (statisch, eingeschränkt bzgl. Uhrzeit, Fahrzeugart(en), Situation, VBA),
- Überholverbote für Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t,
- die Lage innerhalb eines Ballungsraums,
- die Kurvigkeit und
- die Längsneigung.

Grundlage für die Zuordnung war die geographische Lage der DZ im Autobahnnetz (Geokoordinaten).

Eine zentrale Datenquelle ist das „Bundesinformationssystem Straße“ (BISStra) [BASt 2024b]. BISStra enthält alle Geometrien sowie weitreichende Datensätze zu bundesdeutschen Fernstraßen und wird einmal pro Quartal aktualisiert. Da BISStra-Daten nach der „Anweisung Straßeninformationsbank“ (ASB) [BASt 2024c] referenziert sind, mussten zuerst die ASB-Referenzierungen (Abschnitt und Station) des DZV aktualisiert werden. Hierzu wurde zur geografischen Lage einer DZ der nächstgelegene Abschnitt aus BISStra zugeordnet. Nicht eindeutige und zweifelhafte Zuordnungen wurden manuell durch Abgleich der DZ-Lage mit der BISStra-Straßengeometrie und Karten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) [BKG 2024a] vorgenommen.

Mit den aktualisierten ASB-Referenzen konnten Fahrstreifeninformationen aus BISStra direkt ausgelesen werden. Das Vorhandensein eines Seitenstreifens wurde aus in BISStra enthaltenen Querschnittsdaten ermittelt. Die Gültigkeit dieser Daten für die ursprünglich gewählten 294 DZ (siehe Abschnitt 3.2) wurden manuell durch Betrachtung von Orthofotos [BKG 2024b] geprüft.

Informationen zu Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverboten wurden von der Autobahn GmbH bereitgestellt (Stand 10/2024). Die Datensätze wurden bereits von der Autobahn GmbH ASB-referenziert, jedoch ist die korrekte, stimmige und lückenlose Zuordnung von Anfang und Ende einzelner Beschränkungen auf eine

Folge von ASB-Abschnitten ein aufwändiger Arbeitsschritt. In diesem Zusammenhang entstandene Unstimmigkeiten machten die Zuordnung zu einzelnen DZ teilweise sehr aufwändig. Abschließend fehlten für ca. 8% des Autobahnnetzes Informationen zu bestehenden Geschwindigkeitsbeschränkungen und für 86% Informationen zu bestehenden Überholverböten (näheres hierzu siehe Abschnitt 3.8).

Insbesondere die Daten zu Geschwindigkeitsbeschränkungen ließen sich durch Abgleich der Geschwindigkeitsprofile an DZ plausibilisieren (näheres hierzu siehe Abschnitt 3.2). Bei Zweifeln an der Information zur Geschwindigkeitsbegrenzung wurde auf Befahrungsbilder der letzten „Zustandserfassung und -bewertung (ZEB)“ [BASt 2024d] zurückgegriffen und manuell die Anordnung von Verkehrszeichen am relevanten Abschnitt geprüft.

ASB-referenzierte Ballungsrauminformationen wurden dem Verkehrsanalysesystem [BASt 2024a] entnommen. Dieses System nutzt wiederum Daten aus dem Datensatz „Nemo Großstadtregionen“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [BBSR 2024].

Das Vorhandensein von Kurven vor und hinter DZ-Positionen, wurde durch Analyse der in BISStra gespeicherten Sektorgeometrien bestimmt. Hierzu wurden in 100 m-Abständen jeweils 3 Punkte auf der Geometrie (im Sinne der Strecke) genommen. Mit diesen 3 Punkten ließ sich ein eindeutiger Kurvenradius bestimmen. Berücksichtigt wurden Kurven mit einem Radius von mindestens 2000 m. Um lokale Ungenauigkeiten oder sehr kurze Kurven, die wahrscheinlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Verkehrsgeschehen haben, herauszufiltern, wurden erst Abschnitte als Kurve bezeichnet, die in zwei aufeinanderfolgenden 100 m-Abschnitten den Grenzzradius überschritten. Berücksichtigt wurden Kurven, die sich in einem Abstand von ± 1000 m zur DZ befanden.

Längsneigungen der BAB-Abschnitte wurden aus GPS-Höheninformation der Daten der ZEB-Kampagne aus den Jahren 2021/2022 berechnet. Da diese Informationen pro Fahrstreifen vorliegen, ließ sich hier – unter der Annahme, dass im Normalfall für alle Fahrstreifen einer Fahrtrichtung eine ähnliche Längsneigung vorhanden ist – eine gewisse Validierung innerhalb dieses Datensatzes durchführen. Zusätzlich wurden die berechneten Daten – mit aus dem digitalen Höhenmodell [BKG 2021] berechneten Längsneigungswerten – verglichen. Da sich hier eine sehr gute Übereinstimmung ergab wurde letztendlich eine Kombination der beiden Datensätze genutzt, bei der Ausreißer und fehlende Daten im ZEB-Datensatz mit Daten aus dem digitalen Höhenmodell ersetzt wurden.

3.2 Dauerzählstellen

In Deutschland werden seit den 1960-er Jahren automatische DZ betrieben, wodurch in einem mehrfach qualitätsgesicherten Prozess Verkehrsmengendaten als Grundlage der Berechnung verkehrsstatischer Kennwerte (wie z. B. die „Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke“ (DTV)) erhoben werden.

An diesen DZ bestehen i. d. R. auch die technischen Voraussetzungen zur Erfassung von Geschwindigkeitsdaten. Von 2010 bis 2014 wurden an 60 (richtungsbezogen 120) ausgewählten DZ Geschwindigkeitsdaten erfasst und mit einem zur Verkehrsmengenerhebung vergleichbaren qualitätsgesicherten Prozess ausgewertet. Der damaligen Erhebung lag eine umfangreiche Voruntersuchung [HARTZ et al. 2006]

hinsichtlich der Repräsentativität der ausgewählten Abschnitte für das Gesamtnetz bzgl. räumlicher, verkehrsrechtlicher, verkehrlicher und (jahres-)zeitlicher Randparameter/Faktoren zu Grunde. Aufgrund des für die vorliegende Untersuchung bestehenden Zeitrahmens war eine Aktualisierung dieser Voruntersuchung nicht möglich. Die Beurteilung der Repräsentativität des letztendlich ausgewählten Kollektivs wurde bei der vorliegenden Untersuchung im Nachgang vorgenommen.

Mit Stand 03.06.2024 umfasste das DZ-Netz auf BAB 1.238 DZ (entspricht 2.476 richtungsbezogenen DZ). Auf Basis der in der BAST vorliegenden Erfahrungen mit der Auswertung von Geschwindigkeitsdaten aus DZ wurden für die zu behandelnde Fragestellung zunächst 294 DZ (dies entspricht 588 richtungsbezogenen DZ) ausgewählt, welche grundsätzlich qualitativ hochwertige Geschwindigkeitsdaten erwarten ließen. Dabei wurden DZ ausgewählt, die eine 8+1-Fahrzeugartenaufteilung aufwiesen (siehe Abbildung 1 - dies ist für die gesonderte Erfassung der für die Aufgabenstellung relevanten Fahrzeugarten von Bedeutung), möglichst über eine gültige Zulassung verfügten und außerhalb von Anschlussstellen oder sonstigen Knotenpunkten (Autobahnkreuze/ -dreiecke) lagen. Hierbei waren die 60 Abschnitte der kontinuierlichen Erhebungsphase (2010 - 2014) prioritär.

Anzahl Klassen/ Gruppen	Bezeichnung der Fahrzeugklassen / -gruppen (mit Code)								
1	Kfz (64)								
2	Pkw-Ähnliche (32)				Lkw-Ähnliche (33)				
3		LVo* (36)			SGV* (34)			BPA* (35)	
5+1	nk Kfz (6)	PkwG (1)			Lkw (3)	LkwK (4)		Bus (5)	PkwA (2)
8+1	nk Kfz (6)	Krad (10)	Pkw (7)	Lfw (11)	Lkw (3)	LkwA (8)	Sattel-Kfz (9)	Bus (5)	PkwA (2)
Grundklassifizierung	nk Kfz	Krad	Pkw	Lfw	Lkw	LkwA	Sattel-Kfz	Bus	PkwA

(*: Fahrzeuggruppe, Verwendung in der Verkehrsstatistik; aus TLS 2012, Tabelle 2-11)

Abbildung 1: Übersicht der Fahrzeugklassen und -gruppen

Für diese 294 DZ wurden Daten bei der Autobahn GmbH angefordert. Die Daten sollten gemäß TLS2012 DE-Block-Struktur Typ 79 "LVE-Ergebnismeldung Version 24", Klasseneinteilung nach DE-Block-Struktur im Typ 38 nach den TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, [BAST 2012]) u. a. folgende Inhalte enthalten:

- Zeitstempel (Datum und Uhrzeit)
- Fahrstreifen

- Fahrzeugmengen der 3 Geschwindigkeitsfahrzeuggruppen LVo (Leichtverkehr ohne Anhänger), SGV (Schwerer Güterverkehr) und BPA (Busse und Pkw mit Anhänger)
- Je Fahrzeuggruppe die mittleren Geschwindigkeiten v_m , Standardabweichungen s_{v_m} , v_{15} (Geschwindigkeit, die von 15 % der Fahrzeuge nicht überschritten wird) und v_{85} (Geschwindigkeit, die von 85 % der Fahrzeuge nicht überschritten wird)
- Je Fahrzeuggruppe die Mengenverteilungen in Geschwindigkeitsklassen

Würden die Einzelfahrzeugdaten (wie z. B. bei DZ im Umfeld von VBA) zunächst in Minutenintervallen aggregiert, ergäben sich an mehreren Stellen Abweichungen. Weiterhin liegen hier regelmäßig die Daten nicht im notwendigen Detaillierungsgrad für die Fahrzeugarten vor.

Die Daten wurden halbautomatisiert qualitätsgesichert. Hierfür wurde die noch von der Phase der kontinuierlichen Datenerhebung (2010 – 2014) vorhandene BAST-eigene Software TEMPO u. a. hinsichtlich der Datenformate aktualisiert und weiterentwickelt.

Anschließend konnten die Daten in das Programm TEMPO eingelesen und entsprechend ausgewertet werden. Eine Beispielauswertung ist im Anhang enthalten. Wesentlich für dieses Projekt sind die mittleren Geschwindigkeiten des LVo ($v_{m_{LVo}}$) für das Auswertejahr 2024 sowie die Geschwindigkeitsverteilungen des LVo über die 16 Geschwindigkeitsklassen.

Mit den Metadateninformationen (siehe Abschnitt 3.1) konnten die Ergebnisse aus TEMPO plausibilisiert und Zeitbereiche mit Arbeitsstelleneinfluss oder Grenzkontrolle eliminiert werden. Entscheidend für die Plausibilisierung waren belastbare Informationen über

- das Tempolimit am DZ-Standort inkl. Information über einen Wechsel des Tempolimits in unmittelbarer Nähe (< 500 m),
- die Kurvigkeit,
- die Längsneigung sowie
- das Lkw-Überholverbot.

Für die Plausibilisierung wurden die Einzelergebnisse aus dem Programm TEMPO (s. Anhang) herangezogen und analysiert. Aus den Tages-, Wochen- und Jahresganglinien (Anhang 2 bis Anhang 4) waren Geschwindigkeitsschwankungen erkennbar, die bewertet wurden. Eine Variation im Tagesverlauf durch unterschiedliche Verkehrsmengen, die sich beispielsweise durch die Rushhour begründen, wurde als plausibel eingestuft, während größere Schwankungen im Wochen- oder Jahresgang bedingt durch z. B. Arbeitsstellen längerer Dauer zu eliminieren waren. Dabei war nicht nur der Verlauf des LVo, sondern auch der des SGV ein wichtiger Indikator, da die Geschwindigkeit des SGV i. d. R. eine sehr hohe Konstanz aufweist. An den Ganglinien, den Belegungen in den Histogrammen (Anhang 6) sowie den q-v-Diagrammen (Anhang 7) war erkennbar, ob das Zusammenspiel der Daten mit dem zugeordneten Tempolimit plausibel war oder ob händische Überprüfungen der Tempolimit-Angabe erforderlich waren. Nur DZ, an denen die Tempolimitangabe mit den Daten korrelierte, wurden für die spätere endgültige Auswertung genutzt.

Schließlich wurden die Arbeitsstränge zusammengeführt. Für einzelne schwach besetzte Kombinationen von Randparametern wurden noch zusätzlich zu den ursprünglich 294 ausgewählten DZ gezielt weitere DZ-Daten angefordert und die Randparameter nachermittelt.

Der resultierende und für diese Fragestellung nutzbare Datenpool umfasste abschließend 123 richtungsbezogene DZ und erfüllte die nachfolgenden Bedingungen:

- Datenlieferung für den betrachteten Zeitraum von Januar 2024 bis mindestens September 2024
- Vollständige Erfassung aller Richtungsfahrstreifen mit nur geringen bzw. tolerierbaren Datenausfällen
- Angegebenes Tempolimit entspricht den Erhebungsdaten; Elimination von Zeitbereichen mit z. B. Arbeitsstelleneinfluss oder Grenzkontrolle
- TLS-DE-Blockstruktur 79 vorhanden, so dass Histogramme von LVo abgebildet werden können

Die räumliche Verteilung der für die Fragestellung nutzbaren Geschwindigkeits-DZ zeigt Abbildung 2.

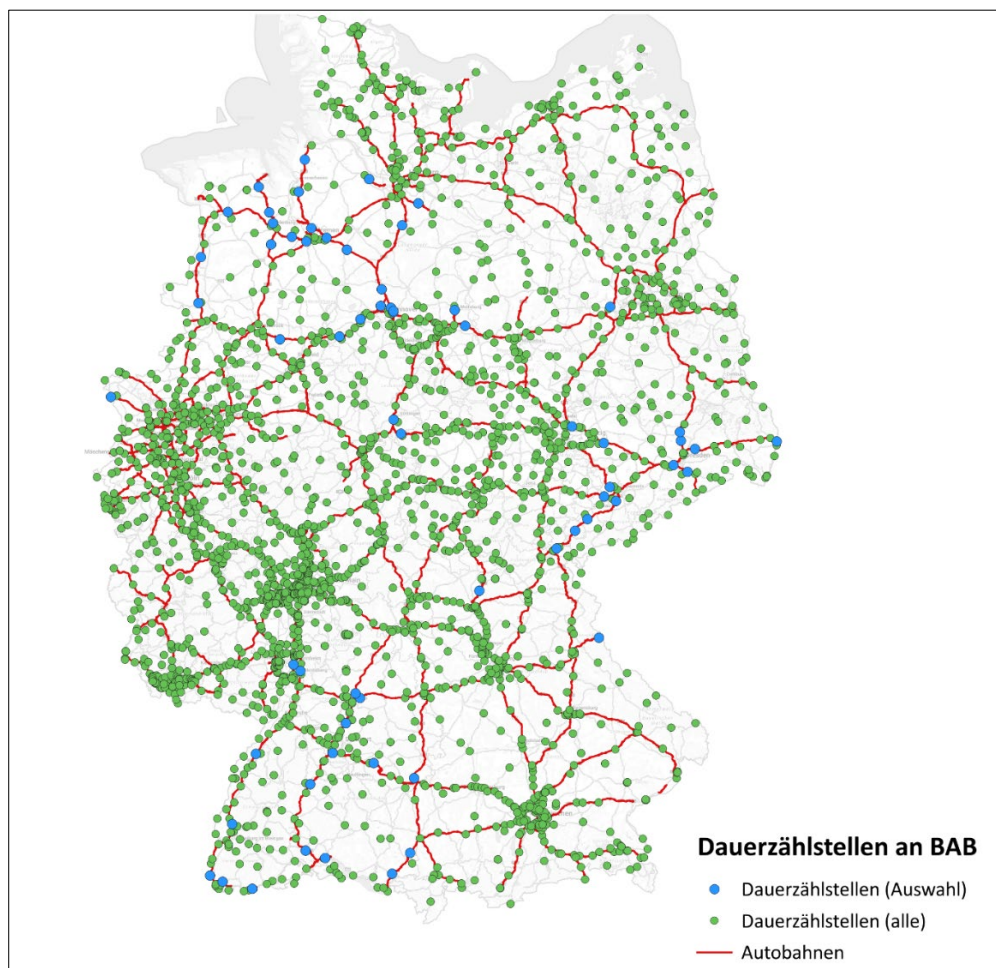


Abbildung 2: Lage der eingeflossenen Geschwindigkeits-DZ und aller DZ

Zur Beurteilung der Repräsentativität dieser 123 DZ wurden die Randparameter ausgewertet und den Typzuordnungen aus der kontinuierlichen Erhebungsphase (2010 - 2014) zugeordnet. Die Parameter wurden auf Korrektheit umfassend händisch geprüft, so dass verlässliche Informationen vorlagen.

Vergleichend wurden die richtungsbezogenen DZ des Jahres 2022 entsprechend aufbereitet. Die Angaben dieser DZ sind im Gegensatz zu den eingeflossenen 123 Geschwindigkeits-DZ allerdings nicht aufwändig händisch plausibilisiert.

Hieraus ergeben sich Anhaltspunkte, dass einige wenige Konstellationen im abschließenden Netz der Geschwindigkeits-DZ unterrepräsentiert sind. Dies betrifft insbesondere die Kombination „Fahrstreifenanzahl ≥ 3 \ Schwerverkehrsanteil $< 15\%$ \ geringe Längsneigung“ für unlimitierte Abschnitte. Bei einer kontinuierlichen Erhebung von Geschwindigkeitsdaten kann eine bessere Abdeckung der Typen erreicht werden.

Der aktuell nutzbare Datenpool wird für die Fragestellung als weniger repräsentativ eingeordnet wie der bis 2014 aus etwas weniger richtungsbezogenen DZ bestehende, welcher insbesondere über mehrere Jahre kontinuierlich auch hinsichtlich der Repräsentativität qualitätsgesichert wurde. Andererseits stellt sich die Datenbasis hinsichtlich der Netzparameter (siehe Abschnitt 3.1) und der Arbeitsstellen (siehe Abschnitt 3.3) als wesentlich robuster dar als die entsprechenden damals vorliegenden Daten.

3.3 Arbeitsstellen

Der Ausbau-, Instandsetzungs- und Erhaltungsbedarf des BAB-Netzes erfordert die Einrichtung von zahlreichen Arbeitsstellen. Für Strecken, auf denen Arbeitsstellen eingerichtet sind, gelten temporär Geschwindigkeitsbeschränkungen, die von den regulären Geschwindigkeitsbeschränkungen - sofern vorhanden - abweichen. Gemäß den Richtlinien zur Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen [FGSV 2022] können in Arbeitsstellen auf BAB Geschwindigkeitsbeschränkungen von 60, 80 oder 100 km/h angeordnet werden. Aufgrund der Behelfsverkehrsführungen an Arbeitsstellen kann das dortige Fahrverhalten nicht mit dem Fahrverhalten auf freier Strecke mit identischen Geschwindigkeitsbeschränkungen gleichgesetzt werden. Dies wird durch Untersuchungen in [GEISTEFELDT et al. 2024] belegt, die sich insbesondere mit der Verkehrsablaufqualität an Arbeitsstellen befassen. Von Arbeitsstellen betroffene Strecken müssen daher in eigenen Klassen betrachtet werden. Infolgedessen wird das zu berücksichtigende Streckennetz, in dem eine generelle zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h potenziell Auswirkungen erzielt, im Vergleich zu einer Betrachtung eines Idealzustands ohne Arbeitsstellen kleiner.

Auch richtungsbezogene Vollsperrungen beeinflussen dieses Netz. Anders als bei Arbeitsstellen werden die gesperrten Streckenkilometer keiner anderen Klasse zugeordnet. Sie fallen aus der Betrachtung vollständig heraus, da auf den betroffenen Strecken während der Sperrung keine Fahrleistung erbracht werden kann.

Auch wenn die Daten aus VAS und MIA immer nur eine momentane Situation abbilden, legt der Zustand des Gesamtnetzes nahe, dass sich diese momentane Situation im Sinne der Fragestellung repräsentativ auch für die kommenden Jahre darstellt, d.h. dass auch in den kommenden Jahren Netzanteile mit den für die Fragestellung

relevanten Randparametern in ähnlicher Weise von Ausbau-, Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen betroffen sein werden.

3.3.1 Arbeitsstellenlängen im BAB-Netz

Arbeitsstellendaten

Um Arbeitsstellen in eigene Klassen einzuordnen, sind Kenntnisse über die angeordneten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in jeder Arbeitsstelle obligatorisch. Zudem sind Kenntnisse über die Anzahl, Länge und Dauer aller Arbeitsstellen je Tempolimit in der Arbeitsstelle sowie aller Sperrungen erforderlich. Liegen die Daten vor, lassen sich diese klassifizieren und aggregieren.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden alle meldepflichtigen Arbeitsstellen aus dem Jahr 2024 berücksichtigt, die zum 30.11.2024 aus MIA an das VAS der BAST gemeldet wurden. Als meldepflichtig gelten alle Arbeitsstellen mit einer Dauer von 4 oder mehr Kalendertagen sowie alle arbeitsstellenbedingten Vollsperrungen einer Fahrtrichtung ungeachtet ihrer Dauer. Da meldepflichtige Arbeitsstellen mindestens 3 Monate vor Beginn an das VAS zu übermitteln sind, kann davon ausgegangen werden, dass mit Ende November alle für das gesamte Jahr 2024 geplanten Arbeitsstellen berücksichtigt werden.

