

Prognosemodelle
für den Straßenverkehrslärm mit einem Zeithorizont 2050
als Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen
zur städtebaulichen Lärminderung

Rumeysa Evli-Fründt

Prognosemodelle
für den Straßenverkehrslärm mit einem Zeithorizont 2050
als Grundlage für die Entwicklung von Maßnahme
zur städtebaulichen Lärminderung

genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund

von
Rumeysa Evli-Fründt

Prüfungskommission

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems
TU Dortmund |
| 2. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt
Universität Siegen |
| Vorsitzende: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jeanette Orłowsky
TU Dortmund |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 18. Dezember 2025 |

Dortmund 2025

Kurzfassung

Der Straßenverkehr ist nicht nur ein wesentlicher Faktor für Treibhausgasemissionen, sondern auch eine der Hauptquellen von Umgebungslärm. Während die Reduzierung des CO_2 Ausstoßes im Verkehrssektor durch das Klimaschutzgesetz zunehmend politisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich diskutiert wird, bleibt die langfristige Entwicklung des Straßenverkehrslärms - der jedoch auch physiologische und psychische Gesundheitsprobleme verursachen kann - weit weniger beachtet. Zwar wird häufig darauf hingewiesen, dass die Maßnahmen zur Emissionsminderung auch positive Auswirkungen auf die Lärmbelastung haben könnten, doch eine systematische und langfristige Betrachtung der tatsächlichen Auswirkungen fehlt bislang.

Die vorliegende Dissertation untersucht die Entwicklung des Straßenverkehrslärms in Deutschland für den Zeithorizont 2050 unter Berücksichtigung der aktuell diskutierten Planungs- und Entscheidungsprozesse. Sie stellt zugleich ein Instrument für die zukünftige Stadtplanung unter dem Gesichtspunkt der Lärmbekämpfung dar.

Mithilfe der Szenariotechnik werden die für den Straßenverkehrslärm relevanten Schlüsselfaktoren untersucht und die vorhandenen nationalen Szenarien einbezogen, um zwei unterschiedliche Zukunftsszenarien für den Zeithorizont 2050 zu entwickeln. Das Referenzszenario beschreibt die zukünftige Entwicklung, wenn keine weitergehenden Entscheidungen getroffen und Maßnahmen ergriffen werden. Was zur Folge hat, dass die Klimaschutzziele verfehlt werden. Im Stabilitätsszenario werden ambitionierte Maßnahmen umgesetzt, um die Ziele im Bereich Gebäude und insbesondere Verkehr zu erreichen.

Die Daten dieser Szenarien werden durch statistische Analysen und Berechnungen in quantitative Prognosedaten überführt, die als Berechnungsgrundlage für den zukünftigen Straßenverkehrslärm relevant sind. Dazu werden städtebauliche Übersichtspläne als Grundlage für die Prognosemodelle simuliert. Diese befassen sich mit den aktuellen Planungssituationen in der Bestandsentwicklung allgemeiner Wohngebiete unterschiedlicher siedlungsstruktureller Kreisstypen. Aufbauend darauf werden die Prognosemodelle für das Referenz- und das Stabilitätsszenario unter Anwendung der quantifizierten Prognosedaten simuliert. Sowohl für die aktuelle als auch für die zukünftige Planungssituation werden Schallimmissionspläne berechnet und miteinander verglichen.

Im Vergleich zur aktuellen Planungssituation zeigen die Prognosemodelle insgesamt nur geringfügige – teilweise gerade noch wahrnehmbare – Pegeldifferenzen. Dies zeigt, dass sich der Straßenverkehrslärm bis zum Jahr 2050 weder durch die zukünftigen Entwicklungen wahrnehmbar verschlechtern noch durch zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen wahrnehmbar verbessern wird. Die Lärmbelastung bleibt somit ein städtebauliches und vor allem gesundheitliches Problem in Deutschland.

Abstract

Road traffic is not only a major contributor to greenhouse gas emissions but also one of the main sources of environmental noise. While the reduction of CO_2 emissions in the transport sector is increasingly being discussed in political, economic, and societal contexts due to the Climate Protection Act, the long-term development of road traffic noise receives far less attention – even though it can also cause physiological and psychological health problems. Even if it is often pointed out that measures to reduce emissions could also have positive effects on noise exposure, a systematic and long-term assessment of the actual impacts is still lacking.

This dissertation investigates the development of road traffic noise in Germany for the time horizon 2050, taking into account currently discussed planning and decision-making processes. At the same time, it provides a tool for future urban planning from the perspective of noise control.

Using the scenario technique, the key factors relevant to road traffic noise are examined and the existing national scenarios are included in order to develop two different future scenarios for the 2050 time horizon. The reference scenario describes the future development in the case that no further decisions are made and no additional measures are taken. As a result, the climate protection targets will not be met. In the stability scenario though, ambitious measures are implemented in order to achieve the targets in the building sector and, in particular, in the transport sector.

The data from these scenarios is transferred into quantitative projection data through statistical analyses and calculations, which is relevant as a basis for calculating future road traffic noise. For this purpose, urban development overview plans are simulated as the basis for the forecast models. These deal with the current planning situations in the existing development of general residential areas of different settlement structure types. Based on this, the forecast models for the reference and stability scenarios are simulated using the quantified forecast data. Noise immission plans are calculated for both the current and the future planning situation and compared with each other.

Compared to the current planning situation, the forecast models show only minor - in some cases barely perceptible - sound level differences overall. This indicates that, by the year 2050, road traffic noise will neither noticeably worsen due to future developments nor noticeably improve through additional climate protection measures. Noise pollution therefore remains an urban development problem and, above all, a health problem in Germany.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist in den Jahren 2021 bis 2025 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Bauphysik der Ruhr-Universität Bochum entstanden.

Von Herzen möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Wolfgang Willems, der mich viele Jahre lang bei meiner Arbeit betreut hat. Ich schätze sein Vertrauen in meine Arbeit sowie seine stets wertvollen Anregungen sehr. Für die Übernahme der Zweitbegutachtung danke ich Prof. Dr. Peter Schmidt.

Ein weiterer Dank gebührt meinen Kolleginnen und Kollegen der Lehrstühle für Baukonstruktionen und Bauphysik der Ruhr-Universität Bochum sowie für Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung der Technischen Universität Dortmund für den wissenschaftlichen Austausch. Ganz besonders erwähnen möchte ich Frau Diana Stricker für ihr offenes Ohr und ihre wertvollen Ratschläge.

Mein großer Dank gilt auch meiner Familie. An erster Stelle danke ich meiner Tante Habibe Cay, die mich von Anfang bis Ende maßgeblich unterstützt und begleitet hat. Ohne ihre Ermutigung hätte ich diesen Weg vielleicht nie eingeschlagen.

Meinem Mann Julius Fründt, den ich während meines Promotionsverfahrens kennengelernt habe, danke ich von Herzen. Denn die konstruktiven Gespräche und Diskussionen, die wir gemeinsam geführt haben, waren für den Entstehungsprozess dieser Arbeit wichtig und für mich von unschätzbarem Wert.

Ich danke meinen Eltern, Emine und Mustafa Evli, die mir alles ermöglicht haben. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Schwestern Meryem und Sara für ihre wertvolle Unterstützung. Ebenso danke ich meinem Schwiegervater Dietmar Fründt für den uneingeschränkten Rückhalt.

Ein herzlicher Dank geht auch an Annette Happek, die mich nicht nur durch ihr sorgfältiges Korrekturlesen unterstützt hat, sondern mich auch über viele Monate hinweg immer wieder mit motivierenden Worten begleitet hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Ziel und Vorgehensweise	2
1.3 Stand des Wissens	3
2 Methodische Grundlagen	5
2.1 Straßenverkehrslärm	5
2.2 Megatrends und die Auswirkungen auf den Straßenverkehrslärm	10
2.3 Szenario-Methode	14
3 Entwicklung bis 2050	21
3.1 Identische Entwicklungen der Megatrends im Referenz- und Stabilitätsszenario	21
3.1.1 Einordnung nach Indikatorreihenfolge	21
3.1.2 Demografischer Wandel	21
3.1.3 Wirtschaftliche Entwicklung	22
3.1.4 Globalisierung	22
3.1.5 Technologische Entwicklungen	23
3.1.6 Urbanisierung	23
3.1.7 Mobilisierung	24
3.2 Szenario-Rahmenbedingungen	25
3.2.1 Begründung der Auswahl	25
3.2.2 Antriebstechnologien und Schallemissionen von Kraftfahrzeugen	25
3.2.3 Entwicklung des Fahrzeugbestands	27
3.2.4 Analyse der Fahrleistungsanteile	31
3.2.5 Tempolimit auf Autobahnen	32
3.2.6 Entwicklung der Dach- und Fassadenflächen	33
3.3 Referenz- und Stabilitätsszenario	37

3.3.1	Verkehrsentwicklung	37
3.3.2	Flächeninanspruchnahme	46
4	Quantifizierung der Szenarien	49
4.1	Prognose der Verkehrsstärke	49
4.1.1	Vorgehensweise	49
4.1.2	Regressionsanalyse des Personenverkehrs	49
4.1.3	Regressionsanalyse des Güterverkehrs	51
4.1.4	Anstieg der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19)	54
4.2	Schallminderungspotenzial durch Elektromobilität	60
4.3	Schallminderungspotenzial eines Tempolimits auf Autobahnen	63
4.4	Bebauungsdichte	65
4.5	Gebäudeflächen	66
4.5.1	Reflexionsverluste und Prognose der Flächenanteile für begrünte Gebäudeflächen	66
4.5.2	Reflexionsverluste und Prognose der Flächenanteile für Gebäudeflächen mit Photovoltaikanlagen	68
5	Schallimmissionspläne 2050	71
5.1	Modellierung aktueller Planungssituationen	71
5.2	Prognosemodelle für das Referenz- und Stabilitätsszenario 2050	80
5.2.1	Kreisfreie Großstädte	88
5.2.2	Städtische Kreise	91
5.2.3	Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen	94
5.2.4	Dünn besiedelte ländliche Kreise	97
5.3	Verkehrslärmentwicklung bis 2050 und Lärmwahrnehmung	100
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Zusammenfassung	103
6.2	Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	113
A	Einflussmatrix	115
B	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke 2050	117
B.1	Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen	117
B.2	Gemeindestraßen	120
B.3	Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen	122
B.4	Bundesstraßen	124
C	Verkehrsstärke auf Autobahnen 2050	127