Für das Jahr 2024 wurden 787 meldepflichtige Arbeitsstellen registriert. Die Streckenkilometer, die eine Arbeitsstelle über die Zeit ihrer Einrichtung einschränkt, errechnen sich durch Multiplikation von Dauer und Länge der einzelnen Bauabschnitte jeder Arbeitsstelle. Werden die Streckenkilometer aller Arbeitsstellen eines Jahres aufsummiert, ergibt dies die Streckenkilometer, welche im betrachteten Jahr durch meldepflichtige Arbeitsstellen beeinflusst werden. In 2024 beläuft sich dies auf 849.606 km. Das entspricht einer mittleren täglichen Länge von 2.321 km (8,79 % des BAB-Netzes). Davon fallen 2284 km (8,67 % des BAB-Netzes) auf Arbeitsstellen mit Behelfsverkehrsführungen und 38 km (0,14 % des BAB-Netzes) auf Richtungssperrungen. Die jeweiligen Anteile am Gesamtnetz sind in Tabelle 1 dargestellt.

Art	Anteil am BAB-Netz [%]
Arbeitsstellen (eingeschränkt befahrbar)	8,64
Richtungssperrungen (nicht befahrbar)	0,14
Gesamt (Arbeitsstellen & Sperrungen)	8,79

Tabelle 1: Arbeitsstellenanteile am Gesamtnetz

Richtungssperrungen führen dazu, dass Strecken nicht mehr befahrbar sind. Diese Streckenkilometer sind daher in allen Berechnungen mit einem Bezug zur Länge des BAB-Netzes herauszurechnen. Dies bedeutet für diese Untersuchung, dass das befahrbare BAB-Netz im Durchschnitt um ca. 38 km kürzer ist als dessen Gesamtlänge (26420 km). Das entspricht einem im Mittel zu 99,86% befahrbaren BAB-Netz.

Anders als bei Sperrungen bleibt das von Arbeitsstellen betroffene Netz als eingeschränkt befahrbar erhalten. Es wird jedoch den Tempolimits für Arbeitsstellen zugeordnet. Der Arbeitsstellenanteil von 8,64% am Gesamtnetz wird daher auf die

drei Tempolimits von 60 km/h, 80 km/h und 100 km/h nach Tabelle 2 aufgeteilt. Die Anteile ergeben sich aus den Arbeitsstellendaten, in denen die jeweilige Geschwindigkeitsanordnungen der Arbeitsstellen enthalten sind.

Tempolimit Arbeitsstelle	Anteil an allen meldepflichtigen Arbeitsstellen [%]
<= 60 km/h*	2,11
80 km/h	94,37
>=100 km/h*	3,52

*Wurden Geschwindigkeiten von weniger als 60 km/h bzw. mehr als 100 km/h angeordnet, wurden diese dem Tempolimit 60 km/h bzw. 100 km/h zugeordnet. Da davon lediglich 0,1% der Streckenkilometer von Arbeitsstellen betroffen sind, wird das als akzeptable Vereinfachung angesehen.

Tabelle 2: Arbeitsstellenanteile nach angeordneter Geschwindigkeit*

Um die Länge des uneingeschränkt befahrbaren Netzes zu bestimmen, wird dieses um die Anteile für Sperrungen und Arbeitsstellen (8,79%) reduziert. Dazu wird angenommen, dass sich über die Zeit eine gleichmäßige Verteilung im BAB-Netz ergibt, da über einen langfristigen Zeitraum das BAB-Netz vollständig betroffen ist. Daraus ergibt sich, dass jedes Tempolimit ohne Arbeitsstelle gleichermaßen um den Arbeitsstellenanteil reduziert werden muss (die reale Verteilung der Arbeitsstellen aus 2024 auf die Tempolimits ohne Arbeitsstelle ist demnach nicht relevant).

Letztendlich ergeben sich die Streckenlängen im befahrbaren Netz, aufgeteilt nach Tempolimits mit und ohne Arbeitsstelle gemäß Tabelle 3:

Tempolimit [km/h]	BAB Bestand [km]	Sperrung [%]	Arbeitsstelle [%]	BAB befahrbar [km]
60 (Arbeitsstelle)			0,18	48
≤ 60	132	-0,14	-8,64	120
80 (Arbeitsstelle)			8,16	2.152
80	767	-0,14	-8,64	699
100 (Arbeitsstelle)			0,30	80
100	1.780	-0,14	-8,64	1.624
120	3088	-0,14	-8,64	2.817
130	1.353	-0,14	-8,64	1.234
offen	19.301	-0,14	-8,64	17.607
gesamt	26.420	-0,14	-	26.382

Tabelle 3: Netzanteile nach Tempolimits

3.3.2 Geschwindigkeiten in Arbeitsstellen

Methodische Ansätze

Wie bereits beschrieben ist das Fahrverhalten in Arbeitsstellen nicht vergleichbar mit dem Fahrverhalten ohne Arbeitsstelle. Für Arbeitsstellen sind daher separat mittlere Geschwindigkeiten für die Untersuchung heranzuziehen.

Bereits in [LÖHE 2016] wurde festgestellt, dass es keine aussagekräftigen Daten zum Geschwindigkeitsverhalten in Arbeitsstellen gibt. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass selbst bei vorhandenen Messquerschnitten diese i. d. R. keine

nutzbaren Daten liefern, sobald an deren Lage Arbeitsstellen eingerichtet werden. Die Gründe dafür sind vielfältig: DZ werden deaktiviert oder zurückgebaut, Leitungen werden durchtrennt, noch funktionstüchtige DZ liefern aufgrund der Behelfsverkehrsführungen keine validen Daten mehr. Daher wurde in [LÖHE 2016] mangels aussagekräftiger Grundlagen eine mittlere Geschwindigkeit angenommen, die der angeordneten Geschwindigkeitsbeschränkung entsprach.

[GEISTEFELDT et al. 2024] ermöglichen mit ihren Untersuchungen inzwischen einen neuen Ansatz. Im Rahmen der Untersuchung wurden Kapazitäten, q-v-Diagramme und Unfallkenngrößen für Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer auf Autobahnen ermittelt. Die Ergebnisse sind in die Parametrierung des Verkehrsanalysesystems (VAS) zur Bewertung der Auswirkungen von Arbeitsstellen auf den Verkehrsablauf im Rahmen der Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen eingeflossen.

Die Ermittlung der Kapazitäten an Arbeitsstellen längerer Dauer orientierte sich an der Methodik zur Herleitung der Kapazitätswerte im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV 2015]. Auf empirischer Basis wurden maßgebende Einflussgrößen, standardisierte Kapazitätswerte und zugehörige Abminderungsfaktoren für Arbeitsstellen ermittelt. Die Ermittlung der q-v-Diagramme für Arbeitsstellen basiert ebenfalls auf der Methodik im HBS 2015.

Somit steht mit [GEISTEFELDT et al. 2024] ein modellbasiertes Bemessungsverfahren für Geschwindigkeiten in Arbeitsstellen zur Verfügung. Dieses kann dem Bemessungsverfahren des HBS gegenübergestellt werden. Werden mittels der beiden Verfahren zwei Szenarien verglichen, die sich ausschließlich im Vorhandensein einer Arbeitsstelle unterscheiden, ergeben sich zwei q-v-Diagramme, die ins Verhältnis gebracht werden können. Die ermittelten Abweichungen werden als Reduktionsfaktor dargestellt und anteilig auf die empirisch ermittelten Geschwindigkeitswerte der zugehörigen Tempolimits ohne Arbeitsstelle übertragen (siehe Abschnitt 3.6).

Im Folgenden wird beschrieben, wie die erforderlichen Reduktionsfaktoren ermittelt werden.

Das HBS ermöglicht die Berechnung der q-v-Kurven für die Tempolimits 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h und 130 km/h¹. Die Ergänzungen von [GEISTEFELDT et al. 2024] ermöglichen die Berechnung der q-v-Kurven für die Tempolimits von 60 km/h, 80 km/h und 100 km/h in Arbeitsstellen. Für das Tempolimit 60 km/h in Arbeitsstellen ist keine Differenzbetrachtung möglich, da keine Referenz im HBS existiert. Hier ist ein anderer Ansatz zu verfolgen (siehe Abschnitt 3.6).

Bei der Differenzbetrachtung werden ausschließlich die Bereiche der q-v-Kurven bis zum Zusammenbruch des Verkehrs betrachtet. Dies beruht auf folgender Annahme:

Ein Verkehrszusammenbruch findet im Verlauf der q-v-Kurven in beiden Fällen (mit/ ohne Arbeitsstelle) statt. Beim Fall „mit Arbeitsstelle“ findet der Zusammenbruch früher statt, als beim korrespondierenden Szenario ohne Arbeitsstelle. Die Differenzen der Geschwindigkeiten nehmen daher bis zu diesem Punkt aufgrund des Kurvenverlaufes leicht zu. Danach nehmen die Differenzen jedoch deutlich ab, bis auch die zweite q-v-Kurve den Punkt des Verkehrszusammenbruchs erreicht. Nach dem Zusammenbruch beider q-v-Kurven stellen sich Grenzgeschwindigkeiten

¹ Inkl. der Fälle mit SBA oder Richtgeschwindigkeit

ein, die im Vergleich zum nicht überlasteten Bereich nahe beieinander liegen. Um die sich insgesamt ergebenden Auswirkungen auf eine mittlere Geschwindigkeit zu berücksichtigen, wären detaillierte Informationen zur Auslastung in Arbeitsstellen über die Zeit erforderlich, die für dieses Projekt jedoch nicht vorlagen.

q-v-Kurven für Szenarien ohne und mit Arbeitsstelle

Die q-v-Betrachtung ohne Arbeitsstelle basiert auf der HBS-Methode. Als maßgebende Einflussgrößen werden hier neben der angeordneten Geschwindigkeitsbeschränkung der Schwerverkehrsanteil, die Anzahl der Fahrstreifen (zwei bis vier Fahrstreifen), die Längsneigung und die Lage innerhalb/ außerhalb eines Ballungsraums berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Szenarien. Diese gilt es so zu vereinfachen, dass für jedes Tempolimit ein repräsentatives Szenario verbleibt.

Da eine netzweite Betrachtung stattfindet, wird für alle Szenarien (ohne/ mit Arbeitsstelle) der netzweite durchschnittliche SV-Anteil von 15% [BASt 2024e] angesetzt. Unter Berücksichtigung dieses SV-Anteils können sämtliche Eingangsparameter der q-v-Kurven für Szenarien ohne Arbeitsstelle über die Parametertabellen des HBS mittels Interpolation bestimmt werden. Für jedes BAB-Tempolimit ergeben sich sechs Szenarien, die sich in der Anzahl der Fahrstreifen und der Lage außerhalb bzw. innerhalb eines Ballungsraums unterscheiden. Die q-v-Kurven der Szenarien für das Tempolimit 80 km/h sind beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt.

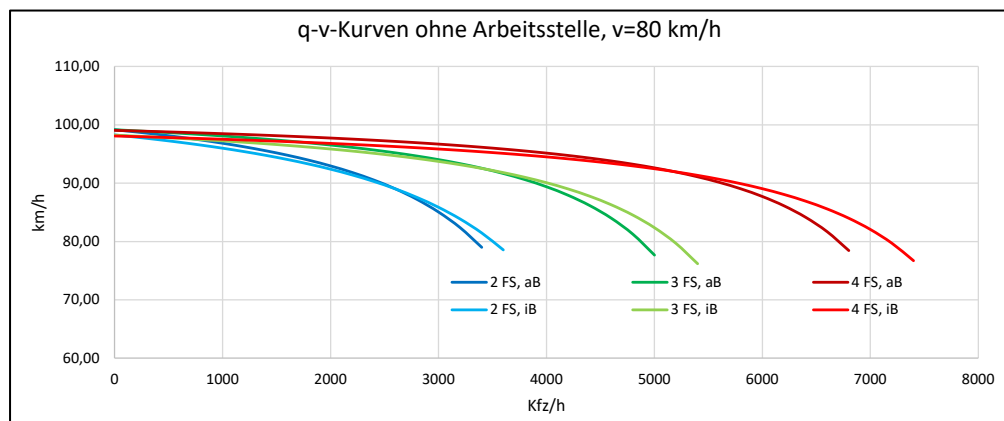


Abbildung 3: q-v-Kurven für die Szenarien ohne Arbeitsstelle bei v=80km/h

Die Häufigkeiten des Auftretens der einzelnen q-v-Kurven ergeben sich aus den BAB-Netzdaten der BASt [BASt 2024b]. Die aus der Häufigkeitsverteilung ermittelten Anteile der Szenarien werden zur späteren Gewichtung und Mittelung der q-v-Kurven verwendet.

		Ballungsraumklasse	
		Innerhalb (iB)	Außerhalb (aB)
Fahrstreifen- anzahl	2	15,58 %	54,01 %
	3	12,37 %	17,16 %
	4	0,69 %	0,20 %

Tabelle 4: Streckenanteile am BAB-Netz, differenziert nach Fahrstreifenanzahl und Ballungsraumklasse

Die Methodik für Arbeitsstellen unterscheidet sich von der HBS-Methodik grundsätzlich nur darin, dass die Längsneigung als zusätzlicher Eingangsparameter berücksichtigt wird. Im HBS wird diese für die betrachteten Szenarien implizit bereits berücksichtigt. Für die Szenarien mit Arbeitsstelle ergeben sich je Längsneigungs-klasse jedoch eigene Szenarien, sodass eine zusätzliche Gewichtung anhand der streckenbezogenen Längsneigungsanteile erforderlich ist. Dabei wird von einer Gleichverteilung der Arbeitsstellen im Netz ausgegangen. Die Verteilung ergibt sich aus Tabelle 5.

Längsneigungsklasse	Anteil am Gesamtnetz [%]
$\leq 2 \%$	83,8
$2 \% < s \leq 4 \%$	13,5
$> 4 \%$	2,8

Tabelle 5: Streckenanteile nach Längsneigungsklassen im BAB-Netz [BASt 2024b].
(gerundet auf eine Dezimale)

Für die kapazitätsmindernden Einflüsse aus schmalere Fahrstreifen und Fahr-bahnteilungen wird ein pauschaler Abminderungsfaktor von 5% angesetzt. Der Schätzwert basiert auf der Auswertung einer Stichprobe detaillierter Arbeitsstelle-ninformationen aus MIA [Autobahn GmbH des Bundes 2024].

Unter Anwendung der Methode von [GEISTEFELDT et al. 2024] und Berücksichti-gung der genannten Annahmen und Verteilungen lassen sich ebenfalls 6 Szenarien je Tempolimit ermitteln. In Abbildung 4 sind die q-v-Kurven beispielhaft für das Tempolimit $v=80$ km/h dargestellt.

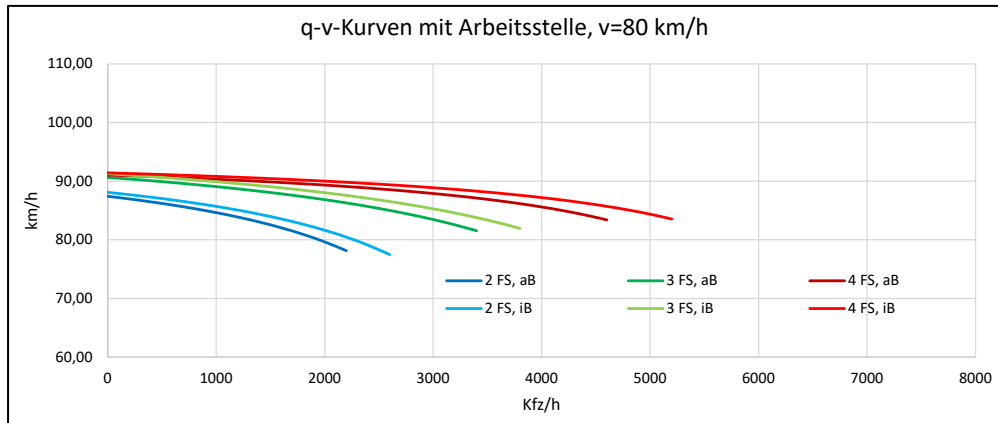


Abbildung 4: q-v-Kurven für die Szenarien mit Arbeitsstelle bei v=80km/h

Die entstandenen q-v-Kurven sind aufgrund der Gewichtung der Längsneigung zwar fiktiv, können aber dennoch zur Ableitung der mittleren Geschwindigkeiten herangezogen werden.

Die Häufigkeit des Auftretens ergibt sich nach Tabelle 6 aus der Verteilung der Arbeitsstelle im Netz, basierend auf den Arbeitsstellendaten des VAS [BASt 2024a] für das Jahr 2024. Auch hier wird zwischen Anzahl der Fahrstreifen und Lage im Netz differenziert.

		Ballungsraumklasse	
		Innerhalb (iB) [%]	Außerhalb (aB) [%]
Fahrstreifenanzahl	2	40,13	38,53
	3	13,18	38,53
	4	0,18	7,63

Tabelle 6: Streckenanteile der Arbeitsstellen, differenziert nach Fahrstreifenanzahl in der Arbeitsstelle und Ballungsraumklasse

Sowohl für den Fall ohne als auch mit Arbeitsstelle werden die Geschwindigkeitswerte der q-v-Kurven gemittelt. Anhand der beiden Verteilungen nach Tabelle 5 und Tabelle 6 findet dabei eine Gewichtung statt. Demnach ergeben sich folgende mittleren Geschwindigkeiten:

- Die mittlere Geschwindigkeit für Strecken mit einer Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h beträgt 92,58 km/h. In Arbeitsstellen wird im Mittel 82,85 km/h gefahren. Dies entspricht einer um 10,51 % geringeren mittleren Geschwindigkeit.
- Die mittlere Geschwindigkeit für Strecken mit einer Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h beträgt 105,13 km/h. In Arbeitsstellen wird im Mittel 100,58 km/h gefahren. Dies entspricht einer um 4,33 % geringeren mittleren Geschwindigkeit.

Die beiden Werte von 10,51 % und 4,33 % bilden somit die erforderlichen Reduktionsfaktoren ab.

3.4 Floating Car Data (FCD)

Bei der Autobahn GmbH liegen für das Autobahnnetz FCD (gefahrte Geschwindigkeiten) der Firma TomTom vor. Im Vergleich zu den Daten der DZ weisen diese jedoch einen sehr starken Aggregierungsgrad auf: So liegen die FCD je Abschnitt (LCL-codiert – siehe hierzu [LÖHE 2023]) als monatlich gemittelte Werte vor, die Basis bildet dabei der Tageszeitbereich von 6 bis 22 Uhr, womit der nächtliche Zeitbereich vollständig fehlt. Datensatzbeschreibungen zur Einschätzung der Trennschärfe im Hinblick auf die Kategorisierung der Fahrzeuge u. ä. (siehe hierzu auch [SCHMAUS et al. 2023]) lagen nicht vor. Hinzu kam die Tatsache, dass für aussagefähige Vergleiche eine Verknüpfung der LCL-Abschnittscodierung mit der ASB-Referenzierung nach [BASt 2024b] erforderlich gewesen wäre. Da der Erkenntnisgewinn aufgrund der beschriebenen Unzulänglichkeiten dieser FCD gering gewesen wäre, wurde hierauf verzichtet.

3.5 Geschwindigkeitsverteilung für die heute unlimitierten Bereiche bei einem generellen Tempolimit 130 km/h

Für alle 123 richtungsbezogenen DZ mit Geschwindigkeitserfassung liegen aus dem BASt-internen Auswerteprogramm TEMPO die Geschwindigkeitsverteilungen des LVo über die 16 Geschwindigkeitsklassen für das Auswertejahr 2024 vor (siehe Anhang 6). Für jede Klasse (0 – 40), [40 – 50), [50 – 60), ..., [170 – 180) und ≥ 180 km/h ist die Anzahl der LVo-Fahrzeuge enthalten, die im Auswertzeitraum mit einer der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse entsprechenden Geschwindigkeit gefahren sind. Das Geschwindigkeitsniveau ist über das Jahr gesehen vergleichsweise konstant, so dass Datenlücken auf die relative Verteilung keine, bzw. kaum Auswirkung haben. Bevor eine Aggregation aller Einzel-Histogramme auf ein Histogramm je Tempolimit erfolgen kann, sind Einzel-Histogramme auf ein volles Jahr hochzurechnen. Dafür wurde zunächst die Anzahl der Stunden mit fehlenden Daten ermittelt. Diese Anzahl wurde um 5 % reduziert, um bei der Hochrechnung auf das gesamte Jahr keine Übergewichtung gegenüber einer DZ mit vollständigen Stundendaten zu erhalten. Die synthetischen Jahresstunden ermitteln sich dann durch Addition der gültigen Stunden mit der um 5 % reduzierten Anzahl fehlender Stunden:

$$Anz_{syn. \text{ Jahresstunden}} = Anz_{gültige \text{ Stunden}} + 95\% \cdot Anz_{fehlende \text{ Stunden}}$$

Die hochgerechnete Anzahl an Fahrzeugen je Geschwindigkeitsklasse ermittelt sich dann nach:

$$Anz_{LVo \text{ Jahr}} = Anz_{LVo \text{ gültige \text{ Stunden}}} \cdot \frac{Anz_{syn. \text{ Jahresstunden}}}{Anz_{gültige \text{ Stunden}}}$$

Anschließend wurden zur Ermittlung einer Geschwindigkeitsverteilung je Tempolimit die entsprechenden richtungsbezogenen DZ gefiltert und die Fahrzeugmengen je Geschwindigkeitsklasse addiert. Auf diese Weise fließen DZ mit höherer Verkehrsmenge entsprechend stärker ein als weniger belastete Strecken (Mengengewichtung). Das Ergebnis wurde auf die Gesamtfahrzeugmenge dieses Tempolimitbereiches normiert, so dass eine prozentuale Verteilung vorliegt. Somit ergibt sich ein Histogramm für alle Abschnitte ohne Tempolimit (siehe Abbildung 5).