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung (a) eines Zeit-Amplituden-Diagramms des Schalldrucks (Pa) über die Zeit für ein Geräusch, (b1) des entsprechenden Frequenzspektrums nach der Fourier-Analyse und (b2) einer vergrößerten Darstellung des Frequenzspektrums, unterteilt in Frequenzbereiche mit der unteren (f_u) und der oberen (f_o) Eckfrequenz sowie der Mittenfrequenz (f_m) [13]	5
2.2	Umfrageergebnisse der Umweltbundesamt 2020 zur Lärmbelastigung in Deutschland in % [14]	6
2.3	Trichter-Modell zur Darstellung möglicher Szenarien [33]	14
3.1	Historische und projizierte Anteile an städtischer Bevölkerung in Deutschland, Europa und der Welt gemäß [24]	23
3.2	7,5-m Vorbeifahrpegel von ICE-Pkw (Internal Combustion Engine, ICE) und E-Pkw (BEV) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit gemäß [27]	26
3.3	Vergleich der Lärminderung von E-Pkw und Hybrid-Pkw in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit gemäß [45]	27
3.4	Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Pkw je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]	28
3.5	Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Lkw bis 3,5 t zGM je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]	29
3.6	Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Lkw über 3,5 t zGM je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]	30
3.7	Entwicklung des Bestandes bei Krafrädern je nach Antriebstechnologie gemäß [37]	30
3.8	Entwicklung der jährlich begrünten Dachflächen von 2009 bis 2023 in Deutschland gemäß [54]	34
3.9	Entwicklung der jährlich begrünten Fassadenflächen von 2019 bis 2023 in Deutschland gemäß [54]	34
3.10	Vergleich des frequenzabhängigen Verlaufs der Schallabsorptionsgrade gemäß der genannten drei Arbeiten [58],[59],[60]	35
3.11	Entwicklung des netto PV-Zuwachses in Deutschland [61]	36
3.12	Entwicklung der Personenverkehrsleistung auf der Straße im Referenzszenario [25],[37],[38],[39]	39
3.13	Entwicklung der Personenverkehrsleistung auf der Straße im Referenz- und im Stabilitätsszenario [25],[37],[38],[39]	40
3.14	Anstieg des Güterverkehrs im Referenz- und im Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2020 in %	46
3.15	Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche (gleitender Vier-Jahres-Durchschnitt), historisch und gemäß Referenzszenario nach [66],[24]	47

3.16	Entwicklung der Flächeninanspruchnahme im Referenz- und Stabilitätsszenario, gleitender Vier-Jahres-Durchschnitt und Zielwerte nach [24],[66],[67]	48
4.1	Prognostizierte Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tageszeitraum auf Autobahnen im Referenzszenario [70]	64
4.2	Prognostizierte Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tageszeitraum auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 bei einem Tempolimit von 120 km/h	64
5.1	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)	73
5.2	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)	73
5.3	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines städtischen Kreises (Tageszeitraum)	75
5.4	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines städtischen Kreises (Nachtzeitraum)	75
5.5	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen (Tageszeitraum)	77
5.6	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen (Nachtzeitraum)	77
5.7	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines dünn besiedelten ländlichen Kreises (Tageszeitraum)	79
5.8	Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines dünn besiedelten ländlichen Kreises (Nachtzeitraum)	79
5.9	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)	81
5.10	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)	82
5.11	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)	82
5.12	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)	83
5.13	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklung der Bebauungsdichte im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt	84
5.14	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklung der Bebauungsdichte im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt	84

5.15	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Gebäudeflächen im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt	85
5.16	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Gebäudeflächen im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (vergrößerter Kartenausschnitt aus Abbildung 5.15)	86
5.17	Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der Einführung eines Tempolimits von 120 km/h im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel eines städtischen Kreises	87
5.18	Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)	89
5.19	Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)	89
5.20	Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)	90
5.21	Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)	90
5.22	Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum) .	92
5.23	Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum) .	93
5.24	Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum) .	93
5.25	Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)	94
5.26	Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)	95
5.27	Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)	96
5.28	Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)	96
5.29	Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)	97
5.30	Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)	98
5.31	Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)	98
5.32	Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)	99

5.33 Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)	99
--	----

Tabellenverzeichnis

2.1	Immissionsgrenzwerte für die Lärmvorsorge in dB(A) nach 16. BImSchV [19]	7
2.2	Beurteilungspegel-Sanierungswerte für die Lärmsanierung an Bundesfernstraßen in dB(A) nach VLärmSchR97 [20]	7
2.3	Standardwerte für die stündliche Verkehrsstärke M in Kfz/h (in Abhängigkeit von der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke DTV in (Kfz/24h)) und den Anteil der Fahrzeuge der Fahrzeuggruppen Lkw-1 (p_1) und Lkw-2 (p_2) in % gemäß RLS-19 [16]	9
2.4	Beispiel der Einflussmatrix mit den Wirkungsgraden	17
2.5	Einflussfaktoren und deren Aktivsumme	18
3.1	Elektrischer Fahrleistungsanteil der Plug-in-Hybrid Elektrofahrzeuge nach [25] . .	31
3.2	Anteil der elektrifizierten Fahrleistung von Kraftfahrzeugen nach Straßenkategorie für das Jahr 2050	31
3.3	Fahrleistungsanteil im Gesamtverkehr Vergleich gemäß [38],[37],[25]	32
3.4	Prognose für die Straßenpersonenverkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) und Busverkehr im Referenzszenario vor der Pandemie nach [37]	38
3.5	Prognose der Straßenverkehrsleistung des MIV und des Busverkehrs (ÖPSV) im Referenzszenario unter Berücksichtigung der Homeoffice-Nutzung nach der Corona-Pandemie [39]	38
3.6	Veränderung der Verkehrsleistung im Stabilitätsszenario gegenüber dem Referenzszenario im Alltags- und Fernverkehr gemäß [25]	39
3.7	Prognose für die Personenverkehrsleistung im Referenz- und Stabilitätsszenario . .	40
3.8	Regressionsanalyse der Residuen des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	41
3.9	Regressionskoeffizienten des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	41
3.10	Modellstatistiken des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	42
3.11	Regressionsanalyse der Residuen des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	42
3.12	Regressionskoeffizienten des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	42
3.13	Modellstatistiken des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen	42
3.14	Prognose für die Verkehrsleistung und das Verkehrsaufkommen im Paketdienstverkehr im Referenzszenario bis 2026	43

3.15	Vergleich der Prognosen für den Paketdienstverkehr vor und nach der Corona-Pandemie im Referenzszenario für das Jahr 2050 [25],[26]	43
3.16	Gesamtberechnung des Straßengüterverkehrs im Referenzszenario für das Jahr 2050 basierend auf den Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Tabelle 3.15	44
3.17	Vergleich der Prognosen für den Paketdienstverkehr vor und nach der Corona-Pandemie im Referenz- und im Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 [25],[26]	45
3.18	Gesamtberechnung des Straßengüterverkehrs im Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 basierend auf den Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Tabelle 3.17	46
3.19	Entwicklung des Anteils der SuV-Flächen an der Bodenfläche in den siedlungsstrukturellen Kreistypen bis 2050 in den Szenarien und Vergleich Referenzszenario mit Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 in Prozentpunkten gemäß [24]	48
4.1	Regressionsanalyse der Residuen des Personenverkehrs mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung	49
4.2	Regressionskoeffizienten des Personenverkehrs mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung	50
4.3	Modellstatistiken des Personenverkehrs der Jahre 2010 bis 2021 mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung	50
4.4	Zunahme der DTV des Personenverkehrs für die Jahre 2030 bis 2050 gegenüber 2020 im Referenzszenario, berechnet nach Gleichung 4.1	50
4.5	Zunahme der DTV des Personenverkehrs bis zum Jahr 2050 gegenüber 2020 im Stabilitätsszenario, berechnet nach Gleichung 4.1	51
4.6	Regressionsanalyse der Residuen des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit den Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021	51
4.7	Regressionskoeffizienten des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021	52
4.8	Modellstatistiken des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021	52
4.9	Regressionsanalyse der Residuen des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit den Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019	52
4.10	Regressionskoeffizienten des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019	52
4.11	Modellstatistiken des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019	53
4.12	Anstieg der DTV des Güterverkehrs für das Referenz- und Stabilitätsszenario im Jahr 2050 gegenüber 2020, berechnet nach Gleichung 4.2	53
4.13	Prognostizierte Verkehrsleistung und Verkehrsaufkommen für Busse im Referenzszenario [25], [37], [38], [39]	54
4.14	Zunahme der DTV für Busse im Referenz- und Stabilitätsszenario bis 2050 im Vergleich zu 2020	54
4.15	Fahrleistungsanteil 2050 nach RLS-19 klassifiziert	55
4.16	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	55