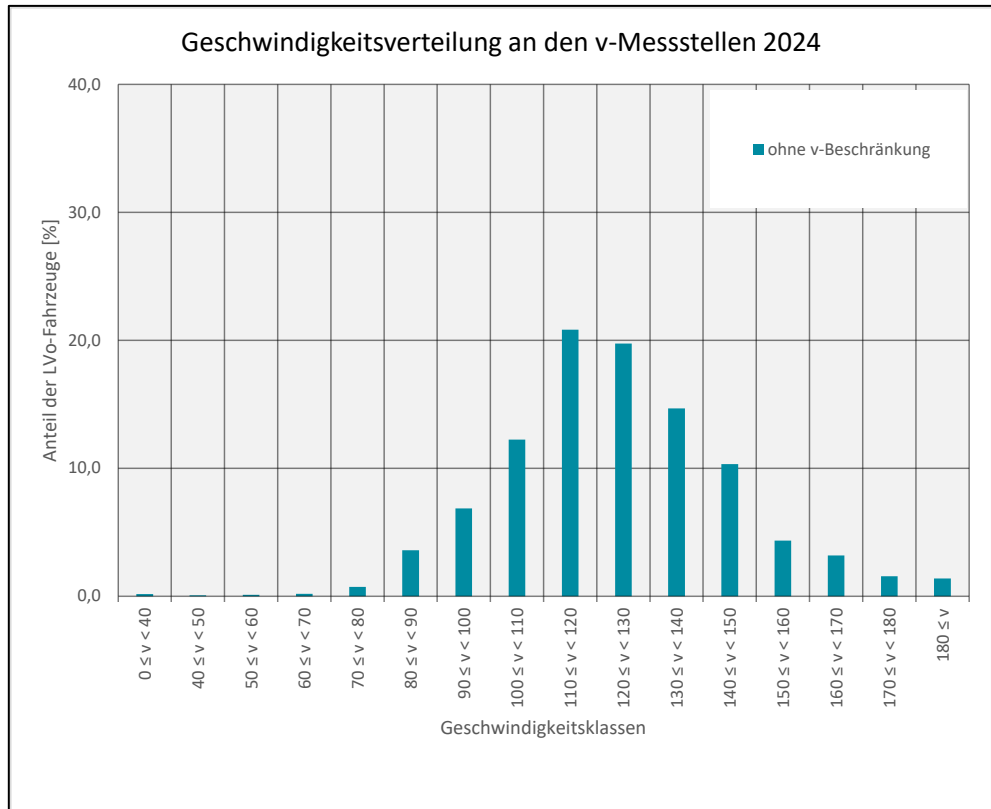


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung freie Strecke (ohne Tempolimit) 2024

Als eine zentrale Eingangsgröße für die CO₂-Berechnung wird nun die Geschwindigkeitsverteilung für diese Abschnitte benötigt, wenn diese einem generellen Tempolimit von 130 km/h unterliegen. Die Befolgungsrate ist im Sinne der Aufgabenstellung von zentraler Bedeutung. Hierbei sind zentrale Parameter wie Akzeptanz der Maßnahme in der Bevölkerung, Überwachungsintensität und ggf. Anpassung des Rechtsrahmens nicht bekannt. Der aktuelle Rechtsrahmen in Deutschland unterscheidet sich deutlich von den einschlägigen Gesetzen und Vorschriften in den europäischen Nachbarländern, so dass ggf. im Ausland vorliegende Daten nicht herangezogen werden können. Zielführend wäre hingegen eine Ermittlung anhand von Vorher-Nachher-Vergleichen (Anordnung eines Tempolimits 130 km/h unter Ceteris-paribus-Bedingungen mit Vornahme der erforderlichen empirischen Erhebungen), dies konnte jedoch im vorgegebenen zeitlichen Untersuchungsrahmen nicht umgesetzt werden. Bei den im Status quo vorhandenen Anordnungen eines Tempolimits von 130 km/h handelt es sich im besonderen Maße (nur vergleichsweise wenige Streckenabschnitte sind im aktuellen Netz davon betroffen) um Anordnungen vor einem speziellen situativen Hintergrund (z. B. Geschwindigkeitstrichter im grenznahen Bereich). Die Auswertungen der einzelnen vorhandenen DZ mit Geschwindigkeitsmessungen haben gezeigt, dass (zumindest von diesen DZ) unmittelbare Rückschlüsse auf ein generelles Tempolimit von 130 km/h nicht verzerrungsfrei möglich sind.

Die Geschwindigkeitsverteilung für ein Tempolimit von 130 km/h wurde anhand der vorliegenden Geschwindigkeitsdaten für den unlimitierten Bereich (in den niedrigeren Geschwindigkeitsklassen), für ein Tempolimit von 120 km/h und für die

vereinzelt vorliegenden Abschnitte mit einem heute schon existierenden Tempolimit von 130 km/h für drei Szenarien abgeleitet.

1.: „Niedrige Befolungsrate“

Das dargestellte Szenarien-Histogramm wurde als Expertenschätzung in enger Anlehnung an die empirisch ermittelten Histogramme der Streckenabschnitte mit einem Tempolimit von 130 km/h sowie ohne Tempolimit abgeleitet. Hierzu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Für den Bereich bis 120 km/h des Szenarien-Histogramms wurden die entsprechenden Werte des Histogramms ohne Tempolimit verwendet. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass sich das Geschwindigkeitsverhalten in diesem Bereich auch mit einem generellen Tempolimit nicht wesentlich ändert. Dieser Effekt leitet sich im Vergleich der heute nicht limitierten Abschnitte mit den heute mit 130 km/h limitierten Abschnitten (letztere: kleine Fallzahl!) ab. Das Histogramm der Abschnitte mit heute Tempolimit 120 km/h indiziert hier eine andere Verteilung (siehe Szenario „Höhere Befolungsrate“).
- Für den Bereich ab 130 km/h wurde testweise eine positive Verschiebung des entsprechenden Bereichs des Histogramms der Abschnitte mit einem heutigen Tempolimit von 120 km/h um eine Klasse vorgenommen. Dies ist nahezu deckungsgleich mit den entsprechenden Werten des Histogramms der Abschnitte mit einem heutigen Tempolimit von 130 km/h. Das „Überschreitungsverhalten“ ist also offensichtlich vergleichbar.
- Sich durch diese Verschiebungen ergebende „übrige“ Anteile in den Bereichen bis 120 und ab 130 km/h wurden im Szenarien-Histogramm der Klasse „120 – 130 km/h“ (und damit dem Bereich des generellen Tempolimits) zugeordnet. Dies erklärt den entsprechend hohen Anteil dieser Klasse im Szenarien-Histogramm gemäß Abbildung 6.

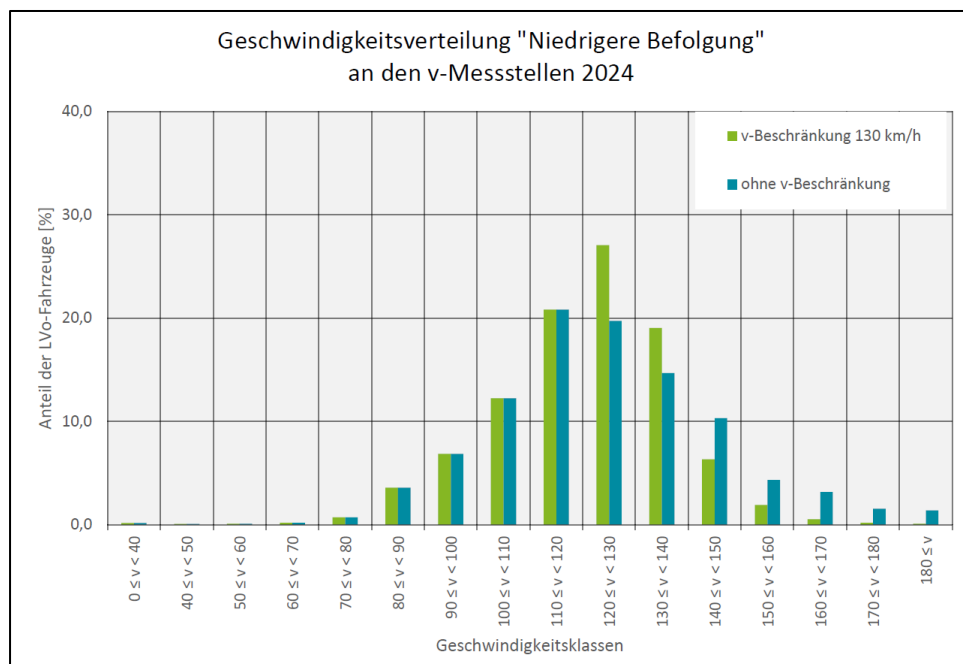


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Niedrigere Befolung“

2.: „Höhere Befolgungsrate“

Das dargestellte Szenarien-Histogramm wurde als Expertenschätzung anhand empirischer Daten abgeleitet. Die unterstellte Befolgungsrate orientiert sich dabei u.a. am Leitgedanken möglicher Punkte bzw. eines drohenden Fahrverbots aufgrund Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach gegenwärtigem Straßenverkehrsrecht. Im Unterschied zum Szenario „Niedrigere Befolgungsrate“ erlangen die aus den Abschnitten mit Tempolimit 120 km/h ermittelten empirischen Werte in der Modellierung eine höhere Bedeutung.

- Für den Bereich bis 130 km/h des Szenarien-Histogramms wurden die Werte des Histogramms der Streckenabschnitte ohne Tempolimit als Basis verwendet, es erfolgte jedoch eine anteilige Erhöhung um Werte aus dem Bereich über 130 km/h. Hintergrund der Annahme war das im Histogramm der Streckenabschnitte mit einem Tempolimit von 120 km/h auch in den Geschwindigkeitsklassen unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit beobachtbare Geschwindigkeitsverhalten, wonach sich im Vergleich zu Streckenabschnitten ohne Tempolimit auch in diesem Bereich das Geschwindigkeitsverhalten entsprechend verändert.
- Im Vergleich zum Szenario der niedrigen Befolgungsrate wird im Bereich zwischen 130 und 150 km/h („Punktgrenze“ bei 150 km/h) von einer geringeren Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ausgegangen, weshalb eine anteilige Reduzierung bezogen auf das Szenario der niedrigen Befolgungsrate in diesem Bereich erfolgte.
- Für den Bereich ab 150 km/h des Szenarien-Histogramms wurden die entsprechenden Werte des Histogramms der Streckenabschnitte mit einem Tempolimit von 120 km/h verwendet. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass (ohne wesentlich veränderten Rechtsrahmen) derart hohe Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch bei einem generellen Tempolimit zu beobachten wären, da von einem bewussten Handeln auszugehen ist.
- Sich durch diese Verschiebungen ergebende „übrige“ Anteile in den Bereichen bis 120 und ab 130 km/h wurden im Szenarien-Histogramm der Klasse „120 – 130 km/h“ (und damit dem Bereich des generellen Tempolimits) zugeordnet. Dies erklärt den entsprechend hohen Anteil dieser Klasse im Szenarien-Histogramm gemäß Abbildung 7.

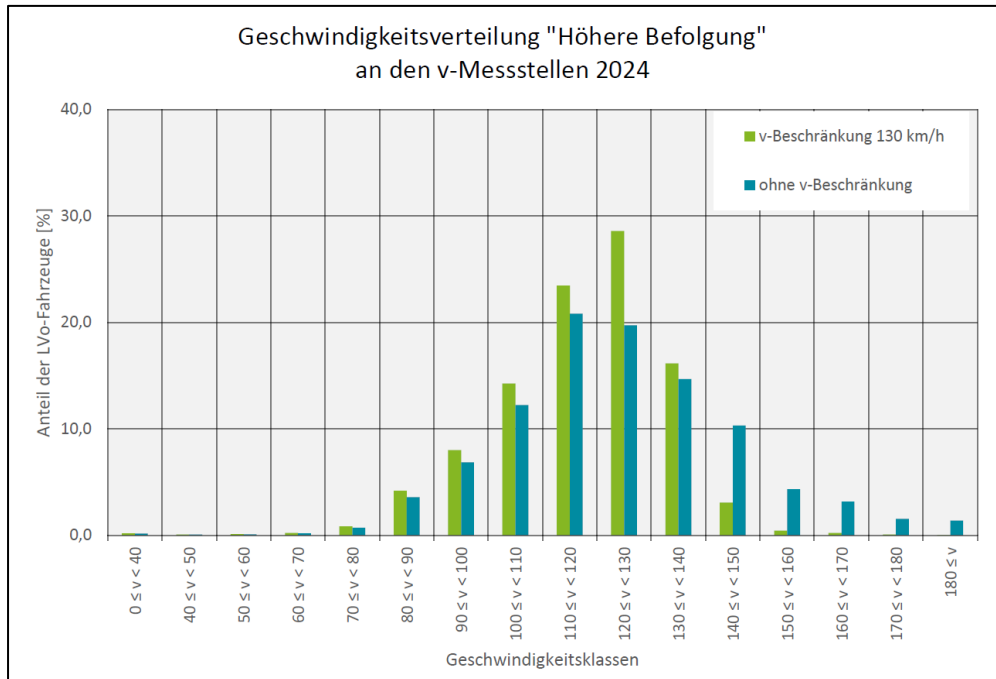


Abbildung 7: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Höhere Befolgung“

3. „Begrenzer“

Dieses „Maximalszenario“ zur Quantifizierung der theoretisch erreichbaren Reduzierung der CO₂-Emissionen bei einer vollständigen Einhaltung einer generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h ist ausschließlich theoretischer Art. Es wird dabei unterstellt, dass mittels technischer Begrenzung im Fahrzeug keine höheren Geschwindigkeiten als 130 km/h gefahren werden können.

- Die Klassen im Bereich ab 130 km/h werden vollständig auf den Wert 0 reduziert.
- Die Klassen im Bereich bis 130 km/h werden anteilig um die Werte aus dem Bereich über 130 km/h ergänzt. Dies bildet das bereits im Szenario „Höhere Befolgungsrate“ umgesetzte und erläuterte Geschwindigkeitsverhalten ab, wonach sich bei einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch in den Klassen unterhalb des Tempolimits das Geschwindigkeitsverhalten entsprechend verändert.
- Sich durch diese Verschiebungen ergebende „übrige“ Anteile wurden im Szenarien-Histogramm der Klasse „120 – 130 km/h“ (und damit dem Bereich des generellen Tempolimits) zugeordnet. Dies erklärt den entsprechend hohen Anteil dieser Klasse im Szenarien-Histogramm gemäß Abbildung 8.

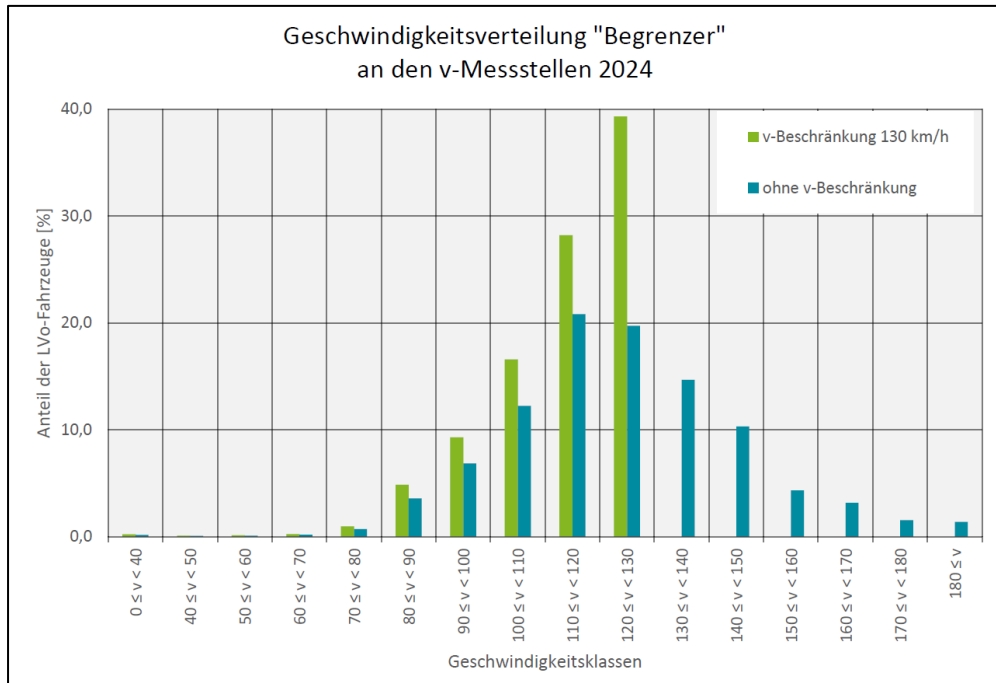


Abbildung 8: Geschwindigkeitsverteilung 2024 im Szenario „Begrenzer“

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Szenarien auf dem Stand der Grunddaten gemäß den Erläuterungen in Kapitel 3 basieren. Systematische, zukünftig weiter zunehmende Einflüsse wie z. B. ein steigender Flottenanteil von Elektrofahrzeugen, eine zunehmende Verbreitung akustischer Geschwindigkeitswarner in Kraftfahrzeugen, steigende Kraftstoffpreise etc. werden durch die Szenarien nicht abgebildet.

3.6 Mittlere Geschwindigkeiten

Aus dem BAST-internen Auswerteprogramm TEMPO liegen für alle 123 richtungsbezogenen DZ aus den realen Messdaten die mittleren Geschwindigkeiten des Leichtverkehrs ohne Anhänger (vm_{LVo}) für das Auswertejahr 2024 vor (siehe Abschnitt 3.2). Die DZ wurden zunächst den einzelnen lokal angeordneten Tempolimits zugeordnet. Die mittleren Geschwindigkeiten je Tempolimit ermitteln sich durch arithmetische Mittelwertbildung aller mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen DZ, die über Deutschland verteilt in Netzbereichen mit jeweiligem Tempolimit erhoben wurden. Die im BAB-Netz vorhandenen Strecken mit Arbeitsstellen wurden separat betrachtet (siehe Abschnitt 3.3). Für den Tempolimitbereich ≤ 60 km/h liegen (innerhalb und außerhalb von Arbeitsstellen) wegen der sehr geringen Streckenlänge auf BAB keine empirischen Werte vor. Daher wurde als Näherung eine mittlere Geschwindigkeit in Höhe von 60 km/h angenommen. Bei den im Status quo vorhandenen Anordnungen einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h handelt es sich im besonderen Maße (nur vergleichsweise wenige Streckenabschnitte sind im aktuellen Netz davon betroffen) um Anordnungen vor einem speziellen situativen Hintergrund (z. B. Geschwindigkeitstrichter im grenznahen Bereich). Die wenigen vorhandenen Geschwindigkeitsdaten von diesem Kollektiv zuzurechnenden DZ liegen zudem teilweise auf unmittelbar aufeinanderfolgenden Streckenabschnitten. Insgesamt bestehen hier grundsätzliche Bedenken hinsichtlich der Repräsentativität

bzgl. der Fragestellung. Es wurde für Tabelle 1 deshalb auf das Szenario „höhere Befolgungsrate“ abgestellt.

Tempolimit [km/h]	Mittlere Geschwindigkeit LVo [km/h]	Anzahl DZ (richtungsbezogen)
60 (Arbeitsstelle)	60,0	-
≤ 60	60,0	-
80 (Arbeitsstelle)	76,1	-
80	85,0	4
100 (Arbeitsstelle)	95,4	-
100	99,7	16
120	112,0	17
130	117,3	Szenario höhere BR
offen	124,1	78

Tabelle 7: Mittlere Geschwindigkeiten des Leichtverkehrs ohne Anhänger je Tempolimit 2024 und Anzahl der eingeflossenen richtungsbezogenen DZ

Tabelle 7 listet die mittleren Geschwindigkeiten je Tempolimit auf. Die jeweils eingeflossene Anzahl an DZ ist ebenfalls aufgeführt.

3.7 Vergleich 2014/2024

Die ermittelten mittleren Geschwindigkeiten 2024 für die geschwindigkeitslimitierten Bereiche weichen signifikant von denen von 2014 [LÖHE 2016] ab:

- Tempolimit 80: -2,4 km/h,
- Tempolimit 100: -3,6 km/h,
- Tempolimit 120: -3,6 km/h und
- ohne Tempolimit -0,6 km/h.

Dies zeigt auch ein direkter Vergleich der 22 DZ, die sowohl 2014 als auch 2024 auswertbare Daten für die Bereiche: Tempolimit 100 km/h, Tempolimit 120 km/h und ohne Tempolimit geliefert haben und bei denen sich die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht geändert hat (Abbildung 9). Die Fallzahl ist hierbei insbesondere für den Bereich ohne Tempolimit mit 15 DZ gut, insgesamt aber mit 22 DZ niedrig. Dennoch ist ein eindeutiger Trend erkennbar: Es wurde im Jahr 2024 auf diesen Abschnitten langsamer gefahren als vor 10 Jahren. Als mögliche Gründe für den Rückgang kommen u. a. systematische Einflüsse wie ein steigender Flottenanteil von Elektrofahrzeugen, steigende Kraftstoffpreise etc. in Frage. Es bleibt abzuwarten, inwieweit die zunehmende Verbreitung der mittlerweile bei Neuwagen gesetzlich vorgeschriebenen akustischen Geschwindigkeitswarner in Kraftfahrzeugen die gefahrenen Geschwindigkeiten in den nächsten Jahren (zumindest in Bereichen mit Tempolimit) beeinflussen wird.

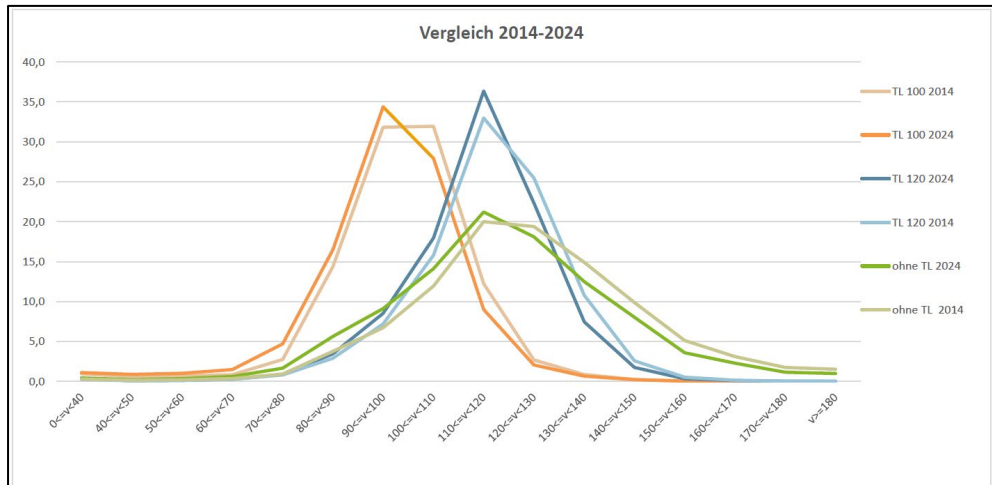


Abbildung 9: Grafische Gegenüberstellung der Mengenverteilung über die Geschwindigkeitsklassen bei Tempolimit 100, 120 und ohne Tempolimit 2014/2024

3.8 Fahrleistungsanteile

Die Ermittlung des Fahrleistungsanteils je Tempolimit am gesamten richtungsbezogenen BAB-Netz erfolgte auf Basis

- der richtungsbezogenen Streckenlänge je Tempolimit sowie
- des jeweiligen gemittelten DTV je Tempolimit.

Die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Netzparameter enthielten für insgesamt 2.004 km Richtungsfahrbahn (dies entspricht 7,6 % der Gesamtlänge aller Richtungsfahrbahnen) keine Angaben zur angeordneten zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Diese Länge wurde daher anteilig auf die Netzlängen mit bekannten Tempolimits aufgeteilt. Tempolimits mit Beschränkung auf einzelne Fahrzeugarten wurden dem Bereich ohne Tempolimit („offen“) zugeordnet, da diese auf die relevanten Fahrzeugkategorien (LVo) keinen Einfluss haben. Situationsbezogene Tempolimits (z. B. bei Nässe) wurden dem Bereich „offen“ zugeordnet, da eine situationsspezifische Differenzierung z. B. nach mittleren Zeitanteilen im Lauf eines Jahres nicht zielführend ist. Gleiches gilt für uhrzeitbezogen angeordnete Tempolimits (z. B. von 22 – 6 Uhr).

Die durchschnittliche Tagesfahrleistung je Tempolimit ist durch Multiplikation der jeweiligen Netzlänge mit der zugehörigen DTV_{LVo} zu ermitteln. In Relation gesetzt zur Summe der Tagesfahrleistungen ergeben sich die jeweiligen Fahrleistungsanteile (siehe Tabelle 8). Eine fahrleistungsbezogene mittlere Geschwindigkeit des gesamten BAB-Netztes wird aus der Summe aller mit dem Fahrleistungsanteil multiplizierten mittleren Geschwindigkeiten je Tempolimit berechnet. Für 2024 wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 114,9 km/h ermittelt. Diese liegt 2,1 km/h unterhalb des für 2014 ermittelten Wertes (-1,8 %).

Tempolimit [km/h]	Mittlere Geschwindigkeit LVo [km/h]	Länge BAB [km]	DTV _{LVo} [Kfz/24h]	Anteil Fahrleistung [%]
60 (Arbeitsstelle)	60,0	48	23.781	0,2
≤ 60	60,0	120	28.043	0,6
80 (Arbeitsstelle)	76,1	2.152	23.781	8,9
80	85,0	699	25.630	3,1
100 (Arbeitsstelle)	95,4	80	23.781	0,3
100	99,7	1.624	23.996	6,8
120	112,0	2.817	23.740	11,6
130	117,3 *	1.234	20.205	4,3
offen	124,1	17.607	21.072	64,3
BAB gesamt	114,9 (fahrleistungsgewichtet)	26.382	---	100,0

*aus Szenario höhere Befolgsrate

Tabelle 8: Mittlere Geschwindigkeiten für LVo und deren Fahrleistungsanteile je Tempolimit 2024

Bei einem Vergleich der Daten nach Tabelle 8 mit den Ergebnissen des Erhebungszeitraums 2010 - 2014 (Tabelle 4 in [LÖHE 2016]) fallen insbesondere hinsichtlich der Fahrleistungen in Arbeitsstellen (+ 4,1 %-Punkte) sowie auf Streckenabschnitten ohne Tempolimit (+ 8,8 %-Punkte) merkliche Verschiebungen auf.

Seit 2014 wurden die Erhaltungsmittel im Bereich des Autobahnnetzes erheblich gesteigert und auch in erheblichem Umfang Maßnahmen im Autobahnnetz umgesetzt. Hierzu zählten insbesondere Ausbaumaßnahmen mit Verbesserung der Linieneinführung und (in den meisten Fällen) wesentliche Kapazitätserweiterungen durch zusätzliche Fahrstreifen. Mit diesen Ausbaumaßnahmen waren aufgrund der damit einhergehenden Verbesserung der Verkehrssicherheit durch die regelwerkskonforme Gestaltung nach dem aktuellen Stand der Technik häufig Aufhebungen vormals bestehender Tempolimits verbunden. Die mit den Ausbaumaßnahmen einhergehenden Kapazitätserweiterungen hatten in vielen Fällen auch Anstiege der Fahrleistungen aufgrund von (Rück-)Verlagerungseffekten aus dem Basisnetz zur Folge. Hinzu kommt, dass seit 2014 mit der Gründung der Autobahn GmbH des Bundes und den damit verbundenen Neustrukturierungen, Bündelungen der Zuständigkeiten und Standardisierungen der Rahmenbedingungen auch Vereinheitlichungen im Hinblick auf ein ganzheitliches Geschwindigkeitsmanagement auf dem Autobahnnetz einhergehen. Das weiterhin hohe Niveau der baulichen Maßnahmen erklärt die Zunahme der Fahrleistungsanteile im Arbeitsstellenbereich.

Anzumerken ist eine kontinuierlich voranschreitende Verbesserung, Vereinheitlichung und Qualitätssicherung der Datenlage. So konnte bezüglich der Arbeitsstellen – anders als in [LÖHE 2016], wo nur vergleichsweise grobe Abschätzungen möglich waren – mit MIA sowie dem VAS [BAST 2024a] auf zuverlässige, im Hinblick auf das Autobahnnetz bundesweit einheitliche, Quellen zurückgegriffen werden.

3.9 CO₂-Emissionsfaktoren aus dem HBEFA

Im Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) werden in Form einer Datenbank-Applikation Kraftstoffverbräuche und die Emissionsfaktoren

verschiedener Schadstoffe von Fahrzeugen aus dem Straßenverkehr bereitgehalten. Die Daten sind anhand von Verkehrssituationen kategorisiert und spezifiziert. Die HBEFA-Verkehrssituationen zeichnen sich durch Einteilungen in Straßenkategorien und Verkehrszustände aus. Zu den Straßenkategorien gehört eine weitere Unterteilung in Gebietstypen (ländlich geprägter Raum und Agglomeration), der Angabe des Straßentyps (z. B. Autobahn, Hauptverkehrsstraßen oder Sammelstraße) und der jeweils geltenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten werden in Klassen von 30 km/h bis 130 km/h in 10 km/h-Schritten und einer weiteren Klasse > 130 km/h, die nicht geschwindigkeitslimitierte Strecken beschreibt, angegeben [NOTTER et al. 2022], [FRIEDRICH et al. 2024]. Die Verkehrszustände beschreiben das Verkehrsaufkommen in nicht quantifizierter Form und werden mit „flüssiger Verkehr“, „dichter Verkehr“, „gesättigter Verkehr“ und Stop&Go-Verkehr („Stop&Go I“ und „Stop&Go II“) bezeichnet.

Als Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren, welche für CO₂ im Wesentlichen auf einer Berechnung des Kraftstoffverbrauchs beruhen, werden Fahrzyklen benötigt. In den Zyklen wird der typische Verlauf einer realen Fahrt abgebildet, indem die Geschwindigkeit über der Zeit dargestellt ist. Jede HBEFA-Verkehrssituation enthält somit einen Fahrzyklus als repräsentatives Abbild des Fahrverhaltens auf einer Straßenkategorie mit dem jeweiligen Verkehrszustand.

Die Verkehrssituationen bilden zusammen mit den Fahrzyklen die Basis, auf der die Emissionen und entsprechende Emissionsfaktoren berechnet werden. Auf eine genauere methodische Beschreibung dieser Berechnung wird an dieser Stelle verzichtet und auf den Abschnitt 3.11 verwiesen. In diesem Kontext ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass die Emissionen fahrzeugspezifisch unterschiedlich ausfallen. Entsprechend hält das HBEFA eine weitere Differenzierung vor, nach der die Fahrzeuge zunächst grob nach sechs Fahrzeugkategorien unterschieden werden (PKW, LNFz, SNFz, Reisebusse, Linienbusse und Kraft- bzw. Motorräder). Innerhalb jeder Kategorie erfolgt eine weitere Unterteilung in Fahrzeugschichten, welche Angaben zur Größe, den verschiedenen Antriebsstrangtechnologien (z. B. Diesel, Benzin), den Schadstoffklassen (z. B. EURO 6-d) und den Emissionsminderungstechnologien enthalten, und für die die Emissionsdaten in diesem Detailierungsgrad vorgehalten werden [NOTTER et al. 2023]. Entsprechend bilden die Verkehrssituationen zusammen mit den Fahrzeugschichten das Grundgerüst für die im HBEFA hinterlegten Emissionsfaktoren. Durch länderspezifische Angaben zur Flottenzusammensetzungen und Fahrleistungen ist es möglich, dass das HBEFA nicht nur spezifische sondern auch aggregierte Emissionsfaktoren ausweisen kann.

Für die vorliegende Studie wurden im HBEFA aggregierte CO₂-Emissionsfaktoren für die Fahrzeugkategorie PKW verwendet (HBEFA 4.2, CO₂ (total), Deutschland, Referenzjahr 2023) [INFRAS 2024]. Dabei wurden die entsprechenden Differenzierungen der Verkehrssituationen beibehalten, sodass ein Bezug zwischen Emissionsfaktor und mittlerer Geschwindigkeit eines in jeder Verkehrssituation hinterlegten Fahrzyklus hergestellt werden konnte. Die CO₂-Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit sind in Abbildung 10 dargestellt. Für die hier relevante Straßenklasse Autobahnen sind im HBEFA insgesamt 35 Einträge vorhanden, wovon 25 tatsächlich auf deutschen BAB vorkommenden Verkehrssituationen entsprechen. Um die Datenlage entsprechend aufzuwerten, wurden auch Emissionsfaktoren von Verkehrssituationen mit autobahnähnlichen Straßentypen dem Kollektiv hinzugefügt. Ihre Emissionsdaten lieferten einen wertvollen Beitrag für die spätere

Regression. Neben dem Straßentyp „Autobahn“ wurden autobahnähnliche Straßen („Motorway-National“ und „Semi-Motorway“), „Fern- und Bundesstraßen“ und „Hauptverkehrsstraßen“ (hier: kurvenarme Streckenverläufe) im weiteren Verlauf genutzt.

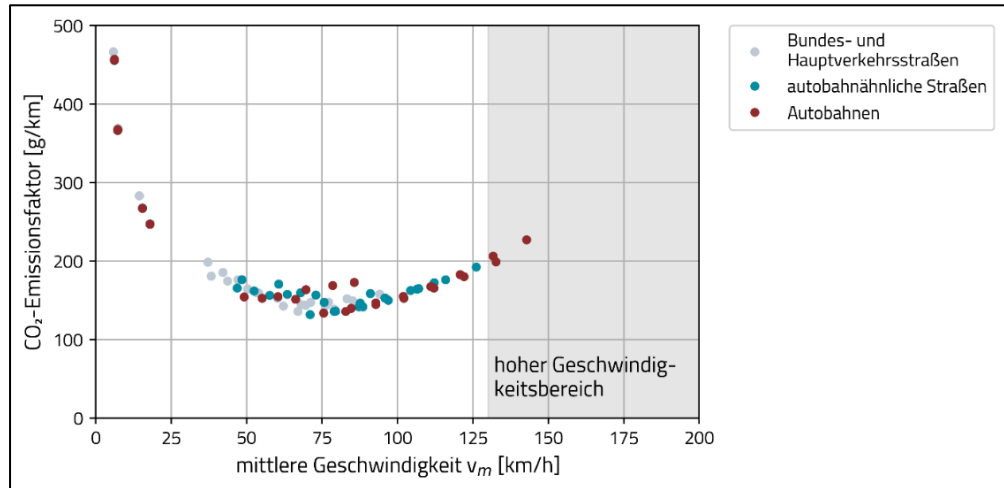


Abbildung 10: CO₂-Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.2 für PKW

Die Emissionsfaktoren verschiedener Straßentypen (Ref. Jahr 2023, Steigungsklasse 0%) [INFRAS 2024] sowie der Geschwindigkeitsbereich > 130 km/h sind hervorgehoben.

Der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass die Emissionsfaktoren im HBEFA zusätzlich nach Steigungsklassen differenziert werden, sodass weitere spezifische Betrachtungen mit den Datensätzen grundsätzlich möglich sind. Aufgrund der nicht hinreichenden Aufteilung der Fahrleistung auf die Steigungsklassen im Zusammenhang mit den betrachteten bestehenden Tempolimits² (siehe Tabelle 8) wurden in dieser Studie ausschließlich die Emissionsfaktoren für die HBEFA-Steigungsklasse $\text{grad}=0\%$ verwendet. Diese Annahme konnte gerechtfertigter Weise getroffen werden, da im Kontext der angewendeten Methode – die später noch genauer beschrieben wird – die Verhältnisse der Emissionsfaktoren unterschiedlicher Geschwindigkeiten und nicht die absoluten Werte an sich maßgebend sind.

3.10 Fahrzyklen

Wie in der Abbildung 10 zu erkennen ist, liefert das HBEFA nur wenige CO₂-Emissionsfaktoren im hohen Geschwindigkeitsbereich über 130 km/h. Dabei liegt die maximal vorhandene mittlere Geschwindigkeit bei nur $v_m = 142,7$ km/h, sodass der höhere Geschwindigkeitsbereich bis zu 200 km/h gar nicht abgedeckt ist. CO₂-Emissionsfaktoren, die diesen Bereich beschreiben, werden aber für die in diesem Bericht durchgeführten Berechnungen benötigt. Damit ist die Notwendigkeit gegeben, in einem Zwischenschritt zunächst entsprechende Fahrzyklen in diesem Bereich zu generieren, die dann in einem weiteren Schritt Eingang in die Simulationsrechnung der Emissionsfaktoren finden (siehe Abschnitt 3.11). Für diese Studie wurden

² Gemeint sind die Tempolimitbereiche, inklusive „offen“, aus Tabelle 8, und nicht das generelle Tempolimit.

Fahrzyklen für den hohen Geschwindigkeitsbereich nach zwei Methoden erstellt, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Fahrzyklen werden bereits seit Jahrzehnten im Rahmen von Verbrauchs- und Abgasmessungen genutzt. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist der Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) als Basis für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen in Europa [TUTUIANU et al. 2013]. Die Nutzung des WLTC ist jedoch in diesem Kontext nicht weiter zielführend, da die hohen Geschwindigkeiten des WLTC nur im Bereich von 105-131 km/h [TUTUIANU et al. 2013] liegen und damit im Vergleich zu den Fahrzyklen mit höheren Geschwindigkeiten aus dem HBEFA deutlich langsamer sind. Gleichwohl bildet die WLTP-Datenbank die Möglichkeit, aus den hinterlegten Fahrprofilen Bereiche mit hohen Geschwindigkeiten zu identifizieren und zu einem neuen Zyklus im hohen Geschwindigkeitsbereich zu vereinen.

Teilzyklus	Zeitdauer	Distanz	v_min	v_m	v_max	a_pos_avg	RPA
	[s]	[m]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[m/s ²]	[m/s ²]
#1	643	19.684	88,6	110,2	124,6	0,26	0,0782
#2	710	24.456	92,4	124,0	131,1	0,36	0,0269
#3	521	18.007	93,5	124,4	158,5	0,38	0,1801
#4	502	19.408	99,9	139,2	176,3	0,39	0,1765
#5	596	23.236	87,0	140,4	177,6	0,44	0,2498
#6	521	20.484	110,0	141,5	157,2	0,30	0,0948
#7	487	20.424	132,9	151,0	162,5	0,21	0,0486
#8	768	32.345	105,7	151,6	185,9	0,31	0,1499
#9	781	34.546	147,0	159,2	184,0	0,23	0,0510
#10	478	21.098	98,3	158,9	206,2	0,90	0,4115
#11	473	23.582	129,5	179,5	197,6	0,25	0,0878
#12	466	23.127	78,6	178,7	237,7	0,76	0,4096

Tabelle 9: Zyklus im hohen Geschwindigkeitsbereich aus WLTP-Datenbank aufgeteilt in zwölf Teilzyklen.

Einstufung nach Fahrverhalten mit rot: dynamisches Fahrverhalten und blau: weniger dynamisches Fahrverhalten [STEVEN 2024].

Nach diesem Prinzip wurde ein Zyklus aufgebaut, der zwölf Teilzyklen beinhaltet, die zwischen 7 bis 13 Minuten andauern und mittlere Geschwindigkeiten im Bereich von 110 bis 179 km/h abbilden (siehe Tabelle 9). Die relative positive Beschleunigung ($RPA = \text{Summe aller } v \cdot a_{\text{pos}} / \text{Distanz für alle } a_{\text{pos}} > 0,1 \text{ m/s}^2$) gilt als Maß zur Beurteilung der Fahrdynamik, sodass der Zyklus insgesamt aus sechs als dynamische Fahrten (rot) und sechs als weniger dynamische Teilfahrten (blau) klassifiziert zusammengesetzt wurde. Diese Auswahl ermöglicht das Aufspannen eines Dynamikbereichs, welcher in Hinblick auf die Emissionsberechnung differenziert betrachtet werden kann. Der aufgebaute Fahrzyklus ist in Abbildung 11 dargestellt.