4.17	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	55
4.18	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	56
4.19	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	56
4.20	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	57
4.21	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	57
4.22	Anstieg der Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen im Referenzszenario 2050 für den Tages- sowie Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	57
4.23	Anstieg der DTV auf Gemeindestraßen im Stabilitätsszenario 2050 für den Tages- sowie Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	58
4.24	Anstieg der DTV auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr	58
4.25	Anstieg der DTV auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	58
4.26	Anstieg der DTV auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr	58
4.27	Anstieg der DTV auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	58
4.28	Anstieg der DTV auf Bundesstraße im Referenzszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.29	Anstieg der DTV auf Bundesstraße im Referenzszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.30	Anstieg der DTV auf Bundesstraßen außerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.31	Anstieg der DTV auf Bundesstraßen außerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.32	Anstieg der DTV auf Bundesstraßen innerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.33	Anstieg der DTV auf Bundesstraßen innerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr	59
4.34	Grundwerte des Schalleistungspegels ($L_{W0,FzG}(v_{FzG})$) der drei Fahrzeuggruppen bei unterschiedlichen konstanten Geschwindigkeiten auf ebener, trockener Fahrbahn gemäß RLS-19 [16]	60
4.35	Vorbeifahrpegel in 7,5 m $dB(A)$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für Pkw und Lkw über 3,5 t zGM sowie für Busse mit und ohne Elektroantrieb und jeweils die Differenzen nach [27]	60
4.36	Subtraktion der Schalleistungspegel der Fahrzeuge $L_{W,FzG}(v_{FzG})$ von den Vorbeifahrpegeldifferenzen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Fahrzeugklassifizierung nach RLS-19 [16]	61

4.37	Anteile der Fahrzeuggruppen mit und ohne Elektroantrieb am Gesamtverkehr im Referenz- und Stabilitätsszenario 2050 auf Gemeindestraßen im Innerortsverkehr sowie Schalleistungspegel der Fahrzeuge bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h bis 50 km/h	62
4.38	Längenbezogenen Schalleistungspegeldifferenzen durch elektrifizierte Kraftfahrzeuge im Jahr 2050 für das Referenz- und das Stabilitätsszenario	63
4.39	Längenbezogene Schalleistungspegel und Schalleistungspegeldifferenzen mit und ohne Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen für das Referenz- und das Stabilitätsszenario 2050 (Basisjahr 2020 mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)	65
4.40	Entwicklung der Anteile der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Bodenfläche nach siedlungsstrukturellen Kreistypen im Referenz- und Stabilitätsszenario 2050 nach [24] gegenüber dem Basisjahr 2020 nach [68](sowie in %-Punkten)	66
4.41	Reflexionsverlust bei vollständig begrünter Fassadenfläche und 55% begrünter Fassadenfläche gemäß der genannten drei Arbeiten [59], [60], [58]	67
4.42	Prognose der Dach- und Fassadenflächen für PV-Anlagen bis 2050 gemäß [64],[73]	70
5.1	Bandbreite der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV), der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und des Straßendeckschichttyps für die verschiedenen Straßenarten	72
5.2	Zusammenfassende Darstellung der Pegeldifferenzen und Einflussfaktoren für den Zeithorizont 2050	101
A.1	Einflussmatrix	116
B.1	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h	117
B.2	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h	117
B.3	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	118
B.4	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	118
B.5	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	118
B.6	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	119
B.7	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	119
B.8	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	119
B.9	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 500 Kfz/24h	120

B.10	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 500 Kfz/24h	120
B.11	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)	120
B.12	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)	121
B.13	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)	121
B.14	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)	121
B.15	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 10000 Kfz/24h	122
B.16	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 10000 Kfz/24h	122
B.17	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)	122
B.18	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)	123
B.19	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)	123
B.20	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)	123
B.21	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Tageszeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h	124
B.22	Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h	124
B.23	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	124
B.24	Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	125
B.25	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße außerhalb für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	125
B.26	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße außerhalb für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	125
B.27	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	126
B.28	Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)	126
C.1	Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum bei Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]	127

C.2	Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum ohne Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]	128
C.3	Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum bei Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]	129
C.4	Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum ohne Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]	130

Nomenklatur

Abkürzungen

AVAS	Akustisches Fahrzeug-Warnsystem (Acoustic Vehicle Alerting System)
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BIPV	Bauwerkintegrierte Photovoltaik
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BuGG	Bundesverband zur Gebäudebegrünung
CNG	Komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas)
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz/24h
E-Kfz	Kraftfahrzeug mit Elektromotor
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FCEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug
FzG	Fahrzeuggruppe
HEV	Hybrid-Elektrofahrzeug
ICE-Kfz	Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine)
IW	Institut der deutschen Wirtschaft
KBA	Kraftfahrt Bundesamt

KEP	Kurier-, Express- und Paket
Lkw	Lastkraftwagen
LNf	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas)
LPG	Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
PHEV	Plug-In-Hybrid Elektrofahrzeug
Pkm	Personenkilometer
PtG	Power-to-Gas Kraftstoffe
PtL	Power-to-Liquid Kraftstoffe
PV	Photovoltaik
RLS-19	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
tkm	Tonnenkilometer
UBA	Umweltbundesamt
VLärmSchR97	Richtlinien für den Verkehrslärmschutz an Bundesfernstraße
zGM	zulässige Gesamtmasse
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr

Symbole

a	Schallabsorptionsgrad
D_A	Dämpfung bei der Schallausbreitung in dB
$D_{K,KT}$	Knotenpunktkorrektur für den Knotenpunkttyp KT in dB
$D_{LN(g)}$	Korrektur für die Längsneigung g in dB

D_{refl}	Zuschlag für die Mehrfachreflexion in dB
$D_{RV1/2}$	Anzusetzender Reflexionsverlust der ersten bzw. zweiten Reflexion bei Spiegelschallquellen in dB
$D_{SD,SDT}$	Straßendeckschichtkorrektur für den Straßendeckschichttyp in dB
DL_{RI}	Einzahl-Angabe zur Schallabsorption in einem gerichteten Schallfeld in dB
GW	Gigawatt
GWp	Gigawatt Peak
L''_r	Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Parkplatzflächen in dB
L''_W	Flächenbezogener Schalleistungspegel in dB
L'_r	Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Fahrstreifen in dB
L'_W	Längenbezogener Schalleistungspegel in dB
L_r	Beurteilungspegel in dB
$L_{r,N}$	Beurteilungspegel für den Nachtzeitraum (22.00-06.00 Uhr) in dB
$L_{r,T}$	Beurteilungspegel für den Tageszeitraum (06.00-22.00 Uhr) in dB
$L_{W,FzG}$	Schalleistungspegel für Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe in dB
$L_{W0,FzG}$	Grundwert für den Schalleistungspegel eines Fahrzeuges der Fahrzeuggruppe in dB
R^2	Bestimmtheitsmaß
$U_{95\%}$	Erweiterte Messunsicherheit bei einem Signifikanzniveau von 95 %
Lkw-1	Lastkraftwagen ohne Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t sowie Busse (p_1)
Lkw-2	Lastkraftwagen mit Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge (Zugmaschinen mit Auflieger) mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t sowie Krafträder (p_2)
M	Stündliche Verkehrsstärke in Kfz/h
Pkw	Personenkraftwagen, Personenkraftwagen mit Anhänger, Lieferwagen (Güterkraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t)
v_{FzG}	Geschwindigkeit eines Fahrzeuges der Fahrzeuggruppe in km/h

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die globale Erwärmung führt zum Klimawandel, wobei der Verkehrssektor mit seinem CO_2 Ausstoß einen der wichtigsten Faktoren darstellt. Deshalb sieht die Europäische Kommission eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor um 90 % bis 2050 im Vergleich zu 1990 vor [1]. Das deutsche Klimaschutzgesetz setzt das Ziel, bereits bis 2045 eine Reduzierung um mindestens 90 % zu erreichen, mit einem Zwischenziel für das Jahr 2030. Die Berichte der Bundesregierung aus dem Jahr 2021 besagen, dass die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors mit den derzeitigen Maßnahmen bis 2030 das Klimaziel nicht erreichen werden. Der Verkehr ist der einzige Sektor, der bisher keine Erfolge bei der Reduzierung der Emissionen erzielt hat, besonders der Straßenverkehr weist die höchste Emissionsrate auf [2].

Der Fokus der Klimaschutzziele liegt auf den Emissionen des Verkehrssektors, die gesundheitsschädlich sein können. Jedoch wird der Lärm, der ebenfalls physiologische und psychische Störungen verursachen kann, außer Acht gelassen. Insbesondere wenn die Lärmbelastung über einen langen Zeitrahmen hinweg besteht, kann dies zu chronischen Krankheiten wie Bluthochdruck, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schwächung des Immunsystems führen [3].

Eine im Jahr 2020 durchgeführte Umfrage zeigt, dass drei Viertel der Bevölkerung nicht nur von verkehrsbedingten Umweltverschmutzungen betroffen sind, sondern sich auch durch den Straßenverkehrslärm belästigt oder gestört fühlen [4]. Auch eine aktuelle Umfrage im Jahr 2023 zeigt, dass keine Veränderung bei der Lärmbelästigung durch Straßenverkehrslärm stattgefunden hat [5]. Des Weiteren belegen die Forschungen eine soziale Ungerechtigkeit, dass Menschen mit geringem Einkommen in höherem Maße von Lärm betroffen sind als sozial besser Gestellte [2]. Dies verdeutlicht, dass in den vergangenen Jahren keine effektive Bekämpfung des Lärms möglich war.

Um diese Probleme zu beheben, ist eine umfassende Transformation des Verkehrssektors dringend notwendig. Eine effektive Umsetzung in der Zukunft muss insbesondere durch langfristige Entwicklungen und Veränderungen in allen Bereichen der Wirtschaft, Gesellschaft, Politik und Technik erfolgen. Dies hat zur Folge, dass Entwicklungen grundsätzlich durch Komplexität gekennzeichnet sein werden, was wiederum zu einem hohen Maß an Planungsunsicherheit für zukünftige Maßnahmen führen kann.

Vor diesem Hintergrund stellt die Szenariotechnik sowohl in der Wirtschaft als auch in staatlichen Organisationen eine Methode für Zukunftsforschungen dar. Sie ist eine der wichtigsten Techniken der Zukunftsforschung und ein wirkungsvolles Instrument der Entscheidungsfindung angesichts großer Unsicherheiten.

Szenarien bilden nicht einen einzigen zukünftigen Endzustand ab, sondern zeigen uns Wege in die Zukunft, die von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt werden können. Dies bedeutet, dass es nicht nur einen möglichen Weg gibt, sondern dass verschiedene alternative Wege und Vorstellungen von der Zukunft existieren [6].