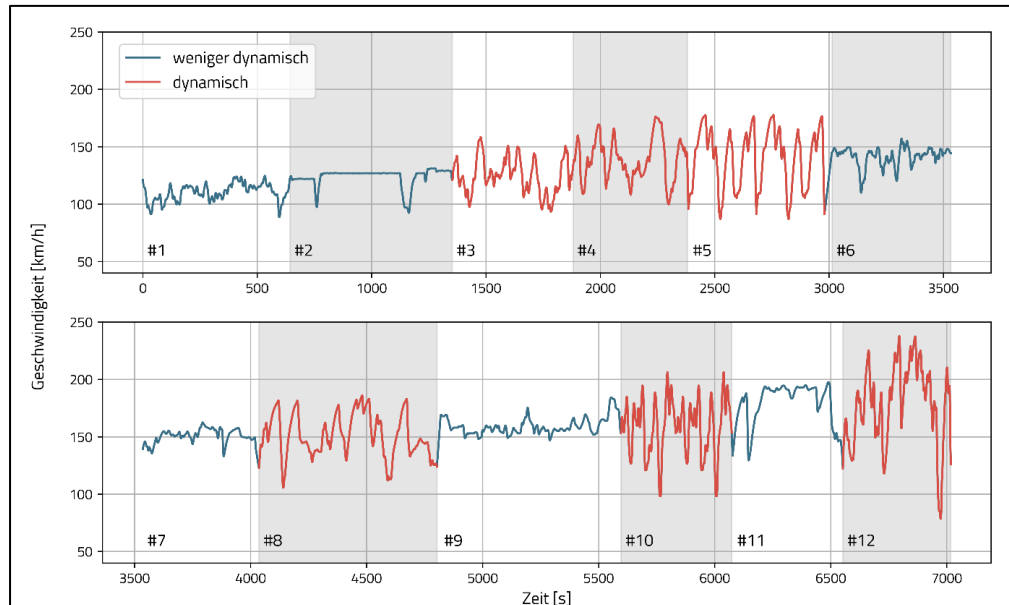


Abbildung 11: Zyklus im hohen Geschwindigkeitsbereich aus WLTP-Datenbank aufgeteilt in zwölf Teilzyklen mit Einstufen nach dynamischen (rot) und weniger dynamischem Fahrverhalten (blau) nach [STEVEN 2024].

Wie den RPA-Werten und der Abbildung 11 entnommen werden kann, weisen die Teilzyklen #10 und #12 hohe Dynamiken auf. Aufgrund der angestrebten differenzierten Betrachtung des Dynamikbereichs wurden alle Zyklen im Rahmen dieser Studie mit berücksichtigt.

Als zweite Methode, die Fahrzyklen für den hohen Geschwindigkeitsbereich zu erstellen, wurden reale Fahrten auf BAB beim KBA durchgeführt und messtechnisch begleitet. Neben der Einhaltung der StVO und unter Minimierung des Risikos für Mensch und Maschine war die maßgebende Vorgabe für die Messfahrer, einen möglichst langen, geschwindigkeitsunlimitierten Autobahnabschnitt im hohen Geschwindigkeitsbereich zu befahren. Auch wenn eine breit angelegte Testreihe aus Zeit- und Witterungsgründen nicht möglich war, konnte mit Unterstützung des KBA eine Reihe von Testfahrten mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrern in wiederholter Weise durchgeführt werden. Geeignete Testbedingungen fanden sich auf der BAB 7 zwischen den Anschlussstellen Flensburg / Harrislee (2) und Quickborn (21).

Mit beiden Fahrzeugen (je ein Diesel- und Benzinfahrzeug der Mittelklasse) wurden zehn Fahrten durchgeführt, wobei je Hin- und Rückweg messtechnisch aufgezeichnet und die Daten jeweils als separate Datensätze abgelegt wurden. Neben den Geschwindigkeitsdaten wurden weitere Informationen zur GPS-Höhe und dem momentanen Kraftstoffverbrauch des jeweiligen Fahrzeugs aufgezeichnet. Insgesamt entstanden dadurch 40 Datensätze, aus denen kürzere Analyseabschnitte ausgewählt wurden (siehe beispielhaft Abbildung 12). Dabei erfolgte die Auswahl derart, dass der Bereich hohe Geschwindigkeiten beinhaltet und ein augenscheinlich homogenes Fahrverhalten zeigt. Zudem wurden Randbedingungen gesetzt, dass erstens Start- und Endgeschwindigkeit gleich sind und zweitens der Höhenunterschied möglichst geringgehalten wird. Aufgrund der allgemein geringen Höhenänderung

auf dem Streckenabschnitt wurde der Einfluss der zweiten Randbedingung auf das zu erwartende CO₂-Ergebnis als vernachlässigbar klein eingestuft.

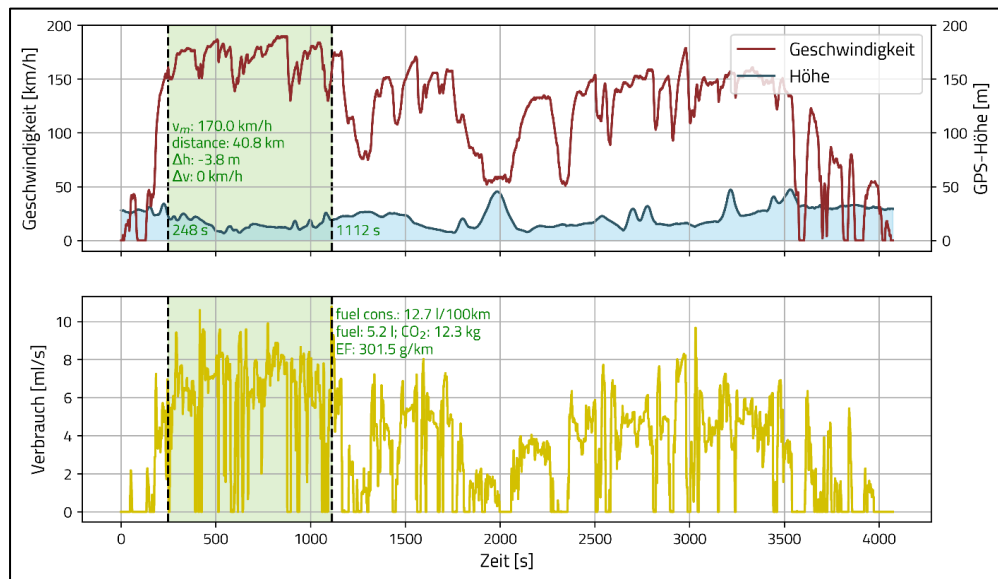


Abbildung 12: Beispiel einer Messfahrt auf der Strecke BAB 7 zwischen hier Quickborn und Flensburg. Im oberen Diagramm ist der Analyseabschnitt markiert, welcher als Teilzyklus verwendet wird. Im unteren Diagramm ist der momentane Kraftstoffverbrauch abgebildet (hier: Benzin, Mittelklasse).

In der Abbildung 12 ist neben dem Geschwindigkeits- und Höhenprofil der momentane Kraftstoffverbrauch gezeigt, sowie beispielhaft die Auswahl eines Analyseabschnitts. Insgesamt konnten 43 solcher Analyseabschnitte aus den Daten gewonnen werden, welche eine Zeitdauer zwischen 5 und 24 Minuten und eine Streckenlänge zwischen 15 und 55 km aufweisen. Die RPA lag im Bereich von 0,032 bis maximal 1,845 m/s² und ist damit im Vergleich zu den WLTP-Teilzyklen eher im Bereich des weniger bis leicht dynamischen Fahrverhaltens einzuordnen. Hierunter sind die Anteile an starken bzw. weniger starken Beschleunigungen und Abbremsungen und wie schnell sie umgesetzt werden zu verstehen. Umgekehrt heißt das, eine Konstantfahrt hat keine Dynamik. Aus dem momentanen Kraftstoffverbrauch konnte integrativ der absolute Verbrauch ermittelt und zusammen mit der Distanz zu einem technischen Emissionsfaktor verrechnet werden³, welcher zur Überprüfung der im weiteren Schritt simulierten CO₂-Emissionsfaktoren herangezogen wurde.

Aufgrund der zuvor genannten Randbedingungen waren die Geschwindigkeitsprofile in direkter Weise als separate Fahrzyklen für die anschließende Emissionsberechnung zu gebrauchen. Zusammen mit den 12 Teilzyklen aus der WLTP-Datenbank ergibt das eine Anzahl von 55 Teilzyklen im hohen Geschwindigkeitsbereich, die für diese Untersuchung benutzt werden konnten.

³ mit Umrechnungsfaktor für Benzin: 2,37 kg_{CO2}/l nach [IFEU 2024], [ALLEKOTTE et al. 2024]

3.11 Simulation der CO₂-Emissionsfaktoren mit PHEM

Die Software PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) ist ein Detailmodell zur Simulation von einzelnen Fahrzeugen oder Fahrzeugflotten. PHEM wurde in den späten 1990er Jahren am IVT der TU Graz entwickelt und gilt inzwischen als ein etabliertes Werkzeug zur Berechnung von Emissionen von Straßenfahrzeugen [HAUSBERGER o. J.].

Mit der Software PHEM werden Kraftstoffverbräuche und Emissionen durch simulierte Fahrten in 1 Hz Auflösung ermittelt. PHEM basiert auf den Grundlagen der Fahrzeuglängsdynamik, womit die Motordrehzahl und folglich auch die Motorleistung berechnet werden können. Anhand entsprechender Emissionskennfelder und unter Berücksichtigung vorliegender Fahrzyklen ist es möglich, Emissionen verschiedener Schadstoffe und von CO₂ rechnerisch zu bestimmen. Der für die korrekte Abbildung des Fahrzyklus erforderliche Leistungsbedarf wird aus den im Programm hinterlegten Daten zu den entsprechenden Fahrwiderständen, Verlusten in der Übertragungsleitung und dem Hilfsleistungsbedarf (z. B. elektrifizierte Antriebsstränge) des zu betrachtenden Fahrzeugs ermittelt. Abhängig von der Fahrzeugtechnologie werden Einflüsse wie beispielsweise durch Abgasnachbehandlungssysteme und transiente Effekte ebenfalls berücksichtigt.

Da das Fahrzeuglängsdynamikmodell die Motorleistung und die tatsächliche Geschwindigkeit aus physikalischen Zusammenhängen berechnet, kann jeder Fahrzustand mit diesem Ansatz abgebildet werden. PHEM stellt zudem das Bindeglied zwischen den im HBEFA hinterlegten Fahrzyklen und den berechneten Emissionsfaktoren dar. Entsprechend sind generische Durchschnittsfahrzeuge nach dem HBEFA-Datensatz für alle relevanten Fahrzeugkategorien, Antriebsarten und Schadstoffklassen schon vorinstalliert, sodass sich aus den berechneten Emissionsfaktoren bei gleichzeitiger Kenntnis der Flottenzusammensetzung gewichtete Emissionsfaktoren erstellen lassen.

Für die vorliegende Berechnung sind die Durchschnittsfahrzeuge nach dem aktuellen HBEFA-Datensatz erstellt worden, welcher in der momentan laufenden Programmaktualisierung zukünftig unter der HBEFA-Version 5.1 zugrunde gelegt sein wird. Für die Beschreibung der Flottenzusammensetzung wurden die Fahrleistungsanteile auf deutschen BAB aus der letzten TREMOD Aktualisierung 6.61 [IFEU 2024] abgefragt (Real-Szenario für das Jahr 2023) und für die Berechnung herangezogen.

Für die zuvor genannten 55 Teilzyklen sind seitens der TU Graz die CO₂-Emissionsfaktoren für jede Fahrzeugschicht gemäß des dafür repräsentativen Durchschnittsfahrzeugs mit PHEM berechnet worden. In einem zweiten Schritt wurden die spezifischen Emissionsfaktoren anhand der Fahrleistungsanteile der Fahrzeugschichten auf Autobahnen zu einem CO₂-Emissionsfaktor pro Zyklus gewichtet aggregiert. Ebenso wurden Berechnungen mit den HBEFA-Fahrzyklen für Autobahnen und autobahnähnlichen Straßentypen mit $v_m > 90$ km/h durchgeführt, um einen Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.2 ziehen zu können.

3.11.1 Vergleich der Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.2 mit Neuberechnung unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrleistungs- und Flottenzusammensetzung aus TREMOD 6.61

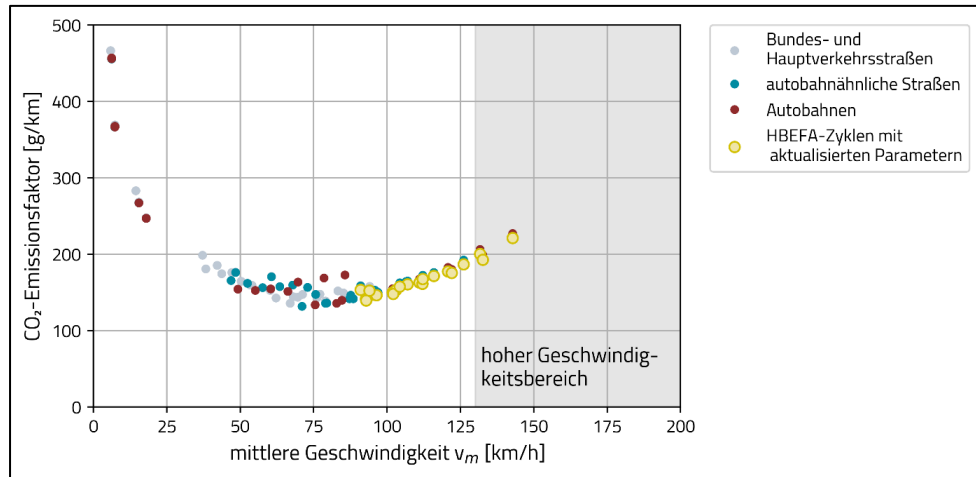


Abbildung 13: CO₂-Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.2 mit neu berechneten Emissionsfaktoren für einige HBEFA-Fahrzyklen mit $v_m > 90$ km/h

Die Emissionsfaktoren verschiedener Straßentypen (Ref. Jahr 2023, Steigungsklasse 0%) [INFRAS 2024] sowie der Geschwindigkeitsbereich > 130 km/h sind hervorgehoben. Die zusätzlich eingezeichneten neu berechneten Emissionsfaktoren für einige HBEFA-Fahrzyklen mit $v_m > 90$ km/h basieren auf aktualisierten Fahrleistungs- und Flottendaten.

Wie in Abbildung 13 dargestellt ist, sind die Emissionsfaktoren, welche unter Berücksichtigung der aktuellen Durchschnittsfahrzeuge und der Fahrleistungsanteile auf BAB erstellt wurden, vergleichbar den Werten aus dem HBEFA 4.2. Sie sind geringfügig niedriger, was sich aufgrund der Berücksichtigung von neueren und effizienteren Fahrzeugen erklären lässt.

3.11.2 Emissionsfaktoren auf Basis der Zyklen aus der WLTP-Datenbank

Die Emissionsfaktoren, welche auf Basis der Fahrzyklen aus der WLTP-Datenbank erstellt wurden, sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Datenpunkte wurden hinsichtlich der Fahrweise in dynamisch und weniger dynamisch (vgl. Abschnitt 3.10) differenziert aufgeführt.

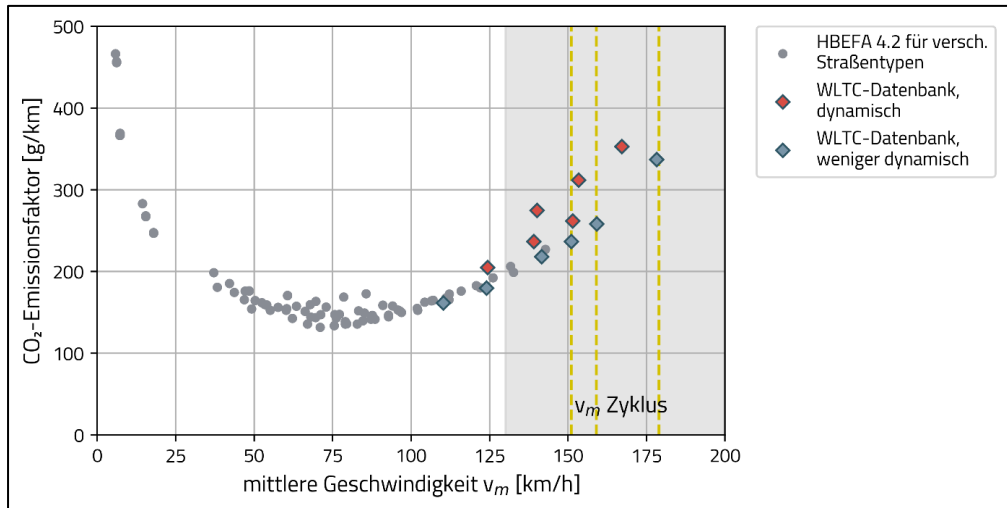


Abbildung 14: CO₂-Emissionsfaktoren (PKW) aus der Literatur und auf Basis der WLTP-Fahrzyklen bei hohen Geschwindigkeiten

Die gelben Linien zeigen die zu erwartenden mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzyklen.

Die gelben Linien zeigen die mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzyklen für die drei höchsten mittleren Geschwindigkeiten (siehe Tabelle 9). Zu erwarten wäre hier, dass die Emissionsfaktoren beider Fahrweisen auch diesen Geschwindigkeiten zugeordnet werden können. Die Werte für dynamische Fahrweisen weichen jedoch davon ab und sind kleineren Geschwindigkeiten zugeordnet (siehe Abbildung 14, die drei höchsten Punkte). Der Grund dieser Abweichung liegt darin, dass die Durchschnittsfahrzeuge der berücksichtigten Fahrzeugflotte nicht alle in der Lage sind, diese Fahrdynamik zu reproduzieren. Das bedeutet, dass die Zyklen als hochdynamisch eingestuft und nur von Fahrzeugen mit entsprechend leistungsfähiger Motorisierung abgebildet werden können.

3.11.3 Emissionsfaktoren auf Basis eigener Fahrzyklen und Messdaten

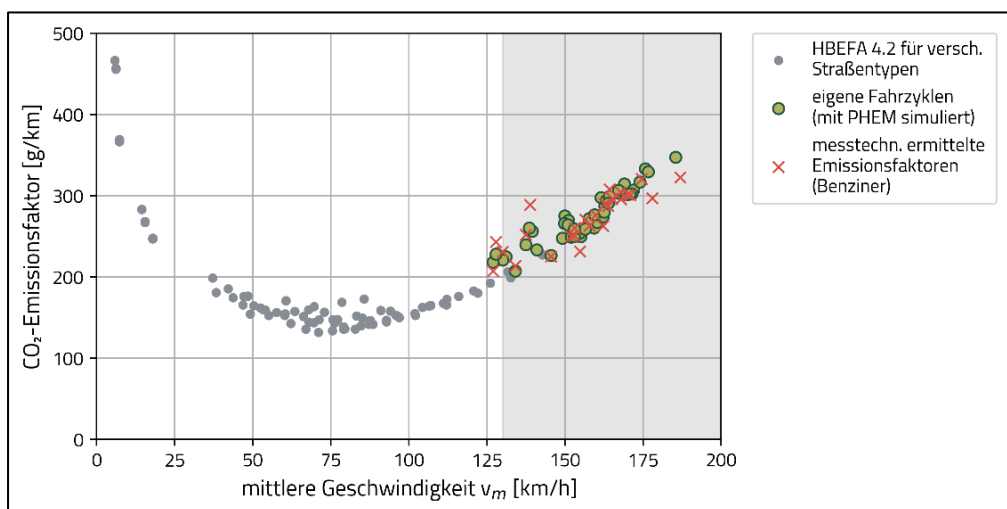


Abbildung 15: CO₂-Emissionsfaktoren (PKW) aus der Literatur und auf Basis eigener Fahrzyklen bei hohen Geschwindigkeiten

In Abbildung 15 sind die mit PHEM simulierten Emissionsfaktoren auf Basis der eigenen gemessenen Fahrzyklen (KBA-Messfahrten) im hohen Geschwindigkeitsbereich dargestellt. Hier zeigt sich im Vergleich zu den Literaturwerten ein augenscheinlich stetiger Übergang und ein Anstieg der Emissionswerte für höhere Geschwindigkeiten. Im Bereich der Geschwindigkeiten zwischen 120 und 160 km/h zeigt sich eine leichte Streuung der Werte, da die ausgewählten Zyklen in diesem Bereich auch eine unterschiedliche Dynamik aufweisen. Zur Plausibilisierung der Emissionsfaktoren wurden beispielhaft die auf Basis des messtechnisch aufgezeichneten momentanen Verbrauchs berechneten Emissionsfaktoren für das Benzin-Fahrzeug dargestellt. Trotz größerer Streuung zeigt sich hier eine gute Übereinstimmung.

Auf die Verwendung der neu erstellten CO₂-Emissionsfaktoren für die Berechnung der Wirkung eines generellen Tempolimits von 130 km/h wird im nächsten Kapitel eingegangen.

4 Berechnung von CO₂-Emissionen

4.1 Grundlegende Berechnung

Als grundlegende Eingangsgrößen zur Beantwortung der Frage werden die Verteilung der Geschwindigkeiten (siehe Abschnitt 3.5), die Fahrleistung und deren Verteilung (siehe Abschnitt 3.8) sowie der streckenbezogene Kraftstoffverbrauch der betrachteten Fahrzeuge (Emissionsfaktoren) benötigt.

4.1.1 Geschwindigkeitsabhängigkeit der CO₂-Emissionsfaktoren

Der Energiebedarf steigt mit zunehmender Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Dies ist in erster Linie auf den Luftwiderstand zurückzuführen, der quadratisch von der gefahrenen Geschwindigkeit abhängt [BOSCH 2024]. Bei hohen Geschwindigkeiten ist somit ein hoher Luftwiderstand zu überwinden und folglich ein erhöhter Energiebedarf zu verzeichnen. Darüber hinaus steht der Energiebedarf bei Kfz mit Verbrennungsmotor in einem direkten Verhältnis zu den CO₂-Emissionen: Je mehr Energie benötigt wird, desto mehr CO₂-Emissionen entstehen.