1.2 Ziel und Vorgehensweise

In allen Bereichen der Wirtschaft gibt es bereits zahlreiche Zukunftsforschungen. Auch in Bezug auf das Thema Lärmschutz gibt es ein umfangreiches Spektrum an Forschungsarbeiten, welche sich mit der Lärminderung befassen. Da es jedoch nur wenige Untersuchungen zu langfristigen Betrachtungszeiträumen im Straßenverkehrslärm gibt (siehe Kapitel 1.3), konzentriert sich die vorliegende Forschung auf die Entwicklung des Straßenverkehrslärms für das Jahr 2050. Sie stellt zugleich ein Instrument für die zukünftige Stadtplanung der Lärmbekämpfung dar.

Als Grundlage für die Prognosemodelle wird zum einen der Zeithorizont „2050“ gewählt, wobei dieser nicht im kalendarischen Sinne gemeint ist. Vielmehr wird bewusst mit einem Betrachtungszeitraum gearbeitet, der die aktuell diskutierten politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Planungs- und Entscheidungsprozesse berücksichtigt. Zum anderen werden als Schlüsselfaktoren Megatrends ausgewählt, die einen hohen Wirkungsgrad auf den Straßenverkehrslärm aufweisen und in der Fachwelt als wahrscheinlich angenommen werden. Diese Megatrends werden in einer Einflussmatrix analysiert. Aus der aktiven Summe dieser Analyse wird anschließend eine Indikator-Reihenfolge bestimmt. Unter Berücksichtigung aktueller Daten werden bereits bestehende nationale Verkehrsszenarien und sozioökonomische Szenarien, die mit dieser ermittelten Indikator-Reihenfolge übereinstimmen, in die Untersuchung integriert. In diesen Szenarien werden auch Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion aus den Bereichen Verkehr und Gebäude berücksichtigt, die die Entwicklung des Straßenverkehrslärms bis 2050 prognostizieren.

Es werden zwei Szenarien vorgestellt: ein Referenzszenario und ein Stabilitätsszenario. Dabei wird der Bevölkerungsstand in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf 77 Millionen zurückgehen (Statistisches Bundesamt, 13. Bevölkerungsvorausberechnung Variante 2). Es wird von einer jährlichen Nettozuwanderung von 200.000 Personen ausgegangen. Das Bruttoinlandsprodukt wird bis zum Jahr 2025 um 1 % pro Jahr wachsen und in den nachfolgenden Jahren um 0,8 %. Die Nachfrage nach elektrifizierten Fahrzeugen wird durch Effizienz- und Produktivitätssteigerungen gefördert, wodurch der Bestand an elektrifizierten Fahrzeugen zunimmt. Bis 2050 wird ein generelles Tempolimit auf Autobahnen eingeführt. Die Nachfrage nach Photovoltaikmodulen und die Begrünung von Gebäudeflächen nehmen weiter zu.

Das Referenzszenario beschreibt die zukünftige Entwicklung, wenn keine neuen Entscheidungen getroffen und Maßnahmen ergriffen werden. Dabei werden die Klimaschutzziele im Jahr 2050 verfehlt und deutlich verzögert. Aufgrund der demografischen Entwicklung wird der Personenverkehr abnehmen. Der Güterverkehr dagegen wird vor allem durch die Globalisierung und den Online-Handel zunehmen. Eine Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene wird dabei nur in geringem Umfang möglich sein. Das Ziel, die Flächeninanspruchnahme zu reduzieren, kann nicht erreicht werden.

Im Stabilitätsszenario werden demgegenüber ambitionierte Maßnahmen umgesetzt, um das Klimaschutzziel zu erreichen. Mit u.a. diesen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie zur Effizienzsteigerung im Transportwesen werden die Klimaschutzziele im Jahr 2050 erreicht. Der Verkehr wird Treibhausgasneutral und die Verkehrsinfrastruktur wird gestärkt. Das Bewusstsein der Bevölkerung für die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und für den Umweltschutz wird gestärkt. Der motorisierte Individualverkehr nimmt ab und der öffentliche Verkehr zu. Ein großer Teil des Güterverkehrs kann auf die Schiene verlagert werden. Zudem werden brachliegende Siedlungsflächen einer neuen Nutzung zugeführt, um das Ziel der Flächeninanspruchnahme bis 2050 zu erreichen.

Die Daten dieser Szenarien werden durch statistische Analysen in quantitative Prognosedaten überführt, die als Berechnungsgrundlage für den zukünftigen Straßenverkehrslärm relevant sind. Die Verkehrsstärken werden mithilfe von Regressionsanalysen prognostiziert und nach Fahrzeuggruppen, Tages- und Nachtzeiten sowie Straßentypen unterteilt. Die Entwicklungen der siedlungsstrukturellen Kreistypen werden durch Trendlinien bestimmt. Dabei werden der Anteil elektrifizierter Kraftfahrzeuge abhängig von inner- und außerörtlichen Fahrten sowie die Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen in die Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegel einbezogen, um das jeweilige Schallminderungspotenzial zu ermitteln. Zusätzlich werden die Anteile der Gebäudeflächen mit Begrünung und PV-Modulen bis zum Jahr 2050 prognostiziert und deren Schallabsorptionseigenschaften berücksichtigt.

Als Grundlage für die Prognosemodelle werden anschließend städtebauliche Übersichtspläne simuliert. Sie befassen sich mit aktuellen Planungssituationen in der Bestandsentwicklung von allgemeinen Wohngebieten in kreisfreien Großstädten, städtischen Kreisen sowie in ländlichen Kreisen. Diese Situationen werden als grafische Entwürfe dargestellt und mit verschiedenen Schallquellen des Straßenverkehrs kombiniert: Gemeindestraßen, Bundesstraßen, Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen sowie Bundesautobahnen.

Abschließend werden auf Grundlage der Übersichtspläne zur aktuellen Planungssituation die Prognosemodelle für das Referenz- und das Stabilitätsszenario simuliert, wobei die quantifizierten Prognosedaten angewendet werden. Gemäß RLS-19 werden zu jedem Übersichtsplan der Prognosemodelle die zugehörigen Schallimmissionspläne für Tages- und Nachtzeitraum berechnet. Die Pegeldifferenzen zwischen der Ausgangssituation und der zukünftigen Situation werden miteinander verglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Lärminderungseffekte sowie der veränderten Schallausbreitungsbedingungen erfolgt eine qualitative Bewertung anhand einer festgelegten Skala.

1.3 Stand des Wissens

Die Frage nach der zukünftigen Entwicklung der Lärmbelastung in Städten ist seit vielen Jahren von großem Interesse.

Bereits 1994 zeigte die Arbeit von Ullrich Siegfried, dass die Lärmbelastung an Straßen seit 1975 kontinuierlich zugenommen hat: um 2,5 dB an Autobahnen und um 1,5 dB an Bundes- und Kreisstraßen. Die Zunahme wurde vor allem auf das gestiegene Verkehrsaufkommen zurückgeführt, wobei auf Autobahnen auch höhere Geschwindigkeiten eine Rolle spielen. Darüber hinaus wurde langfristig ein Anstieg der Lärmbelastung bis zum Jahr 2010 um weitere 1 dB bis 2 dB prognostiziert [7].

Im Jahr 2012 wurde die Arbeit „Die Zukunft der akustischen Landschaft der Schweiz - eine Analyse der langfristigen Megatrends“ veröffentlicht, die sich mit den langfristigen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, politischen und technologischen Veränderungen im Jahr 2050 und deren Auswirkungen auf die Lärmsituation in der Schweiz befasst. Die Ergebnisse wurden qualitativ dokumentiert und bewertet. Sie zeigen verschiedene Trends auf, wie beispielsweise das prognostizierte Bevölkerungswachstum, das bis zum Jahr 2050 zu einer Erhöhung des Verkehrslärms führen wird. Weiterhin wurde prognostiziert, dass technologische Fortschritte im Bereich der Materialtechnologie zu einer Reduzierung des Verkehrslärms führen werden. Demgegenüber wird die Globalisierung zu einer Erhöhung des Verkehrslärms beitragen, da sie zu einem interkulturellen Zusammenleben führt [8].

Im Jahr 2018 wurde für die schwedische Stadt Göteborg die Untersuchung „Szenarien zur Verringerung des Straßenverkehrslärms in Göteborg 2015 - 2035“ veröffentlicht. Darin wurde zunächst ein Referenzszenario für das Jahr 2030 entwickelt, in dem die Verkehrs- und Bevölkerungsentwicklung der Jahre 1975 bis 2015 auf das Jahr 2030 extrapoliert wurde: ein jährliches Verkehrswachstum von 1,4 %, das sich gleichmäßig auf das Straßennetz verteilt, und ein jährliches Bevölkerungswachstum von 0,8 %. Basierend auf dem Referenzszenario wurden sechs Szenarien entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener Lärmreduzierungsstrategien für Straßenverkehrslärm in Göteborg zu untersuchen. Im ersten Szenario wird davon ausgegangen, dass alle neuen Wohngebäude bis 2030 nur in ruhigen Gebieten mit einem Beurteilungspegel unter 45 dB gebaut werden. Das zweite Szenario geht davon aus, dass alle neuen Reifen, die nach 2015 auf Fahrzeuge montiert werden, lärmarme Reifen sind. Im dritten Szenario werden 8 % der jährlich neu zugelassenen Fahrzeuge elektrisch angetrieben. Im vierten Szenario werden die Geschwindigkeiten auf 10 km/h bis 30 km/h reduziert. Im fünften Szenario wird das Verkehrsaufkommen nach den Klimaschutzzielen der schwedischen Verkehrsplanungen reduziert, wobei der Schwerpunkt auf dem Schwerlastverkehr liegt. Im sechsten Szenario werden 50 % aller neuen Fahrbahnbeläge lärmarm eingebaut. Die Ergebnisse zeigen, dass Maßnahmen mit lärmarmen Reifen und lärmarmen Fahrbahnbelägen die Lärmbelastung bis 2030 am wirksamsten reduzieren. Eine Geschwindigkeitsreduzierung auf 10 km/h führt ebenfalls zu einer wirksamen Lärmreduzierung, allerdings steigt die Zahl der von Lärm betroffenen Einwohner aufgrund der Verkehrs- und Bevölkerungszunahme bis 2030 wieder auf das Niveau von 2015 an. Eine Reduktion des Verkehrsaufkommens führt hingegen zu keiner signifikanten Lärmreduzierung

und die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte reduziert die Antriebsgeräusche nur bei niedrigen Geschwindigkeiten [9].