Das CO₂-Einsparungspotential eines generelles Tempolimits von 130 km/h auf deutschen Autobahnen ergibt sich also durch die damit verbundenen Verlagerungen der Fahrleistungsanteile aus hohen in niedrigere Geschwindigkeitsbereiche.

Für diese modellhafte Betrachtung der Umlagerung von Fahrleistungsanteilen ist die Abhängigkeit der CO₂-Emissionsfaktoren von der Geschwindigkeit – insbesondere für höhere Geschwindigkeiten – geeignet funktional zu beschreiben. Dazu wurden sowohl alle neu ermittelten, als auch die aus der Literatur (HBEFA 4.2 und Neuberechnung (zukünftig HBEFA 5.1)) entnommenen Emissionsfaktoren mit einem polynomischen Fit zweiten Grades modelliert,

$$f(x) = a * x^2 + b * x + c,$$

wodurch die quadratische Abhängigkeit des Luftwiderstandes abgebildet wird. Alle Emissionsfaktoren, wie sie im Kapitel zuvor eingeführt wurden und simulativ auf PHEM beruhen, wurden ab einer mittleren Geschwindigkeit von 60 km/h berücksichtigt. Die Modellierung ist in Abbildung 16 gezeigt und wird nachfolgend als „Best-Fit“ bezeichnet.

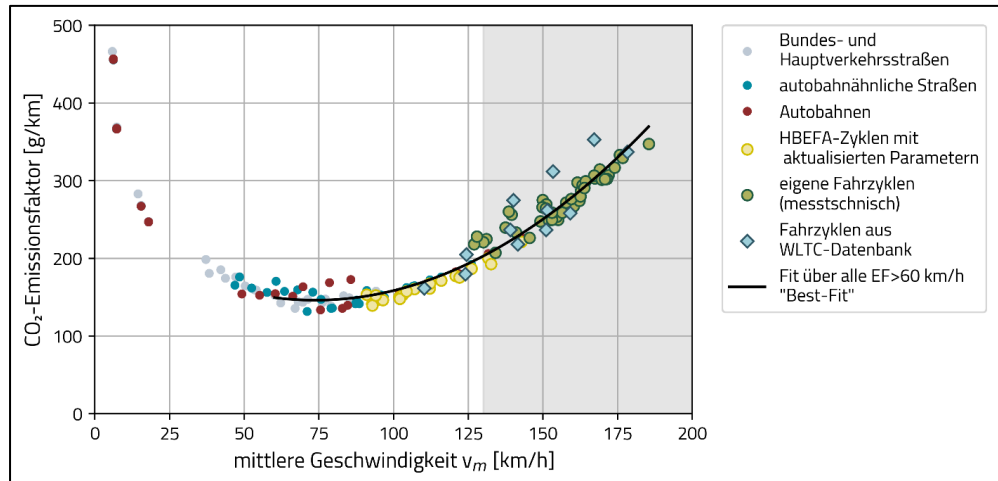


Abbildung 16: CO₂-Emissionsfaktoren aus verschiedenen Simulationen mit PHEM und der Modellierung mit einem Polynom zweiten Grades

Fitparameter: $a = 0,0179$, $b = -2,6414$ und $c = 243,5252$ („Best-Fit“).

4.1.2 Dynamischer Fall: Stärkere Berücksichtigung extrem dynamischer Fahrweisen – „Fit dynamisch“

In dem vorherigen Kapitel hat sich gezeigt, dass die Emissionsfaktoren für höhere Geschwindigkeiten aufgrund unterschiedlicher Fahrdynamiken der Fahrzyklen stärker streuen. Die extremsten Werte werden dabei von den dynamischen Emissionsfaktoren auf Basis der WLTP-Datenbank erreicht. Um diesen Betrachtungsfall zur Modellierung eines hypothetischen Extremszenarios ebenfalls abzubilden, werden für eine weitere Modellierung einzig diese Datenpunkte angefitet und die Datenpunkte der weniger dynamischen Fahrten sowie denen aus eigenen Realfahrten ausgeblendet, d. h. dass nur die Fahrzyklen im hohen Geschwindigkeitsbereich verwendet wurden, die durch starke Beschleunigungs- und Bremsvorgänge charakterisiert sind. Die aus HBEFA auf Basis aktualisierter Flottenzusammensetzung neu berechneten Emissionsfaktoren werden aufgrund der Erzeugung eines möglichst stetigen Übergangs zur Kurve des „Best-Fits“ ab Geschwindigkeiten von 90 km/h mitberücksichtigt. Das Fitergebnis ist in Abbildung 17 zu sehen. Wie zu erwarten, verläuft die Kurve steiler und bildet damit eine obere Abschätzung für diesen Bereich der Emissionsfaktoren ab.

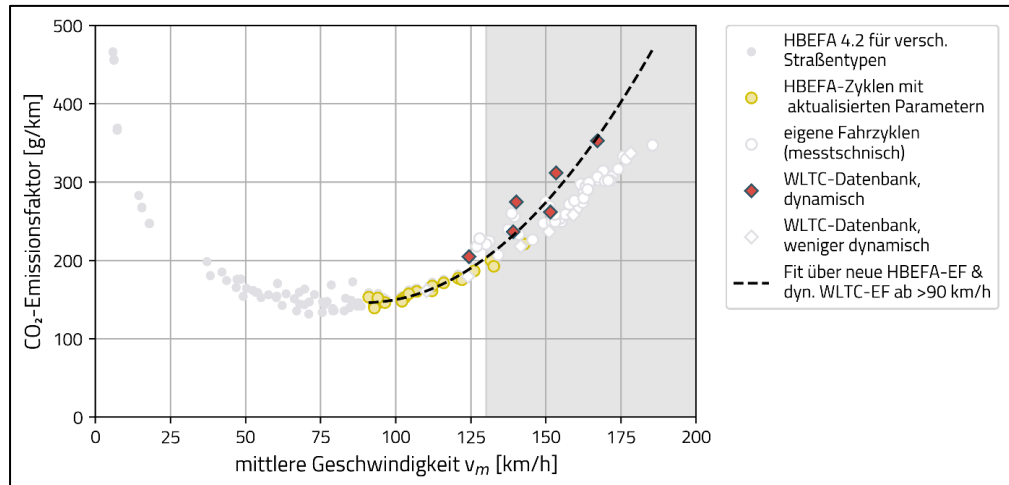


Abbildung 17: CO₂-Emissionsfaktoren aus verschiedenen Simulationen mit PHEM und der Modellierung mit einem Polynom zweiten Grades unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren für dynamische Fahrweisen („Fit dynamisch“)

Fitparameter: $a = 0,0352$, $b = -6,3130$ und $c = 429,3417$. Für den Fit wurden nur die farbig markierten Datenpunkte verwendet.

4.2 Grundlegende Berechnungsmethode für die CO₂-Ersparnis durch ein generelles Tempolimit

Die hier umgesetzte Berechnungsmethode zur Ermittlung der CO₂-Ersparnis durch ein generelles Tempolimit ist an Lange et al. [LANGE et al. 2020] angelehnt und kann im Wesentlichen auf zwei Rechenschritte reduziert beschrieben werden. Dabei wird an unterschiedlichen Stellen auf die – wie im vorherigen Kapitel schon erwähnt – zentralen Eingangsgrößen „Geschwindigkeitsverteilungen auf Bundesautobahnen für Abschnitte ohne und mit Tempolimit“ (siehe Abschnitt 3.5), „Fahrleistungsanteile in Abhängigkeit vom jeweils herrschenden Tempolimit“ (siehe Abschnitt 3.8) und auf die modellierten „CO₂-Emissionsfaktoren“ (siehe Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2) zurückgegriffen.

4.2.1 Erstellung der Ausgangssituation / Ist-Zustand

Für die in Tabelle 8 nach bestehenden Tempolimits² aufgelisteten Fahrleistungsanteile auf BAB lassen sich anhand der mittleren Geschwindigkeiten für jedes Tempolimit Emissionsfaktoren berechnen. Dazu wurde im Bereich von 60 km/h bis offen (hier: $v_m = 124,7$ km/h) das Modell mit den Fitparametern des „Best-Fits“ zugrunde gelegt.

Mittels der berechneten Emissionsfaktoren und Fahrleistungsanteile lassen sich nun die gesamten jährlichen CO₂-Emissionen auf Autobahnen auf die einzelnen Tempolimits aufteilen: In diesem Fall wurden als Eckwert ausschließlich die Emissionen für die hier relevanten Fahrzeugkategorien genutzt, welche die der PKW und LNFz sind (der Beitrag von motorisierten Zweiräder ist vernachlässigbar; für Fahrzeuge anderer Kategorien gilt auf BAB und ähnlichen Straßen ohnehin eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von deutlich unter 130 km/h).

Dieser Eckwert wurde durch das Emissionsberechnungsmodell „TREMODO“ (Transport Emission Model) berechnet und in der vorliegenden Studie verwendet.

TREMOD wird zur Beantwortung von nationalen emissions- und verbrauchsspezifischen Fragestellungen im Straßenverkehr seit Jahrzehnten in Deutschland eingesetzt [ALLEKOTTE et al. 2024]. Es bildet sämtliche Emissionen verschiedener Verkehrsträger (Straßen-, Luft-, Bahnverkehr und Binnenschifffahrt) nach Verursachern, nach Ortslage, Straßenkategorien ab und stellt diese im zeitlichen Verlauf dar, sodass beispielsweise mittels Prognosen der Einfluss von technologischen Fortschritten bewertet werden kann. TREMOD berücksichtigt die Anforderungen an die Richtlinien zur Emissionsberichterstattung der Europäischen Kommission und ist durch kontinuierliche Fort- und Weiterentwicklung zu einem Standard auf dem Gebiet der Emissionsberechnungen geworden. Für den Bereich Straßenverkehr greift TREMOD unter anderem auf die auf europäischer Ebene abgestimmten Eingangsdaten aus dem HBEFA zurück.

Als Grundlage für die Berechnung in dieser Studie wurden die letzten aktuellen Daten aus dem Real-Szenario von TREMOD (Version 6.61) verwendet, welche das Bezugsjahr 2023 wiedergeben. Die gesamten CO₂-Emissionen beliefen sich auf 38,7 Mio. t CO₂ für PKW und LNFz auf Bundesautobahnen [IFEU 2024]. In Tabelle 10 sind die Zwischenergebnisse entsprechend ergänzt dargestellt. Für die folgende Berechnung der CO₂-Ersparnis ist der Fahrleistungsanteil bzw. sind die Emissionen, die in „offen“ erbracht werden (26,4 Mio.t), entscheidend.

Tempolimit	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	Anteil der Fahrleistung [%]	CO ₂ -Emissionsfaktor [g/km]	CO ₂ -Emissionen absolut [Mio. t]
60 (Arbeitsstelle)	60,0	0,2	149,5	0,1
≤ 60	60,0	0,6	149,5	0,2
80 (Arbeitsstelle)	76,1	8,9	146,3	2,8
80	85,0	3,1	148,5	1,0
100 (Arbeitsstelle)	95,4	0,3	154,6	0,1
100	99,7	6,8	158,3	2,3
120	112,0	11,6	172,4	4,3
130	117,3	4,3	180,3	1,7
offen	124,1	64,3	191,7	26,4

Tabelle 10: Verteilung der absoluten CO₂-Emissionen für PKW und LNFz auf BAB auf die vorhandenen Tempolimits nach Gewichtung von Fahrleistungsanteilen und Emissionsfaktoren.

4.2.2 Umlagerung der Fahrleistung unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilungen

Für die Umlagerung der Fahrleistungsanteile sind die Geschwindigkeitsverteilungen (Histogramme) der entsprechenden Tempolimits² heranzuziehen.

Ausgangsbasis ist jeweils das Histogramm für „offen“. Die zugehörige Fahrleistung verteilt sich gemäß dem Histogramm anteilig auf die einzelnen Geschwindigkeitsklassen. Aus der Fit-Funktion der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit lässt sich jeder Geschwindigkeitsklasse (und damit dem Fahrleistungsanteil in der Geschwindigkeitsklasse) eindeutig ein Emissionsfaktor zuordnen, mit dem der zugehörige Anteil der CO₂-Emissionen bestimmt werden kann. Die

absoluten CO₂-Emissionen je Geschwindigkeitsklasse können dann mit Hilfe der gesamten CO₂-Emissionen von „offen“ aus Tabelle 10 berechnet werden.

Zur Berechnung der CO₂-Ersparnis durch ein generelles Tempolimit erfolgt eine Umlagerung der Fahrleistungsanteile je Geschwindigkeitsklasse. Die Verteilung entspricht dann nicht mehr dem Histogramm „offen“, sondern einer der Verteilungen, wie sie für die verschiedenen Szenarien mit generellem Tempolimit 130 km/h (niedrigere Befolgung, höhere Befolgung, Begrenzer) modelliert wurden. Der Berechnungsschritt ist für jedes der beschriebenen Szenarien durchzuführen. Es ändern sich damit die Produkte aus Emissionsfaktor und Fahrleistungsanteil und zwar in Summe in Richtung niedrigerer CO₂-Emissionen, da vom Wert her kleinere Emissionsfaktoren aus der Fit-Funktion stärker ins Gewicht fallen. Die potentielle CO₂-Ersparnis errechnet sich dann als Differenz der CO₂-Emissionen zwischen Ausgangssituation und jeweiligem Szenario.

Anzumerken ist, dass für die Berechnung des hypothetischen Extremszenarios „Begrenzer“ nicht die „Best-Fit“-Funktion für die Emissionsfaktoren verwendet wurde, sondern die Funktion „Fit – dynamisch“, um eine obere Abschätzung für die CO₂-Ersparnis bestimmen zu können. Insbesondere für die höheren Geschwindigkeiten (vor allem jenseits der 130 km/h) ist hier die Kurve der Emissionsfaktoren zu höheren Werten hin verschoben, so dass sich eine Umlagerung der Fahrleistungsanteile in niedrigere Geschwindigkeitsklassen mit kleinerem Emissionsfaktor stärker auswirkt. Sowohl aufgrund des modellierten Histogramms als auch aufgrund der Verwendung der Emissionsfaktoren für stärker dynamisches Fahren ergibt sich demzufolge im Szenario Begrenzer ein nur hypothetisch erreichbares „maximales“ Einsparpotenzial, bei welchem das Vergleichsszenario im Ist-Zustand auf nicht den Normalfall in Deutschland abbildenden sehr dynamischen Fahrweisen beruht.

Die einzelnen Ergebnisse der möglichen CO₂-Einsparungen werden im folgenden Kapitel dargestellt und entsprechend eingeordnet.

5 Ergebnisse, Sensitivitäten

5.1 Ergebnisse

In den vorherigen Kapiteln wurde ausführlich dargestellt, welche Eingangsgrößen für diese Untersuchung betrachtet werden und wie sie im Einzelnen ermittelt worden sind. Entscheidend für die Berechnung des CO₂-Einsparpotenzials sind

- die Verteilung der Fahrleistungsanteile auf BAB differenziert nach bestehendem Tempolimit
- die Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten auf BAB für die Fälle „kein bestehendes Tempolimit“ und „Tempolimit von 130 km/h“
- der funktionale Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionsfaktor und Geschwindigkeit

Es hat sich gezeigt, dass

- sich die Fahrleistung in nicht tempolimitierten Bereichen von 56 auf 64 % erhöht und in mit Tempolimit 130 versehenen Abschnitten von über 7 auf 4 % fast halbiert hat. In Arbeitsstellen hat sich die Fahrleistung von 5 auf über 9 % erhöht und
- sich die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abschnitten mit vergleichbaren Randbedingungen im Vergleichszeitraum reduziert hat.

Weiterhin ist es gelungen, eine solide Fitfunktion (Best-fit) für Emissionsfaktoren abzuleiten, welche gerade auch den hohen Geschwindigkeitsbereich abbildet. Dazu wurden zunächst Fahrzyklen aus der WLTP-Datenbank [TUTUIANU et al. 2013] und aus eigenen Realfahrten auf BAB durch das KBA als Grundlage erstellt. Diese dienten dann als Eingangsgröße für das Simulationsprogramm PHEM der TU Graz [HAUSBERGER o. J.]. Hierdurch sind insgesamt 55 neue Punkte für den relevanten Bereich in Abbildung 16 entstanden, die zu einer soliden Fitfunktion (Best-Fit) geführt haben. Für die Abhängigkeit zwischen CO₂-Emissionsfaktor und Geschwindigkeit wurde neben der Best-Fit-Funktion auch eine Funktion bestimmt, die im hohen Geschwindigkeitsbereich eine extrem dynamische Fahrweise zu Grunde legt.

Aus den vorliegenden Eingangsgrößen erfolgte dann die endgültige Berechnung des CO₂-Einsparpotentials im Sinne der Aufgabenstellung durch Umverteilung von Fahrleistungsanteilen gemäß der gegebenen Geschwindigkeitsverteilungen und durch Bestimmung der CO₂-Emissionen mit Hilfe der Emissionsfaktoren.

Wie in Abschnitt 3.5 dargestellt, wird die tatsächliche Geschwindigkeitsverteilung für den Fall der Einführung eines generellen Tempolimits von 130 km/h maßgeblich von begleitenden Faktoren wie die die Maßnahme begründende Kommunikation, die Überwachung der Einhaltung und die Höhe der Sanktionierung bei einem Verstoß beeinflusst. Diese Faktoren sind heute nicht bekannt. Es wurden deshalb auf Basis empirischer Messungen die Szenarien „niedrigere Befolgungsrate“ und „höhere Befolgungsrate“ gebildet, welche sich innerhalb einer von diesen Faktoren abhängigen Spannweite bewegen. Weiterhin wurde das hypothetische

Extremszenario „Begrenzer“ (alle Fahrzeuge sind technisch auf eine Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h limitiert) gebildet. Für diese drei Szenarien ergeben sich unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen und unterschiedliche CO₂-Einsparpotentiale.

Für die beiden realistischen Szenarien (niedrige und höhere Befolgsrate) ist die Berechnung des Einsparpotentials mit der „Best Fit-Funktion“ erfolgt. Damit ergeben sich für das Szenario mit einer höheren Befolgsrate ein Wert von 2,0 Mio. t CO₂ Einsparung pro Jahr. Dieser Wert reduziert sich bei einer niedrigeren Befolgsrate auf 1,3 Mio. t CO₂ Einsparung pro Jahr.

Die höchstmögliche hypothetische Abschätzung für die CO₂-Ersparnis ergibt sich bei der Kopplung des Szenarios „Begrenzer“ mit den Emissionsfaktoren aus der Funktion für dynamische Fahrweise (fit-dynamisch) und zwar 4,2 Mio. t CO₂ pro Jahr.

Zusammengefasst ergeben sich als Endergebnis für die jährliche CO₂-Ersparnis durch ein generelles Tempolimit auf BAB von 130 km/h für die beiden realistischen Szenarien folgende Werte:

- **Niedrigere Befolgung (mit Best Fit):** **1,3**
- **Höhere Befolgung (mit Best Fit):** **2,0**

und für das hypothetische Extremszenario folgender Wert:

- **Begrenzer (mit dynamischer Fahrweise):** **4,2**

(jeweils in Mio. t CO₂ pro Jahr gerundet auf eine Dezimale).

5.2 Sensitivitäten

Eine Sensitivitätsanalyse wird durchgeführt, indem die relevanten Einflussgrößen betrachtet und mit einem bestimmten prozentualen Unschärfbereich versehen werden. Bewertet wird, wie sich dieser Unschärfbereich auf das Endergebnis auswirkt. Das erlaubt dann wiederum eine Aussage, wie stabil das ermittelte Endergebnis ist.

Die wesentlichen dieser Untersuchung zugrundeliegenden Einflussgrößen sind:

- Berechnungsmethode
- Verteilung der Geschwindigkeiten
- Fahrleistungsanteile
- Verteilung der Fahrleistungsanteile im hohen Geschwindigkeitsbereich
- In Arbeitsstellen erbrachte Fahrleistung
- Verwendete Fahrzyklen
- Zusammensetzung der Fahrzeugflotte (Fahrzeugkategorien)
- Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeuge

Im Folgenden werden die Einflussgrößen betrachtet und behandelt, für die eine Analyse möglich und sinnvoll ist.

5.2.1 Berechnungsmethode

Es gibt verschiedene Wege, um die Aufgabe der Berechnung des CO₂-Einsparpotentials bei einem generellen Tempolimit von 130 km/h auf Autobahnen zu bearbeiten. Diese können sich insbesondere darin unterscheiden, ob für die Verlagerung der Fahrleistungsanteile im hohen Geschwindigkeitsbereich auf die Verkehrssituationen aus HBEFA oder auf Fahrleistungsanteilsverteilungen aus DZ-Daten zurückgegriffen wird. Darüber hinaus kann sich die Modellierung der Emissionsfaktoren für CO₂ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit unterscheiden. Es ist daher naheliegend, dass die Wahl der Berechnung und die Basis der zugrundeliegenden Daten Auswirkungen auf das Endergebnis haben.

In diesem Bericht wird im Wesentlichen die Methode von Lange et al [LANGE et al. 2020] verwendet, allerdings mit zwei wesentlichen Unterschieden. Hier werden aktuelle Geschwindigkeitsdaten verwendet und entsprechend der Aufgabenstellung der Fokus auf das Limit 130 km/h gelegt. Außerdem wird der Bereich der Emissionsfaktoren im hohen Geschwindigkeitsbereich mit realen Fahrzyklen hinterlegt.

Ein wirklicher Vergleich der Methoden im Sinne einer Sensitivitätsanalyse ist jedoch nicht möglich, da sich die Datengrundlagen bei den verschiedenen Ansätzen unterscheiden. Es kann aber festgehalten werden, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Studien für sich entsprechende Szenarien dennoch in der gleichen Größenordnung liegen.

5.2.2 Geschwindigkeiten und Fahrleistung

Die Verteilung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten und daran gekoppelt die jeweilige Fahrleistung sind neben den Emissionsfaktoren entscheidende Einflussgrößen bei der hier gestellten Aufgabe.

Bei der hier angewendeten Methode werden die Fahrleistungsanteile im hohen Geschwindigkeitsbereich auf eine Situation umgelegt, die durch die Geschwindigkeitsverteilung eines der drei Szenarien charakterisiert ist. Die Modellierung der Glockenkurven (Histogramme) in den drei Szenarien hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Somit sind die drei Szenarien an sich bereits eine Sensitivitätsprüfung in Bezug auf die Umlegung der Fahrleistungsanteile im hohen Geschwindigkeitsbereich.

5.2.3 Fahrzyklen und Emissionsfaktoren

Fahrzyklen spielen eine entscheidende Rolle bei der Berechnung von Verbrauchswerten, insbesondere, wenn sich die Fahrzeuge im hohen Geschwindigkeitsbereich bewegen. Für die bearbeitete Fragestellung gibt es jedoch nicht einen genormten oder allseits anerkannten Fahrzyklus. Die für die hier dargestellten Ergebnisse zugrundeliegenden Fahrzyklen sind in Abschnitt 3.10 beschrieben. Sie stellen am Ende auch nur einen Ausschnitt aus allen möglichen Fahrzyklen auf BAB im hohen Geschwindigkeitsbereich dar. Eine Grenzwertabschätzung ist bereits in Abschnitt 4.1.2 und 5.1 durch die zusätzliche Berechnung des dynamischen Falls erfolgt. Eine weitere Variation bietet sich daher hier nicht an. Wohl aber wäre es sinnvoll in der Zukunft mehr Versuchsfahrten durchzuführen und damit eine breitere Datenbasis für die Ermittlung von diesen Zyklen zu haben.

Die gleichen Überlegungen gelten auch für den Einflussparameter Emissionsfaktor, der direkt von den gewählten Fahrzyklen abhängig ist. Auch hier ist eine mögliche Abweichung nach oben oder unten in dem verwendeten Korridor bereits impliziert. Die sich daraus ergebenden Werte sind in Abschnitt 5.1 aufgeführt.

5.2.4 Fahrleistung in Arbeitsstellen

Der in Abschnitt 3.3 angegebene Anteil an Arbeitsstellen im Bereich von BAB ist ein auf guter Datenbasis ermittelter Wert. Daher wird bei dieser Analyse mit einem Abweichungswert von $\pm 3\%$ (absolut) gerechnet.

Wird dieser Ansatz verfolgt, ergibt sich eine Veränderung der Ergebnisse von $\pm 4\%$.

Insofern gilt hier für die Sensitivität, dass bei einer Verringerung des Anteils der Arbeitsstellen die CO₂-Ersparnis leicht überproportional zunimmt.

5.2.5 Gesamtemissionen/Eckwert

Die gesamten CO₂-Emissionen auf BAB in Deutschland betragen für die hier relevanten Fahrzeugkategorien PKW und LNFz zusammen 38,7 Mio. t CO₂ im Jahr 2023. Der Wert ist der jüngste Wert, welcher im Real-Szenario der aktuellen TREMOD Version 6.61 hinterlegt ist [IFEU 2024]. Der Eckwert liegt damit 14 % unter dem von 2018, mit den Lange et al. [LANGE et al. 2020] gearbeitet hat.

Betrachtet man den Verlauf der CO₂-Gesamtemissionen über die Zeit, erkennt man den Einbruch in der Pandemie und den stetigen Anstieg seitdem. Es kann daher abgeschätzt werden, dass für die nahe Zukunft ein weiterer leichter Anstieg zu erwarten ist.

Würde man den Wert von 2018 in Höhe von 44,3 Mio. t CO₂ hier zugrunde legen, ergäben sich allerdings Veränderungen im gleichen Maße, d. h. ein 14 % größeres Einsparpotential. Insofern liegt für die Sensitivität des Ergebnisses an CO₂-Ersparnis in Bezug auf den CO₂-Eckwert ein linearer bzw. proportionaler Zusammenhang vor.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die BASt wurde beauftragt abzuschätzen, welches CO₂-Einsparungspotential ein generelles Tempolimit von 130 km/h auf deutschen Autobahnen hat.

Für die Abschätzung wurde methodisch in Anlehnung an den UBA-Bericht 28/2020 „Klimaschutz durch Tempolimit“ [LANGE et al. 2020] vorgegangen, welcher bei den verkehrlichen Eingangsdaten auf lokale DZ abstellt. Es wurde darauf verzichtet, Routenwahl- und Nachfrageeffekte zu modellieren.

Die Methodik aus [LANGE et al. 2020] ist transparent, sie nutzt nachvollziehbar Eckwerte aus dem allgemein anerkannten Emissionsberechnungsprogramm TREMOD und aus HBEFA und sie liefert ein robustes Modell, welches nachvollziehbare Sensitivitätsprüfungen bzgl. der Eingangsparameter erlaubt. Im Wesentlichen beruht sie darauf, dass die Fahrleistungsanteile der heute unlimitierten Abschnitte für die Fahrzeugarten PKW und leichte Nutzfahrzeuge in andere Geschwindigkeitsbereiche umgelagert werden. Eine Aktualisierung der zu Grunde gelegten Daten erfolgte insbesondere an folgenden Stellen:

- i. Ableitung der Geschwindigkeitsverteilung für heute unlimitierte BAB-Abschnitte
- ii. Abschätzung der Geschwindigkeitsverteilung derselben Abschnitte, wenn sie zukünftig mit einem generellen Tempolimit von 130 km/h belegt sind, und zwar anhand einer angenommenen Befolgsrate
- iii. Berechnung der heutigen Fahrleistungsanteile und Durchschnittsgeschwindigkeiten auf BAB in Abhängigkeit vom jeweils herrschenden Tempolimit als Bezugsbasis
- iv. Fortschreibung der Fahrzyklen und der Emissionsfaktoren im hohen Geschwindigkeitsbereich

Die BASt wertet seit mehreren Jahrzehnten das umfangreiche DZ-Netz auf BAB aus, welches aktuell über 1000 DZ umfasst. Die Fahrleistungsanteile auf BAB in Abhängigkeit vom jeweils herrschenden Tempolimit wurden mit diesen über 1000 DZ in hoher Datenqualität ermittelt.

Darüber hinaus sind die DZ sensortechnisch in der Lage, detailliert Geschwindigkeiten zu erfassen. Für die Beantwortung der Fragestellung war eine repräsentative Anzahl an DZ zu identifizieren, welche auch softwaretechnisch im benötigten Detaillierungsgrad und qualitätsgesichert entsprechende Geschwindigkeitsdaten für das Bezugsjahr 2024 erwarten ließen. In enger Zusammenarbeit mit der Autobahn GmbH des Bundes wurden richtungsgetrennt 123 DZ ausgewählt, um zum einen die benötigte Geschwindigkeitsverteilung für heute unlimitierte Abschnitte und zum Vergleich drei Szenarien zu den Befolgsraten für ein künftiges generelles Tempolimit auf diesen Abschnitten abzuleiten.

Aus der Sicherheitsforschung ist hinlänglich bekannt, dass begleitende Faktoren im Zusammenhang mit einem generellen Tempolimit, wie die die Maßnahme begründende Kommunikation, die Überwachung der Einhaltung und die Höhe der Sanktionierung bei einem Verstoß diese Befolgungsrate maßgeblich beeinflussen werden. Deshalb wurden die beiden auf Basis der empirischen Werte abgeleiteten Szenarien „höhere“ und „niedrigere“ Befolgungsrate, welche sich in einem aus heutiger Sicht realistischen Bereich bewegen, sowie ein hypothetisches Extremszenario „Begrenzer“ (alle Fahrzeuge sind aufgrund technischer Maßnahmen auf eine Höchstgeschwindigkeit 130 km/h begrenzt) aufgestellt.

Als Zwischenergebnis ist im Vergleich zum Bezugsjahr 2014 entsprechend [LANGE et al. 2020] nach [LÖHE 2016] festzuhalten, dass sich die Fahrleistung in Arbeitsstellen von 5 auf über 9 % und in nicht tempolimitierten Bereichen von 56 auf 64 % erhöht und in mit Tempolimit 130 km/h betroffenen Abschnitten von über 7 auf 4 % fast halbiert hat. Weiterhin ergab sich als klarer Trend, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abschnitten mit vergleichbaren Randbedingungen im Vergleichszeitraum reduziert hat.

Ein weiterer wesentlicher Mehrwert dieser Untersuchung ist die Ermittlung von EF im hohen Geschwindigkeitsbereich (> 130 km/h). In diesem Bereich gibt es bislang wenig bis keine EF im HBEFA oder anderen einschlägigen Quellen. Hierzu wurden aus dem existierenden Datenpool an Fahrzyklen, der seinerzeit für die Entwicklung des WLTC [STEVEN 2024] verwendet worden ist, die Anteile extrahiert, die in diesen Geschwindigkeitsbereich fallen. Zum anderen wurden eigene Messfahrten durch das KBA durchgeführt, um weitere Fahrzyklen im hohen Geschwindigkeitsbereich zu gewinnen. Eine breit angelegte Testreihe musste zwar aus Zeit- und Witterungsgründen unterbleiben, wohl aber konnten eine Reihe von Testfahrten mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrern durchgeführt werden. Insgesamt wurden 55 Teilzyklen extrahiert, die von der TU Graz mithilfe des einschlägigen Simulationsmodells PHEM zur Berechnung neuer EF für den betrachteten Bereich herangezogen wurden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine Best-Fit-Funktion entwickelt, die die Abhängigkeit der CO₂-EF von der Geschwindigkeit beschreibt. Diese Funktion dient als Basis für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung der realistischen Szenarien. Für das hypothetische Extremszenario „Begrenzer“ wurde dagegen eine extremere Funktion „dynamische Fahrweise“ verwendet, die als obere Begrenzungslinie angesehen werden kann.

Auf Basis der aktualisierten Eingangsdaten konnte das CO₂-Einsparungspotential für ein generelles Tempolimit von 130 km/h auf deutschen Autobahnen bestimmt werden. Es beträgt für die beiden realistischen Szenarien:

- **Niedrigere Befolgung (mit Best Fit):** 1,3
- **Höhere Befolgung (mit Best Fit):** 2,0

und für das hypothetische Extremszenario:

- **Begrenzer (mit dynamischer Fahrweise):** 4,2

(jeweils in Mio. t CO₂ pro Jahr gerundet auf eine Dezimale).

Die Ergebnisse beruhen auf Fahrleistungsdaten und Geschwindigkeitsverteilungen aus dem Jahr 2024. Der genutzte CO₂-Eckwert aus TREMOD für die Gesamtemissionen der Flotte an Pkw und LNFz bildet das Jahr 2023 ab. Insofern gilt das ermittelte CO₂-Einsparungspotenzial für die aktuelle Situation auf Autobahnen und für die aktuelle Fahrzeugflotte. Bei einer Fortschreibung der Ergebnisse in zukünftige Jahre wären Änderungen in der Flottenzusammensetzung und in der Fahrleistung dieser Flotte zu ermitteln und zu berücksichtigen. Insbesondere eine anteilig wachsende Zahl von Elektrofahrzeugen, die zu großen Teilen Strom aus erneuerbaren Quellen nutzen, würde dazu führen, dass der CO₂-Eckwert in TREMOD für die Flotte der Pkw und LNFz sinkt und damit auch das CO₂-Einsparungspotenzial durch ein generelles Tempolimit über die Jahre hinweg niedriger wird. Von einem steigenden Anteil an Elektrofahrzeugen ist grundsätzlich in der Summe auch ein verändertes Fahrverhalten (Durchschnittsgeschwindigkeiten, Fahrdynamik) zu erwarten, nicht nur bei den Elektrofahrzeugen, sondern in Folge wegen des Mischverkehrs auch bei Kfz mit Verbrennungsmotoren.

Die Datenqualität zu den Fahrleistungsanteilen in Abhängigkeit des herrschenden Tempolimits hat sich in den letzten 10 Jahren (Ausbau und Qualitätssicherung des Dauerzählstellennetzes, VAS, MIA, ...) substantiell verbessert, so dass insgesamt die abgeleiteten Ergebnisse sich hinsichtlich der Robustheit im Vergleich zu [LANGE et al. 2020] belastbar sind. Der Bereich der EF im hohen Geschwindigkeitsbereich konnte durch die in dieser Untersuchung vorgenommenen Realfahrten und Auswertungen der vorhandenen Daten bereits gut abgedeckt werden. Durch ein erweitertes Testprogramm mit größerer Differenzierung der Einflussparameter (Fahrzeug, Fahrende und Strecke) kann auch diese Datengrundlage noch weiter verbessert werden.

Es bleibt weiterhin abzuwarten, inwieweit die zunehmende Verbreitung der mittlerweile bei Neuwagen gesetzlich vorgeschriebenen akustischen Geschwindigkeitswarner in Kraftfahrzeugen den Trend hin zu niedrigeren gefahrenen Geschwindigkeiten in den nächsten Jahren (zumindest in Bereichen mit Tempolimit) noch verstärken wird.

7 Literatur

ALLEKOTTE, M., BIEMANN, K., COLSON, M., HEIDT, C., KRÄCK, J., KNÖRR, W. (2024): Aktualisierung TREMOD/TREMOD MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Autobahn GmbH des Bundes (2024): Management- und Informationssystem für Arbeitsstellen (MIA). www.autobahn.de [Online], abgerufen am 15. 01 2025. Die Autobahn GmbH des Bundes, Berlin.

BAST (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS2012). Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024a): Verkehrsanalyzesystem.
<https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/V1-VAS.htm> [Online], abgerufen am 17.12.2024. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024b): Bundesinformationssystem Straße (BISStra).
<https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-bisstra.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024c): Anweisung Straßeninformationsbank v2.05.
<https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V-ASB.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024d): Zustandserfassung und -bewertung.
<https://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/S5-zeb.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025 Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024e): Verkehrsentwicklung auf Bundesstraßen.
<https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html> [Online], abgerufen am 18. November 2024. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024f): Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen.
https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html [Online], zuletzt abgerufen am 23.01.2025. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2024g): Zustandserfassung und -bewertung.
<https://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/S5-zeb.html> [Online], letztmalig abgerufen am 20.01.2025. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BBSR (2024): Nemo Großstadtregionen.
<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzung-deutschland/regionen/Grossstadtregionen/Grossstadtregionen.html> [Online], abgerufen am 23.01.2025. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn.

BKG (2021): Digitales Geländemodell Gitterweite 5m (DGM5).
<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

BKG (2024a): BKG Basemap. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/webdienste/basemap-webdienste/wms-basemapde-webraster-wms-basemapde-webraster.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

BKG (2024b): Digitale Orthophotos Bodenauflösung 20 cm (DOP20).
<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-orthophotos-bodenaufloesung-20-cm-dop20.html> [Online], letztmalig abgerufen am 23.01.2025. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

BOSCH (2024): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Robert Bosch GmbH, Gerlingen.

FGSV (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (2022): Richtlinien für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FRIEDRICH, M., BAWIDAMANN, J., SCHMAUS, M., UHLIG, J., LOHSE, R., PESTEL, E: (2024): Modellierung der Umweltwirkung von Tempolimit-Maßnahmen auf Autobahnen und außerorts. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

GEISTEFELDT, J., VON DER HEIDEN, N., OESER, M., KEMPER, D., DINER, E., BAIER, M. M., KLEMP-S-KOHNEN, A. (2024):. Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

Handelsblatt (2025): Gut jeder dritte Fernzug der Deutschen Bahn 2024 verspätet.
<https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/deutsche-bahn-gut-jeder-dritte-fernzug-der-deutschen-bahn-2024-verspaetet/100098386.html> [Online], abgerufen am 09. 01 2025. Düsseldorf.

HARTZ, B., ZODET, N. (2006): Konzept zur Hochrechnung von Geschwindigkeiten auf BAB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

HAUSBERGER, S (o. J.): PHEM - Passenger car and Heavy duty Emission Model. Graz.

IFEU (2024): TREMOD - Transport Emission Model, Version 6.61. [Datenbank]. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.

INFRAS (2024): Handbuch für Emissionsfaktoren 4.2. [Datenbank]. Infrast AG, Bern.

KBA (2024):
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html [Online], abgerufen am 01.01.2024. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.

LANGHE, M., HENDZLIK, M., SCHMIED, M. (2020): Klimaschutz durch Tempolimit. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

LÖHE, U. (2016): Geschwindigkeiten auf den Bundesautobahnen in den Jahren 2010 bis 2014. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

LÖHE, U. (2023): Location Code List / Event Code List.
<https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-LCL/location-code-list.html> [Online], abgerufen am 09. 01 2025. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

NOTTER, B., COX, B., HAUSBERGER, S., MATZER, C., WELLER, K., DIPPOLD, M., POLITSCHNIG, N., LIPP, S., ALLEKOTTE, M., KNÖRR, W., ANDRÉ, M., GAGNEPAIN, L., HULT, C., JERKSJÖ, M. (2022): HBEFA 4.2 Update Documentation. UNECE, Genf.

NOTTER, B., COX, B. (2023): HBEFA Technical Documentation.
<https://www.hbefa.net/en/software> [Online], abgerufen am 21.01.2025. Infrac AG, Bern.

RODT, S., GEORGI, B., HUCKESTEIN, B., MÖNCH, L., HERBENER, R., JAHN, H., KOPPE, K., LINDMAIER, J. (2010): CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

SCHMAUS, M., BAWIDAMANN, J., FRIEDRICH, M., HABERL, M., TRENKWALDER, L., FELLENDORF, M., UHLIG, J., LOHSE, R., PESTEL, E. (2023): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

STEVEN, H. (2024): Ergebnisbericht - Ableitung eines Hochgeschwindigkeitszyklus für Pkw auf Autobahnen aus den Daten der WLTP-Datenbank (unveröffentlicht)

TUTUIANU, M., MAROTTA, A., STEVEN, H., ERICSSON, E., HANIU, T., ICHIKAWA, N., ISHII, H. (2013): Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC). UNECE, Genf.