Im Jahr 2019 hat die Europäische Umweltagentur eine Zukunftsforschung für 28 europäische Länder veröffentlicht, in der die Lärmbelastung der Bevölkerung für das Jahr 2020 sowie für das Jahr 2030 untersucht wurde. Untersucht wurden Straßen-, Schienen-, Flug- und Gewerbelärm sowohl innerorts als auch außerorts. Als Grenzwerte gelten ein Beurteilungspegel von mehr als 55 dB am Tag und mehr als 50 dB in der Nacht für die Anzahl der Einwohner mit Wohnungen an der Außenwand. Die Szenarien berücksichtigen politische, demografische und wirtschaftliche Entwicklungen sowie gezielte Maßnahmen der Verkehrs- und Flächennutzung. Der Beurteilungspegel in den Szenarien wurde durch eine relative Betrachtung des Verkehrsaufkommens ermittelt: eine Verdoppelung des Verkehrsaufkommens führt zu einem Anstieg des Lärmpegels um 3 dB. Der Zusammenhang zwischen Verkehrsaufkommen und dB-Anstieg wurde in Abhängigkeit von der jeweiligen Zunahme des Verkehrsaufkommens mit einem generellen Prozentsatz quantifiziert. Des Weiteren wurde der Anteil der elektrifizierten Fahrzeuge mit 50 % angenommen, wobei eine Verbesserung von 0,4 dB berechnet wurde. Die Ergebnisse sind als prozentuale Zunahme der Bevölkerung in Abhängigkeit von der Lärmbelastung dargestellt, die über den Grenzwerten liegt. Beispielsweise sind 2030 gegenüber 2017 tagsüber 16,4 % außerorts und 7,8 % innerorts mehr Menschen von Straßenverkehrslärm betroffen. Gleichzeitig sind 8,7 % außerorts und 11,8 % innerorts von Schienenverkehrslärm betroffen [10].

In Deutschland wird von Eggers et al. (2024) die Forschung „Lärminderungspotenziale in Deutschland im Rahmen des „Zero Pollution Action Plan“ durchgeführt. Ziel dieser Forschung ist es, die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln in den Bereichen Lärminderung und Mobilitätsplanung zu untersuchen. Dabei werden drei Szenarien für die Jahre 2030 und 2040 vorgestellt. Im Szenario „Do-nothing“ werden keinerlei Lärmschutzmaßnahmen umgesetzt, im Szenario „Business-as-usual“ werden die Maßnahmen als Mittelwert angenommen und im Szenario „Optimistic“ werden die Maßnahmen verdoppelt. Die Auswirkungen bundesweit geplanter Lärminderungsmaßnahmen, technologischer Entwicklungen sowie der Verkehrs- und Bevölkerungsentwicklung auf die Lärmemissionen und -immissionen werden jeweils für den Straßen-, Schienen- und Luftverkehr abgeschätzt und modelliert. Die Ergebnisse werden in naher Zukunft in ein Modell einfließen, mit dem bundesweit Maßnahmen auf der Grundlage der Lärmkartierung getrennt nach Straßenkategorien (Bundesstraßen, Bundesautobahnen und sonstige Straßen) und Geschwindigkeitsbereichen bewertet werden können [11].

Des Weiteren werden von Kommunen und Institutionen (Behörden) Prognosen zum Straßenverkehrslärm erarbeitet, die im Bereich der Stadt- und Verkehrsplanung für die Lärmaktionsplanung herangezogen werden. Diese Prognosen basieren auf einer Annahme von 1 % Wachstum der durchschnittlichen jährlichen Verkehrsstärke, wobei jedoch Erfahrungen mit Szenarioanalysen fehlen.

Darüber hinaus untersuchen zahlreiche Forschungen, wie beispielsweise „Die Mobilitätskonzepte für einen nachhaltigen Stadtverkehr 2050: Metaanalyse, Maßnahmen und Strategien (2023)“, wie in Zukunft nachhaltige und lebenswerte urbane Räume erschaffen werden können. Dabei werden Maßnahmen identifiziert, die Schadstoff- und Lärmemissionen reduzieren können [12]. Des Weiteren wird intensiv an Lärminderungsmaßnahmen geforscht, die darauf abzielen, innovative Lösungen zu entwickeln, um die Lärmbelastung in städtischen Gebieten langfristig zu reduzieren. Dabei werden verschiedene Ansätze verfolgt, wie die Verbesserung von Mobilitätskonzepten, der Einsatz nachhaltiger Fassaden sowie die Entwicklung neuer Materialtechnologien für Fahrbahneläge.

Kapitel 2

Methodische Grundlagen

2.1 Straßenverkehrslärm

Töne werden als Schallvorgänge definiert, die aus einer einzigen Sinusschwingung bestehen. In der Natur sind jedoch kaum reine Töne anzutreffen.

Ein **Geräusch** wird im Allgemeinen als Überlagerung einer Vielzahl von Tönen definiert, die in der Regel ein kontinuierliches Frequenzspektrum aufweisen. Mit Hilfe der Fourier-Analyse wird das Frequenzspektrum in Oktaven oder häufiger in Terzen zerlegt, die jeweils durch ihre Mittenfrequenzen (f_m) sowie ihre unteren (f_u) und oberen (f_o) Eckfrequenzen beschrieben werden (vgl. Abbildung 2.1)[13].

Wird der Schalldruckpegel von Geräuschen als störend empfunden oder ist er gar gesundheitsschädlich, so wird dies als **Lärm** bezeichnet.

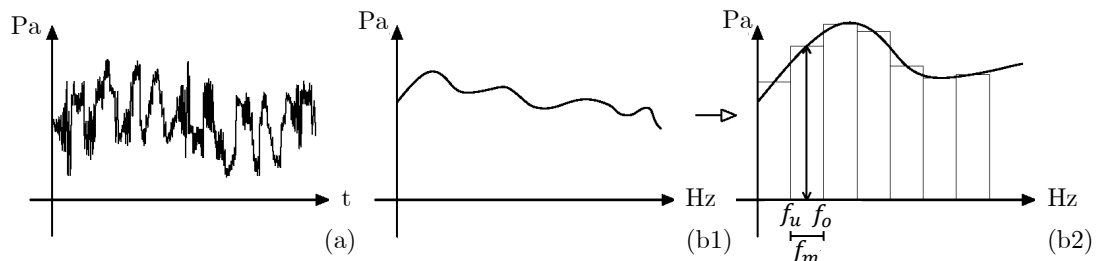


Abbildung 2.1: Darstellung (a) eines Zeit-Amplituden-Diagramms des Schalldrucks (Pa) über die Zeit für ein Geräusch, (b1) des entsprechenden Frequenzspektrums nach der Fourier-Analyse und (b2) einer vergrößerten Darstellung des Frequenzspektrums, unterteilt in Frequenzbereiche mit der unteren (f_u) und der oberen (f_o) Eckfrequenz sowie der Mittenfrequenz (f_m) [13]

Umgebungslärm sind unerwünschte oder gesundheitsschädliche Geräusche, die durch menschliche Aktivitäten im Freien verursacht werden. Dazu gehören insbesondere der Lärm von Verkehrsmitteln wie Straßen-, Schienen- und Flugverkehr sowie von industriellen Tätigkeiten. Diese Lärmemissionen beeinträchtigen das physische, psychische und soziale Wohlbefinden der Betroffenen und können bei langfristiger Belastung zu chronischen Krankheiten wie Bluthochdruck, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Schwächung des Immunsystems führen [3].

Die Wahrnehmung von Lärm ist jedoch subjektiv und hängt von individuellen und sozialen Faktoren ab. Neben der Lautstärke zählen dazu beispielsweise die Personenzahl im Haushalt (Alleinlebende, Familienwohnung oder Wohngemeinschaft), das Alter, das Hörvermögen, die Geräuschempfindlichkeit sowie bestehende gesundheitliche Einschränkungen. Auch die Aufenthaltsqualität und die Bedingungen im Wohnumfeld spielen eine entscheidende Rolle.

Eine im Jahr 2020 durchgeführte Umfrage zeigte, dass sich rund drei Viertel der Bevölkerung durch Straßenverkehrslärm belästigt oder gestört fühlen (vgl. Abbildung 2.2) [4]. Weitere 34 %

der Bevölkerung fühlen sich durch Schienenverkehrslärm belästigt und 43 % durch Fluglärm. Eine aktuelle Umfrage aus dem Jahr 2023 bestätigt, dass keine Verbesserung der Lärmbelästigung durch Straßenverkehrslärm eingetreten ist [5]. Der Straßenverkehrslärm ist damit nach wie vor die Hauptquelle der Lärmbelästigung.

Die Fragestellung der Umfrage war, wie stark sich die Befragten persönlich durch die folgenden Lärmquellen gestört oder belästigt fühlen.