Anhang

Beispielauswertung aus TEMPO

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024


Filsum, A28, NI

Allgemeine Angaben	
Name: Filsum	DTV gesamt: 29.572 Kfz/24h
Straße: A28	SV-Anteil: ≤ 13,3 %
Land: Autobahn GmbH Nordwest	
BAS-Nr.: 3368	
TK-Blatt: 2711	

Richtungsbezogene Angaben		
	Richtung 1	Richtung 2
Fernziel:	Oldenburg	Leer
Nahziel:	AS Filsum	AS Leer-Ost
Fahrstreifen:	2	2
Geschw.-Beschr.:	nein	nein
Lkw-Überholverb.:	Nein	Nein
DTV-Wert:	14.557 Kfz/24h	15.045 Kfz/24h
SV-Anteil:	≤ 13,3 %	≤ 13,3 %
gültige Stunden:	6.050 von 6.204 Stunden	6.050 von 6.204 Stunden

Streckencharakteristik	
Längsneigung: eben (< 2%)	Ballungsraum: kein Ballungsraum
Fahrbahnführung: gerade	

Ausschnitt der TK25 (ohne Maßstab)



Gerätecharakteristik	
Hersteller: - keine Angabe -	Fahrzeuggruppen: LVo (Leichtverk. o. Anh.)
Gerätetyp: - keine Angabe -	SGV (schw. Güterverk.)
Zulassung bis: 04/2028	BPA (Bus+Pkw m. Anh.)
Wartungsvertrag: ja	v-Klassen (LVo, SGV, BPA): 16 - 10 - 10

06.11.2024

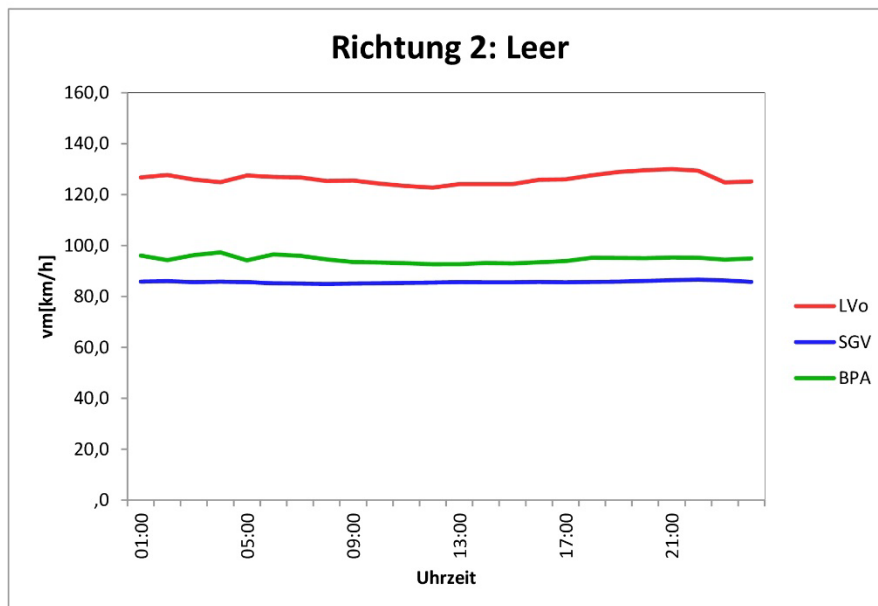
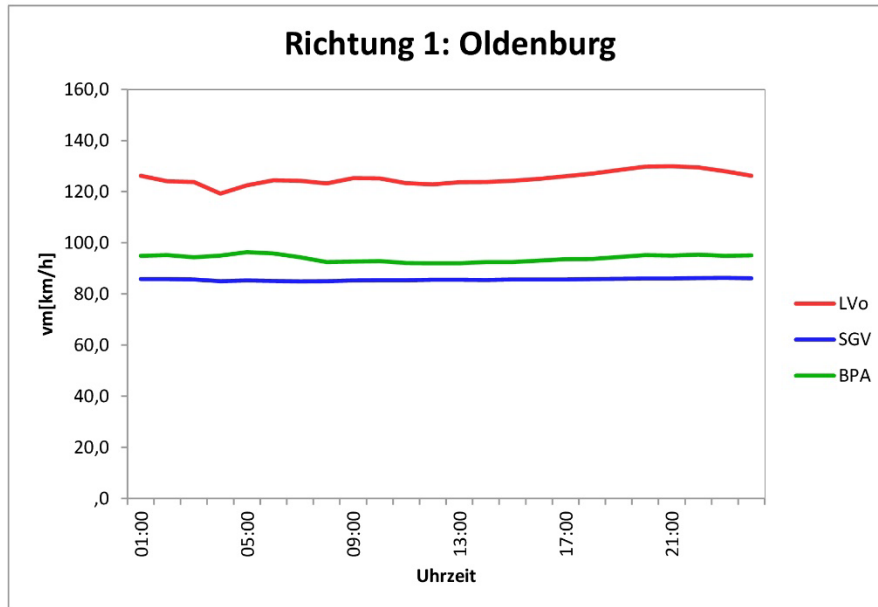
lfd. Nr. 38, S. 1

Tempo V2.0, BASi

Anhang 1: Beispielauswertung aus TEMPO – Seite 1/7

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

Tagesganglinien der mittleren lokalen Geschwindigkeiten (vm) Mo-So



06.11.2024

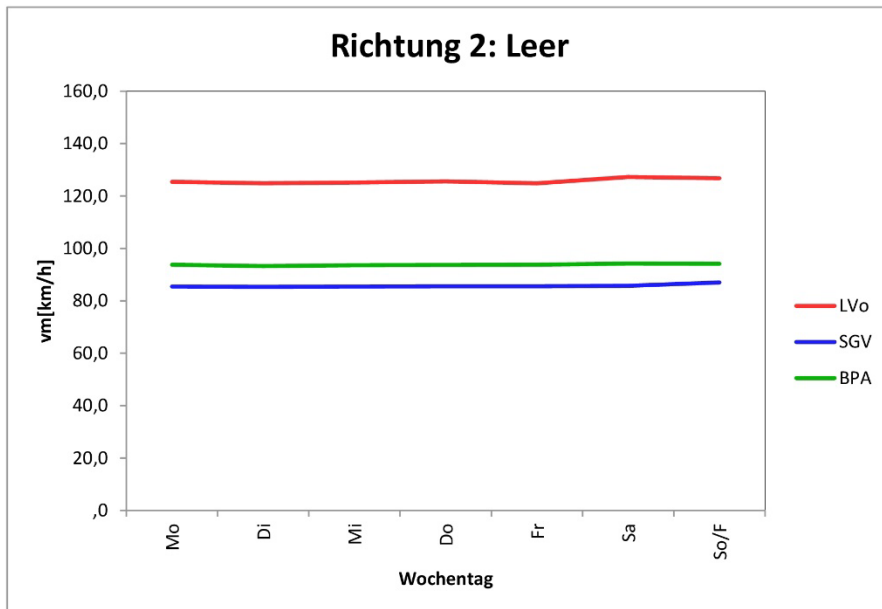
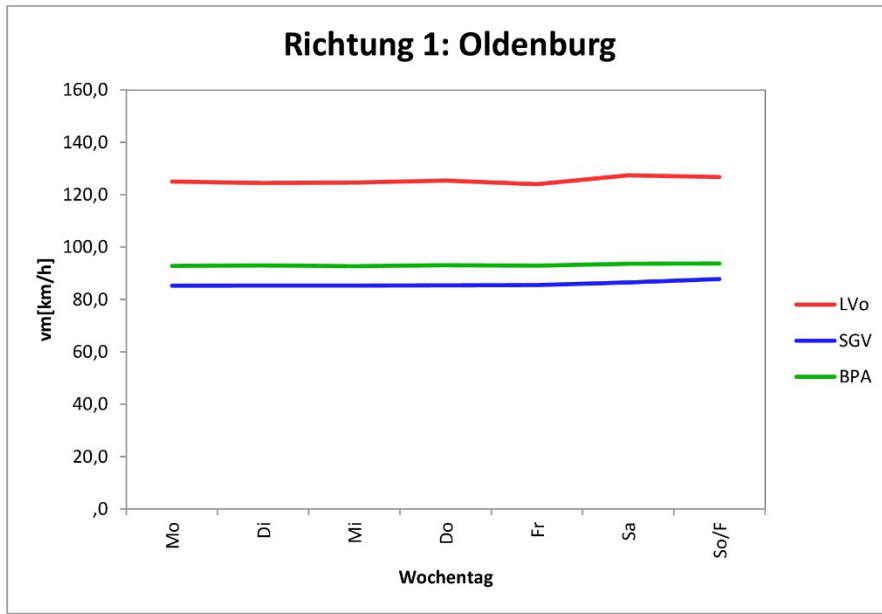
lfd. Nr. 38, S. 2

Tempo V2.0, BAST

Anhang 2: Beispielauswertung aus TEMPO – Seite 2/7

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

Wochenganglinien der mittleren lokalen Geschwindigkeiten (vm)



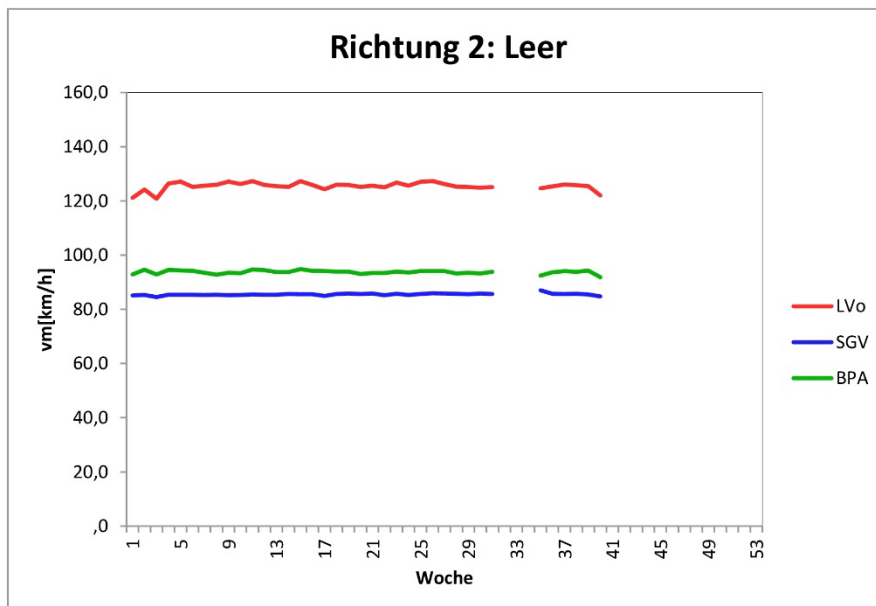
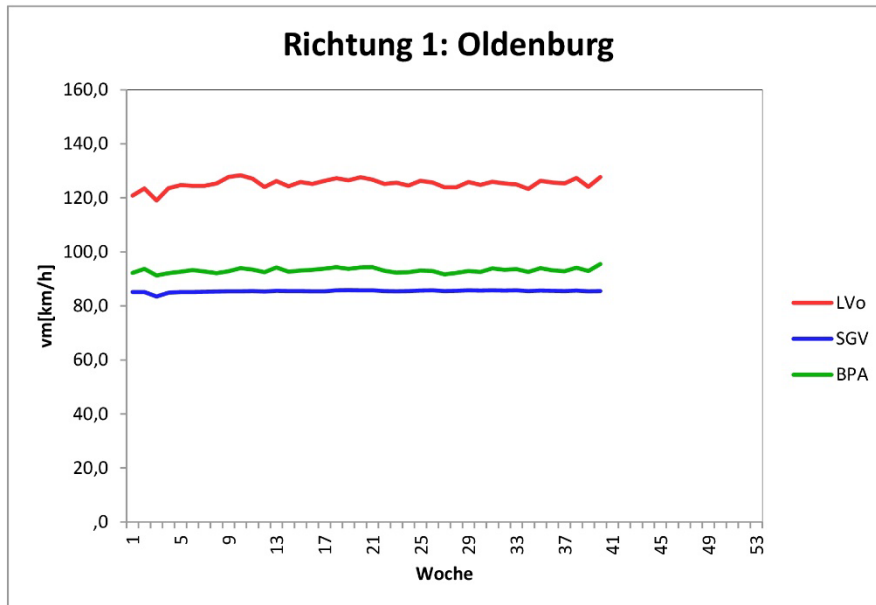
06.11.2024

lfd. Nr. 38, S. 3

Tempo V2.0, BAST

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

Jahresganglinien der mittleren lokalen Geschwindigkeiten (vm)



06.11.2024

lfd. Nr. 38, S. 4

Tempo V2.0, BAST

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

Zeitraumbezogene Auswertung

Richtung 1: Oldenburg

Uhr	qKfz [Fz/h]	qSV [Fz/h]	LVo					SGV			BPA			
			q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	p130 [%]	p150 [%]	q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	
Mo-So	00-24	643	86	544	125,4	21,3	37	11	84	85,5	4,2	16	93,1	9,6
	00-06	117	40	77	124,0	24,2	36	12	39	85,3	3,9	2	95,5	9,6
	06-10	842	147	681	124,5	20,4	36	10	145	85,1	4,1	17	92,9	9,5
	09-16	1.042	138	879	124,0	20,2	35	9	136	85,5	4,3	29	92,4	9,4
	15-19	1.045	92	932	126,6	21,2	40	12	89	85,7	4,3	26	93,6	9,6
Mo-Fr	00-24	688	114	561	124,7	21,1	36	11	112	85,3	4,1	16	92,9	9,8
	00-06	124	50	74	122,5	24,1	33	11	49	85,2	3,9	2	95,4	9,8
	06-10	1.055	200	841	123,9	20,2	35	9	197	85,1	4,0	19	92,3	9,5
	09-16	1.066	186	857	123,2	20,0	34	9	184	85,3	4,2	27	92,1	9,6
	15-19	1.107	124	961	126,1	21,0	39	12	121	85,6	4,2	26	93,4	9,8
So/F	00-24	518	14	493	126,8	21,5	40	13	13	87,8	5,9	15	93,7	9,2
	00-06	98	9	89	127,0	23,9	39	14	8	86,7	3,7	2	95,8	9,5
	06-10	265	13	247	127,6	22,0	40	13	12	86,3	4,7	8	95,0	9,1
	09-16	943	20	899	125,4	20,4	37	11	18	89,1	6,7	29	93,0	8,8
	15-19	938	17	901	127,4	21,3	41	13	15	88,2	6,8	25	94,0	8,9

Richtung 2: Leer

Uhr	qKfz [Fz/h]	qSV [Fz/h]	LVo					SGV			BPA			
			q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	p130 [%]	p150 [%]	q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	q [Fz/h]	vm [km/h]	svm [km/h]	
Mo-So	00-24	587	78	497	125,7	21,6	38	12	77	85,5	4,5	15	93,8	10,0
	00-06	108	31	76	126,8	24,1	40	15	30	85,5	4,3	2	95,9	9,9
	06-10	698	113	572	125,4	20,9	38	11	112	85,1	4,7	16	94,1	10,2
	09-16	980	130	826	124,1	20,4	36	10	128	85,5	4,4	28	93,0	9,7
	15-19	1.001	93	889	126,9	21,5	41	13	90	85,7	4,6	23	94,3	10,0
Mo-Fr	00-24	623	104	507	125,2	21,4	38	11	103	85,4	4,4	15	93,6	10,2
	00-06	119	40	78	126,4	23,8	40	14	39	85,6	4,2	2	95,9	10,2
	06-10	853	155	684	125,2	20,9	38	11	153	85,0	4,7	17	93,8	10,4
	09-16	1.012	178	811	123,5	20,1	35	9	176	85,4	4,2	27	92,9	9,8
	15-19	1.054	126	906	126,2	21,4	40	12	124	85,6	4,6	24	94,0	10,2
So/F	00-24	512	15	485	126,8	21,5	40	13	14	87,0	5,2	15	94,1	9,3
	00-06	80	5	74	128,0	25,1	40	16	5	85,6	4,3	2	95,9	9,3
	06-10	276	8	259	125,8	21,1	37	11	7	86,7	5,1	11	94,6	9,3
	09-16	905	15	864	125,1	20,4	37	11	13	88,6	6,6	30	93,3	9,1
	15-19	980	14	947	128,3	21,3	43	14	11	88,3	6,0	23	95,0	9,4

Legende:

q: Menge; vm: mittlere Geschwindigkeit; svm: Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit;
p130: Anteil schneller 130km/h in %; p150: Anteil schneller 150km/h in %; Fz: Fahrzeuge

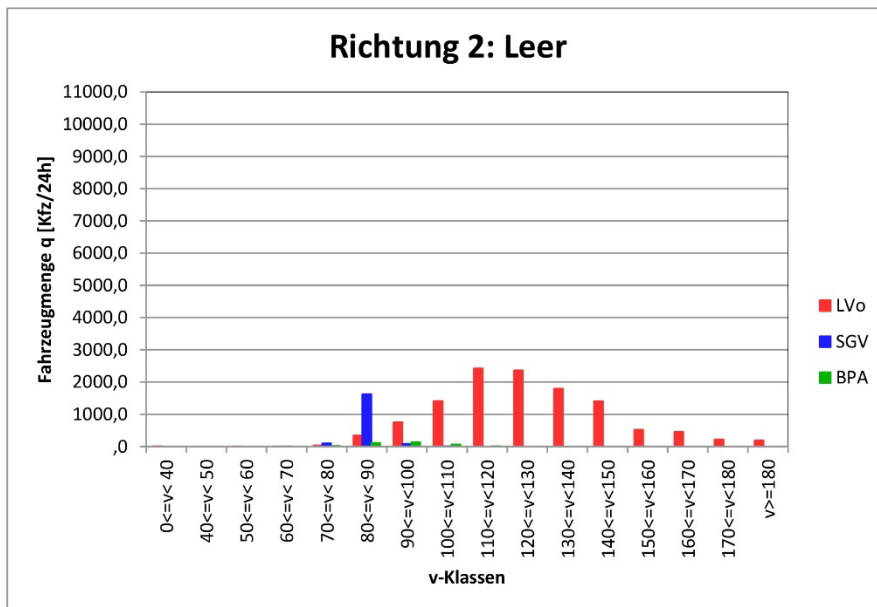
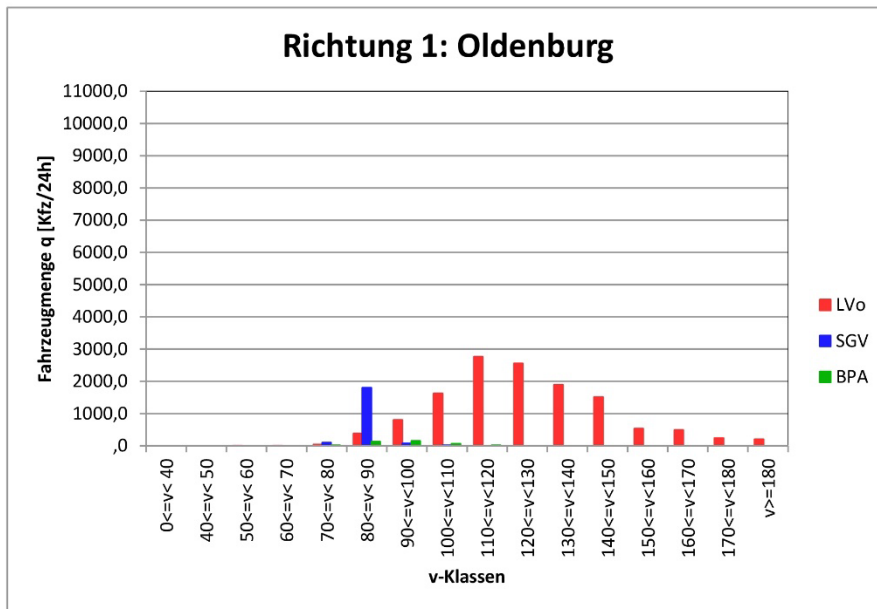
06.11.2024

lfd. Nr. 38, S. 5

Tempo V2.0, BASt

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

Histogramm Geschwindigkeitsklassen



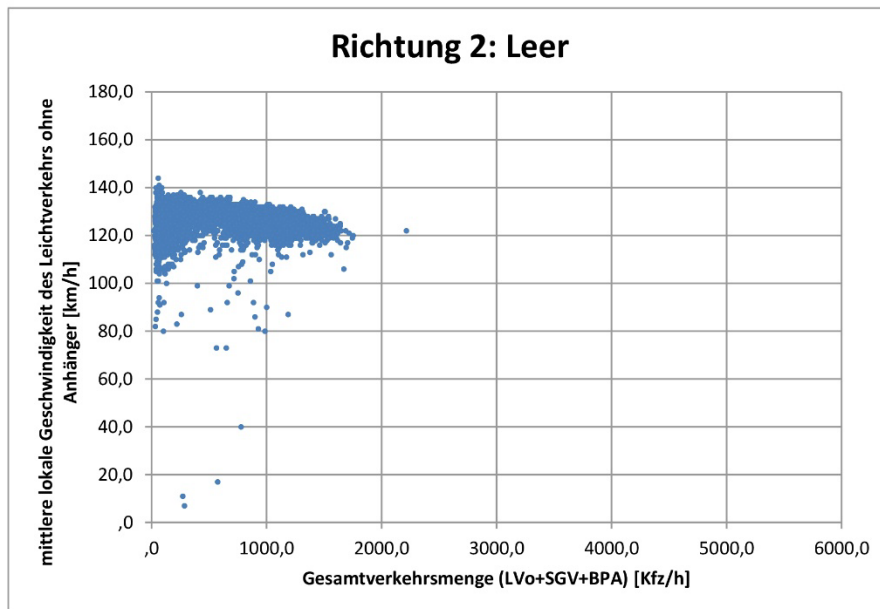
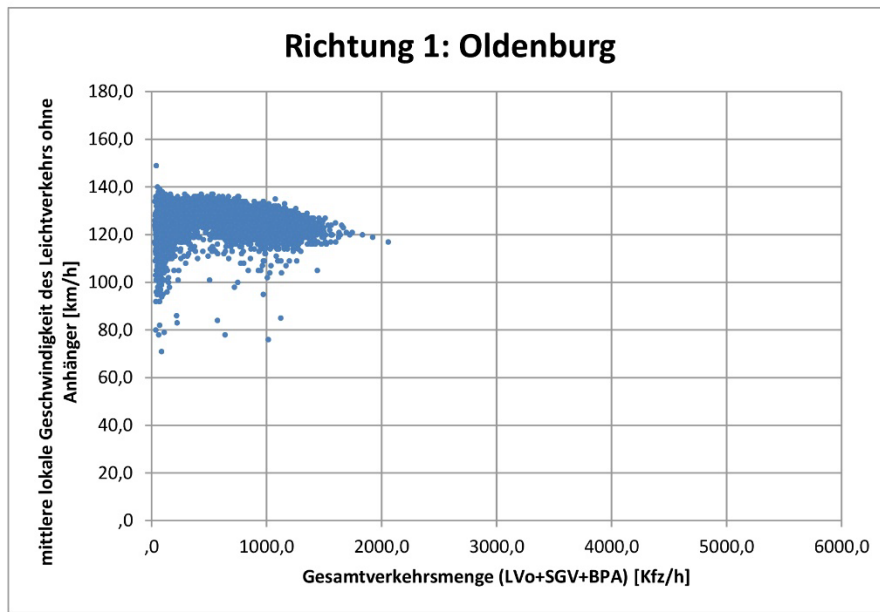
06.11.2024

lfd. Nr. 38, S. 6

Tempo V2.0, BAST

Geschwindigkeitsauswertung 3368 - bis September 2024

q-v-Diagramm



06.11.2024

lfd. Nr. 38, S. 7

Tempo V2.0, BAST