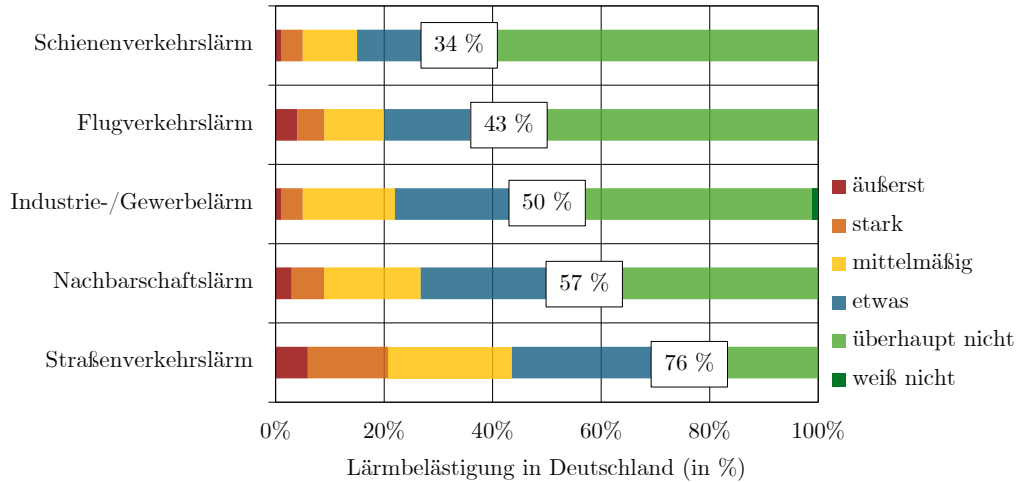


Abbildung 2.2: Umfrageergebnisse der Umweltbundesamt 2020 zur Lärmbelästigung in Deutschland in % [14]

Die Ursachen des wachsenden Straßenverkehrslärms liegen in der zunehmenden Verkehrsdichte, der Zunahme des Güterverkehrs und der Belastung durch Gewerbebetriebe. Trotz technischer Fortschritte und gesetzlicher Maßnahmen bleibt der Straßenverkehrslärm in Deutschland eine erhebliche Belastung [15].

Zum Schutz vor Verkehrslärm werden aktive und passive Maßnahmen unterschieden. Aktive Maßnahmen, wie der Einsatz von Lärmschutzwänden und -wällen, lärmindernden Fahrbahnbelägen und die Sanierung von beschädigten Fahrbahnen, zielen darauf ab, die Lärmentstehung zu verhindern oder zu reduzieren. Passive Maßnahmen verringern die Einwirkung des Lärms auf die Betroffenen. Dazu zählen bauliche Verbesserungen an den Umfassungsbauteilen schutzbedürftiger Räume, wie der Einbau von Schallschutzfenstern oder spezielle Lüftungsanlagen, wenn der vorhandene bauliche Schallschutz nicht ausreicht. Darüber hinaus können Maßnahmen wie die Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und die Verstetigung des Verkehrsflusses (um Brems-, Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge zu minimieren) ergriffen werden.

Auch die Ausrichtung und Anordnung der Bebauung beeinflusst die Schallausbreitung des Straßenverkehrslärms, wobei die offene oder geschlossene Bauweise eine wichtige Rolle spielt. Eine offene Bebauung ermöglicht den Durchgang des Schalls durch Baulücken, sodass keine ruhigen Zonen entstehen können. Im Gegensatz dazu wirkt eine geschlossene Bebauung als Abschirmeinrichtung und schützt die dahinterliegenden Flächen und Gebäude umso wirksamer, je länger und höher die Bebauung ist [16].

Um die schädlichen Auswirkungen von Umgebungslärm zu minimieren, hat die Europäische Union im Jahr 2002 die Richtlinie 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, auch bekannt als „EU-Umgebungslärmrichtlinie“, erlassen. Die Umgebungslärmrichtlinie wurde im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG [17]) und in der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV [18]) in nationales Recht umgesetzt. Diese verpflichtet die Mitgliedstaaten, strategische Lärmkarten zu erstellen und zu veröffentlichen. In Deutschland sind die zuständigen Behörden nach dem BImSchG gesetzlich verpflichtet, Lärmaktionspläne aufzustellen, um Lärmprobleme und Lärmauswirkungen für die in der Lärmkartierung erfassten Straßen zu regeln. Die in den Lärmaktionsplänen vorgesehenen Lärminderungsmaßnahmen sind nach den gesetzlichen Vorgaben umzusetzen.

Beim Neubau oder der wesentlichen Änderung von Straßen wird die Lärmvorsorge mit der gesetzlichen Grundlage BImSchG und der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV [19]) geregelt.

Um unzumutbare Einwirkungen durch Verkehrslärm zu vermeiden, sind in der 16. BImSchV Immissionsgrenzwerte für den Straßenverkehrslärm festgelegt. Beispielsweise gelten in allgemeinen Wohngebieten tagsüber 59 dB(A) und nachts 49 dB(A) (vgl. Tabelle 2.1).

in dB(A)	Tag 06.00-22.00 Uhr	Nacht 22.00-6.00 Uhr
an Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen	57	47
in reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	59	49
in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	64	54
in Gewerbegebieten	69	59

Tabelle 2.1: Immissionsgrenzwerte für die Lärmvorsorge in dB(A) nach 16. BImSchV [19]

Die Lärmsanierung an bestehenden Straßen, an denen keine baulichen Änderungen vorgesehen sind, wird als freiwillige Leistung auf der Grundlage haushaltsrechtlicher Regelungen durchgeführt. Für die Verwaltung der Bundesfernstraßen gelten die „Richtlinien für den Verkehrslärmschutz an Bundesfernstraßen“ (VLärmSchR97 [20]). Dabei geht es um die Bewältigung des Straßenverkehrslärms in einer durch die verkehrliche und bauliche Entwicklung „gewachsenen“ und „verfestigten“ Situation. Danach werden Lärmschutzmaßnahmen nur bei Überschreitung der in der Tabelle 2.2 aufgeführten Sanierungswerte und nach Verfügbarkeit von Haushaltsmitteln durchgeführt [21].

in dB(A)	Tag 06.00-22.00 Uhr	Nacht 22.00-6.00 Uhr
an Krankenhäusern, Schulen, Altenheimen, in reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	70	60
in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	72	62
in Gewerbegebieten	75	65

Tabelle 2.2: Beurteilungspegel-Sanierungswerte für die Lärmsanierung an Bundesfernstraßen in dB(A) nach VLärmSchR97 [20]

Ein Berechnungsverfahren zur quantitativen Darstellung der Lärmbelastung sowie die lärmtechnische Planung und Umsetzung von Maßnahmen an Straßen erfolgt nach den „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen“ (RLS-19 [16]). Der Beurteilungspegel L_r beschreibt die Schallemissionen und berücksichtigt sowohl die Schalleinträge aller Fahrstreifen L'_r (über den längenbezogenen Schalleistungspegel L'_{W_r}) als auch Parkplatzflächen¹ L''_r (über den flächenbezogenen Schalleistungspegel L''_{W_r}) (siehe Gleichung 2.1). Der Beurteilungspegel wird getrennt für den Tag $L_{r,T}$ (Zeitraum von 06.00 bis 22.00 Uhr) und die Nacht $L_{r,N}$ (Zeitraum von 22.00 bis 06.00 Uhr) berechnet².

$$L_r = 10 \cdot \lg[10^{0.1 \cdot L'_r} + 10^{0.1 \cdot L''_r}] \quad (2.1)$$

mit	L_r	Beurteilungspegel in dB
	L'_r	Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Fahrstreifen in dB
	L''_r	Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Parkplatzflächen in dB

¹In der vorliegenden Arbeit wird der flächenbezogene Schalleistungspegel nicht weiter betrachtet. Das Berechnungsverfahren kann der RLS-19 entnommen werden.

²In der Richtlinie RLS-19 wird ausschließlich mit A-bewerteten Schallpegeln gerechnet. Zur Vereinfachung wird am Symbol „L“ der Index „A“ fortgelassen. Auch in dieser Forschung wird dieser Verzicht beibehalten, wobei alle Berechnungen und Ergebnisse A-bewertet sind.

Die Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Fahrstreifen und Parkplätze werden unter Berücksichtigung der Schallausbreitungsbedingungen, beispielsweise durch Abschirmungen, Reflexionsminderungen und Reflexionen, berechnet (vgl. Gleichung 2.2) [16].

$$L'_r = 10 \cdot \lg \sum 10^{0.1 \cdot (L'_W + 10 \cdot \lg[l_i] - D_{A,i} - D_{RV1,i} - D_{RV2,i})} \quad (2.2)$$

mit	L'_r	Beurteilungspegel für die Schalleinträge aller Fahrstreifen in dB
	$L'_{W,i}$	Längenbezogener Schalleistungspegel des Fahrstreifenteilstücks i
	l_i	Länge des Fahrstreifenteilstücks in m
	$D_{A,i}$	Dämpfung bei der Schallausbreitung vom Fahrstreifenteilstück i zum Immissionsort in dB
	$D_{RV1,i}$	Anzusetzender Reflexionsverlust bei der ersten Reflexion für das Fahrstreifenteilstück i in dB (nur bei Spiegelschallquellen)
	$D_{RV2,i}$	Anzusetzender Reflexionsverlust bei der zweiten Reflexion für das Fahrstreifenteilstück i in dB (nur bei Spiegelschallquellen)

Der längenbezogene Schalleistungspegel einer Quelllinie L'_w wird durch die Verkehrsstärke M , die Schalleistungspegel der einzelnen Fahrzeuge $L_{W,FzG}(v_{FzG})$, die Anteile an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppen (Pkw, Lkw-1 und Lkw-2) und die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge v_{FzG} bestimmt. Er berechnet sich mit der Gleichung 2.3 [16].

$$L'_W = 10 \cdot \lg[M] + 10 \cdot \lg \left[\frac{100 - p_1 - p_2}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,Pkw}(v_{Pkw})}}{v_{Pkw}} + \frac{p_1}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,Lkw1}(v_{Lkw1})}}{v_{Lkw1}} + \frac{p_2}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,Lkw2}(v_{Lkw2})}}{v_{Lkw2}} \right] - 30 \quad (2.3)$$

mit	L'_W	Längenbezogener Schalleistungspegel in dB
	M	Stündliche Verkehrsstärke in Kfz/h
	$L_{W,FzG}(v_{FzG})$	Schalleistungspegel für die Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe FzG (Pkw, Lkw-1, Lkw-2) bei der Geschwindigkeit v_{FzG} in dB
	v_{FzG}	Geschwindigkeit für die Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe FzG (Pkw, Lkw-1, Lkw-2) in km/h
	p_1	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw-1 in %
	p_2	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw-2 in %

Die Fahrzeuggruppen (FzG) werden wie folgt unterschieden:

- Pkw:
Personenkraftwagen, Personenkraftwagen mit Anhänger, Lieferwagen (Güterkraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t)
- Lkw-1 (p_1):
Lastkraftwagen ohne Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t sowie Busse
- Lkw-2 (p_2):
Lastkraftwagen mit Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge (Zugmaschinen mit Auflieger) mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t sowie Krafträder

Sofern keine Anteile der Fahrzeuggruppen vom Untersuchungsgebiet vorliegen, besteht die Möglichkeit, standardisierte Werte – abhängig von Zeitraum und Straßenart – heranzuziehen (vgl. Tabelle 2.3) [16].

Straßenart	tags (06.00 – 22.00 Uhr)			nachts (22.00 – 06.00 Uhr)		
	M in Kfz/h	p_1 (%)	p_2 (%)	M in Kfz/h	p_1 (%)	p_2 (%)
Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen	$0,0555 \cdot DTV$	3	11	$0,0140 \cdot DTV$	10	25
Bundesstraßen	$0,0575 \cdot DTV$	3	7	$0,0150 \cdot DTV$	7	13
Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsst.	$0,0575 \cdot DTV$	3	5	$0,0100 \cdot DTV$	5	6
Gemeindestraßen	$0,0575 \cdot DTV$	3	4	$0,0100 \cdot DTV$	3	4

Tabelle 2.3: Standardwerte für die stündliche Verkehrsstärke M in Kfz/h (in Abhängigkeit von der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke DTV in (Kfz/24h)) und den Anteil der Fahrzeuge der Fahrzeuggruppen Lkw-1 (p_1) und Lkw-2 (p_2) in % gemäß RLS-19 [16]

Der Schallleistungspegel für Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe FzG ($L_{W,FzG}(v_{FzG})$), berücksichtigt wiederum die Schallemission des Fahrzeugs bei konstanter Geschwindigkeit (v_{FzG}) auf ebener, trockener Fahrbahn ($L_{W0,FzG}(v_{FzG})$) sowie Korrektoren wie Straßendeckschichttyp, Längsneigung, Knotenpunkttyp und Mehrfachreflexion (vgl. Gleichung 2.4) [16].

$$L_{W,FzG}(v_{FzG}) = L_{W0,FzG}(v_{FzG}) + D_{SD,SDT,FzG}(v_{FzG}) + D_{LN,FzG}(g, v_{FzG}) + D_{K,KT}(x) + D_{\text{refl}}(h_{\text{Beb}}, W) \quad (2.4)$$

mit	$L_{W,FzG}(v_{FzG})$	Schallleistungspegel für Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe FzG in dB
	$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$	Grundwert für den Schallleistungspegel eines Fahrzeuges der Fahrzeuggruppe FzG bei der Geschwindigkeit v_{FzG} in dB
	$D_{SD,SDT,FzG}(v_{FzG})$	Straßendeckschichtkorrektur für den Straßendeckschichttyp SDT die Fahrzeuggruppe FzG und die Geschwindigkeit v_{FzG} in dB
	$D_{LN,FzG}(g, v_{FzG})$	Korrektur für die Längsneigung g der Fahrzeuggruppe FzG bei der Geschwindigkeit v_{FzG} in dB
	$D_{K,KT}(x)$	Knotenpunktkorrektur für den Knotenpunkttyp KT in Abhängigkeit von der Entfernung zum Knotenpunkt x in dB
	$D_{\text{refl}}(w, h_{\text{Beb}})$	Zuschlag für die Mehrfachreflexion bei einer Bebauungshöhe h_{Beb} und den Abstand der reflektierenden Flächen w in dB

2.2 Megatrends und die Auswirkungen auf den Straßenverkehrslärm

Megatrends sind beständige, zum Teil über Jahrzehnte andauernde, weitreichende Veränderungen, die alle Bereiche des gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, politischen und technologischen Lebens durchdringen. Sie sind globale Phänomene, die aus komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Trends resultieren. Megatrends wirken oft nicht unabhängig voneinander, sondern treffen an Schnittstellen aufeinander. Auch wenn sie nicht überall gleichzeitig und in gleichem Maße auftreten, sind sie früher oder später überall auf der ganzen Welt zu beobachten.

Das Verständnis von Megatrends ist von entscheidender Bedeutung für die Vorbereitung auf potenzielle zukünftige Veränderungen. So ermöglicht die Analyse von Megatrends es den Entscheidungsträgern, besser auf zukünftige Entwicklungen zu reagieren, Chancen und Probleme zu erkennen, um erfolgreiche Lösungen zu schaffen.

Im Folgenden werden die Megatrends „Demographischer Wandel“, „Wirtschaftliche Entwicklung“, „Globalisierung“, „Urbanisierung“ und „Technologische Entwicklung“ vorgestellt und ihre potenziellen Auswirkungen auf den Straßenverkehrslärm beschrieben. Diese Auswirkungen beziehen sich auf aktuelle politische, gesellschaftliche und wissenschaftliche Diskussionen. Sie sind vielschichtig und können sowohl positiv als auch negativ sein.

Weitere Megatrends wie „Female Shift“, „Gender Mainstreaming“ und „Nanotechnologie“ sowie sicherheits- und geopolitische Aspekte werden in der Zukunftsforschung intensiv betrachtet, aber da sie keinen signifikanten Einfluss auf den Straßenverkehrslärm haben, werden sie in die Analyse der vorliegenden Arbeit nicht einbezogen.

Demografischer Wandel

Der demografische Wandel beschreibt langfristige Veränderungen der Bevölkerungszusammensetzung und der Altersstruktur. Diese werden maßgeblich von der Fertilitätsrate, der Nettozuwanderung und der Lebenserwartung beeinflusst und ziehen soziale, wirtschaftliche sowie siedlungsstrukturelle Folgen nach sich [22].

Mögliche Auswirkungen des demografischen Wandels auf den Straßenverkehrslärm:

- Internationale Zuwanderung:

Die internationale Zuwanderung bringt eine kulturelle Vielfalt mit sich, die das Wohn- und Verkehrsverhalten verändert. Jede Kultur hat ihre eigenen Ruhe- und Erholungsgewohnheiten, wodurch sich der Umgang mit Lärm signifikant vom deutschen Empfinden unterscheidet (vgl. Globalisierung und Urbanisierung).

- Veränderung der Alterspyramide:

Die Senioren werden zur politischen Mehrheit und die Lärmpolitik kann anspruchsvoller werden. Denn die Senioren fordern verstärkt den Schutz der natürlichen Klanglandschaft, was bei den Junioren, die in städtischen Gebieten aufgewachsen sind, weniger bekannt ist. Dies kann sich in politischen Entscheidungen in der Erhöhung der Lärmschutzmaßnahmen und in der Reduzierung des Straßenverkehrslärms widerspiegeln. Gleichzeitig werden die älteren Bevölkerungsgruppen weniger pendeln, was zu einer Verringerung des Verkehrsaufkommens und somit zu einer zusätzlichen positiven Auswirkung auf den Straßenverkehrslärm führen kann [8].

Wirtschaftliche Entwicklung

Der Megatrend „wirtschaftliche Entwicklung“ umfasst langfristige Veränderungen des wirtschaftlichen Umfelds, die durch das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) eines Landes beschrieben werden. Das BIP gibt die wirtschaftliche Leistung eines Landes in einem bestimmten Zeitraum an und ist eine zentrale Größe der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Es errechnet sich aus dem Wert aller im Inland produzierten Waren und Dienstleistungen abzüglich der Vorleistungen für Waren und Dienstleistungen. Das Wachstum des BIP und des BIP pro Kopf ist ein Indikator für den Zugang zu Ressourcen und die Verbesserung des Lebensstandards [23].

Mögliche Auswirkungen des Wirtschaftswachstums auf den Straßenverkehrslärm:

- Anstieg der Anzahl an Wohnhäusern und Erwerbstätigen:

Ein Anstieg des Wirtschaftswachstums führt zu einer höheren Zuwanderung, was wiederum die Bevölkerungsdichte erhöht. Dies bedingt eine Zunahme von Wohnhäusern und Erwerbstätigen, wodurch die Nutzung von Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie die Baudichte steigt. Eine unzureichende Raum- und Stadtplanung kann zu längeren Pendelwegen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz führen, was eine Erhöhung der Verkehrsleistung und eine Verschlechterung der Lebensqualität sowie eine Zunahme des Straßenverkehrslärms zur Folge haben kann. Eine optimierte Planung hingegen kann diesen negativen Auswirkungen entgegenwirken und zu einer positiven Beeinflussung beitragen (vgl. demografischer Wandel).

- Investitionen in Schieneninfrastruktur:

Eine Verbesserung der wirtschaftlichen Gesamtsituation kann zu Investitionen in die Schieneninfrastruktur führen, wodurch eine Verlagerung des Güter- und Personenverkehrs von der Straße auf die Schiene ermöglicht werden kann. Infolgedessen kann das Verkehrsaufkommen auf der Straße reduziert werden und eine positive Beeinflussung des Straßenverkehrslärms erfolgen [24].

- Investitionen in Verkehrstechnologie sowie Lärmschutzmaßnahmen:

Die Steigerung des Wirtschaftswachstums kann Investitionen in lärmarme und effizientere Verkehrstechnologien fördern. Zudem können mehr finanzielle Mittel in den Umbau und die Entwicklung von Lärmschutzmaßnahmen investiert werden, was langfristig zu einer positiven Auswirkung auf den Straßenverkehrslärm führen kann.

- Anstieg des Fahrzeugbestandes:

Das steigende Wohlstandsniveau kann zu einer erhöhten Nachfrage nach Mobilität und einer Zunahme von Privatfahrzeugen führen. Dadurch sind mehr Menschen in der Lage, häufiger Freizeitaktivitäten und Konsummöglichkeiten wahrzunehmen. Dies führt zu einer Zunahme des Verkehrsaufkommens, was wiederum zu einer negativen Beeinflussung des Straßenverkehrslärms beitragen kann.

- Anstieg der Konsumausgaben:

Eine Verbesserung des Wohlstandes führt zu einer Zunahme des Konsums von Waren und Dienstleistungen. Dies wiederum hat eine Steigerung der Exporte und Importe und ein höheres Transportaufkommen zur Folge. Die Zunahme des Güterverkehrs kann einen negativen Einfluss auf den Straßenverkehrslärm haben [25].

Globalisierung

Globalisierung beschreibt die zunehmende Vernetzung und das Zusammenwachsen der Weltbevölkerung in wirtschaftlicher, politischer und kultureller Hinsicht. Sie eröffnet neue Möglichkeiten für die Zusammenarbeit und den Wettbewerb und erleichtert den weltweiten Austausch von Waren, Dienstleistungen und Kapital sowie den Transfer von Wissen und Technologien.

Die globale Vernetzung wird vor allem durch den weltweiten Wissenstransfer, insbesondere im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, vorangetrieben (vgl. demographischer Wandel und wirtschaftliche Entwicklung). Dies führt zu einer multipolaren Weltordnung, in der die Schwellenländer im globalen Wettbewerb an Bedeutung gewinnen. Die Dominanz der Industrieländer nimmt ab und die wirtschaftlichen Ungleichgewichte reduzieren sich.

Mögliche Auswirkungen des Globalisierungsprozesses auf den Straßenverkehrslärm:

- Internationaler Handel:

Die Intensivierung des internationalen Handels bewirkt eine Zunahme an häufigen und schnellen Transporterfordernissen. Dies führt zu einer Optimierung der Lieferketten und Just-in-Time-Logistik, wodurch sich das Sendungsvolumen erhöht. Allerdings hat dies zur Folge, dass die Güterverkehrsleistung erhöht wird, wobei der Straßenverkehrslärm negativ beeinflusst werden kann.

- Virtuelle Arbeit und Einkaufen:

Mit der Globalisierung und dem damit verbundenen technologischen Fortschritt nimmt die Nutzung des Internets zu. Die Zunahme der virtuellen Arbeit und die erleichterte Nutzung des Cyberspace führen zu einer Verringerung des Pendlerverkehrs, was sich positiv auf den Straßenverkehrslärm auswirken kann. Demgegenüber kann sich, wie bereits oben beschrieben, die Zunahme des Online-Einkaufs negativ auf den Straßenverkehrslärm auswirken [26].

- Kulturelle Einflüsse:

Die Globalisierung verstärkt die internationale Zuwanderung und führt zu einer noch größeren kulturellen Vielfalt. Im Zusammenleben gemischter Kulturen führt dies zu einer zeitlichen Vermischung von Aktivitäten und zum Verschwinden klassischer Ruhezeiten, wodurch sich die Ausprägung des Straßenverkehrslärms zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten verändert (vgl. demografischer Wandel und Urbanisierung) [8].

- Technologische Innovationen:

Der Wissensaustausch eröffnet Möglichkeiten für verbesserte technologische Innovationen, die sich wiederum positiv auf die Entwicklung neuer Materialtechnologien sowie die Erarbeitung neuer Lösungen zur Lärminderung im Straßenverkehr auswirken können.

Technologische Entwicklungen

Technologische Innovationen umfassen Fortschritte in Wissenschaft und Technologie, die neue Produkte, Prozesse und Dienstleistungen hervorbringen. Zu den aktuellen Entwicklungen, die sich auf unterschiedliche Bereiche auswirken, gehören unter anderem künstliche Intelligenz, Automatisierung, Digitalisierung, Elektromobilität und die verstärkte Nutzung nachhaltiger Energiequellen.

Technologische Entwicklungen lassen sich nicht genau prognostizieren, denn die Unterscheidung zwischen einer wahrscheinlichen Entwicklung und „Science Fiction“ ist mit rationalen Methoden nicht möglich. Es besteht jedoch das Potenzial, dass technologische Fortschritte den Straßenverkehrslärm erheblich beeinflussen können.

Mögliche Auswirkungen technischer Innovationen auf den Straßenverkehrslärm [8]:

- Elektromobilität:

Der steigende Bestand an Elektrofahrzeugen sowie die Entwicklung neuer Motortechnologien bergen das Potential, den Straßenverkehrslärm bei niedrigeren Geschwindigkeiten positiv zu beeinflussen [27].

- Autonomes Fahren:

Das autonome Fahren wird potenziell den Straßenverkehr revolutionieren. Die Ausstattung von Fahrzeugen mit fortschrittlichen Sensoren und KI-Systemen könnte zu einer effizienteren und gleichmäßigeren Fahrweise ohne abrupte Brems- und Beschleunigungsmanöver führen, wodurch der Verkehrsfluss optimiert und Staus und Unfälle reduziert werden.

- Digitale Mobilitätslösungen:

Innovative Verkehrsmanagementsysteme und digitale Plattformen, die Verkehrsinformationen in Echtzeit generieren und nutzen, ermöglichen eine optimierte Verkehrssteuerung und -planung. Dies kann einen positiven Einfluss auf den Straßenverkehrslärm nehmen.

- Innovative Baumaterialien / Lärmarme Fahrbahnbeläge und schallabsorbierende Fassaden:

Die Fortschritte in der Materialwissenschaft eröffnen neue Möglichkeiten für die Entwicklung innovativer Baumaterialien, unter anderem für Straßenbeläge, Fassaden- und Dachflächen. Insbesondere werden nachhaltige Materialien, wie z.B. neue Mischgutrezepturen für Straßendeckschichten aus recycelten Abfällen, entwickelt. Die Herstellung und Verwendung lärmarmen Straßendeckschichten kann durch die Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche zu einer positiven Beeinflussung des Straßenverkehrslärms führen [28]. Gleichzeitig kann die Begrünung von Gebäuden die Reflexionen verringern und sich positiv auf die Lärmbelastung

auswirken [29]. Photovoltaikmodule auf Gebäudeflächen hingegen können die Reflexionen erhöhen und sich somit negativ auf den Straßenverkehrslärm auswirken [30].

- Innovative Verkehrssysteme und Stadtplanung:

Die Integration neuer Konzepte in die Stadtplanung kann dazu beitragen, das Verkehrsaufkommen zu reduzieren. Ein Beispiel hierfür ist das Hochgeschwindigkeitstransportsystem Hyperloop³, welches eine Alternative zum konventionellen Straßenverkehr darstellt. Solche Implementierungen innovativer Verkehrssysteme können dazu beitragen, den Straßenverkehr auf stark befahrenen Straßen zu reduzieren und die Lärmbelastung positiv zu beeinflussen.

- Cyberspace-Technologien und virtuelle Arbeitsmodelle:

Die Entwicklung von Cyberspace-Technologien und virtuellen Arbeitsmodellen kann zu einer Verringerung des Berufsverkehrs führen. Dadurch könnte das Verkehrsaufkommen reduziert werden, was wiederum eine positive Beeinflussung des Straßenverkehrslärms nach sich ziehen könnte (vgl. Globalisierung) [26].

Urbanisierung

Urbanisierung bezeichnet den Prozess der zunehmenden Bevölkerungsdichte in städtischen Gebieten. Dies hat weitreichende Auswirkungen auf Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt. Die Bewältigung der Herausforderungen der Urbanisierung erfordert eine sorgfältige Planung und Gestaltung städtischer Räume. Hierbei sind insbesondere die Verkehrsbelastung, die Umweltverschmutzung sowie soziale Ungleichheiten von zentraler Bedeutung.

Mögliche Auswirkungen der Urbanisierung auf den Straßenverkehrslärm:

- Stadt-, Raum- und Verkehrsplanung:

Die Urbanisierung erfordert die Optimierung der Stadt-, Raum- und Verkehrsplanung. Zu den aktuell diskutierten Maßnahmen zählen: eine gerechte Verteilung des öffentlichen Raums mit mehr Platz für Fußgänger und Radfahrer, die Schaffung verkehrsberuhigter Zonen, die Planung kurzer Wege („Stadt der kurzen Wege“), die Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs und der Rad- und Fußwege, die Planung und die Errichtung von Lärmschutzwänden und -wällen, die Förderung begrünter Fassaden und Dächer sowie multimodale Verkehrskonzepte. Diese sowie weitere Maßnahmen können zur Reduzierung der Lärmbelastung in städtischen Gebieten beitragen (vgl. Mobilität) [2].

- Veränderungen der Bevölkerungsdichte:

Die zunehmende Bevölkerungsdichte in wachsenden Städten führt zu einer verstärkten Inanspruchnahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen. Dies kann zu einer Erhöhung der Bebauungsdichte sowie einem verstärkten Verkehrsaufkommen führen, wobei dies einen negativen Einfluss auf den Straßenverkehrslärm ausüben kann. In schrumpfenden Städten hingegen wird eine positive Auswirkung erwartet [31].

- Zusammenleben gemischter Kulturen:

Durch Globalisierung und internationale Zuwanderung leben in städtischen Räumen immer mehr Menschen aus unterschiedlichen Kulturen eng zusammen, wodurch sich Ruhe- und Aktivitätsgewohnheiten überlagern können. Das Zusammenleben gemischter Kulturen in urbanen Räumen führt zu einer zeitlichen Vermischung von Aktivitäten und zum Rückgang klassischer Ruhezeiten (vgl. Globalisierung und demographischer Wandel) [8].

Mobilisierung

Mobilität bezeichnet die Beweglichkeit von Menschen, Gütern und Dienstleistungen. Sie umfasst eine Vielzahl von Transportmitteln und Infrastrukturen, die das Reisen innerhalb und zwischen ortsgelassenen Einheiten ermöglichen.

³Das Konzept für ein Hochgeschwindigkeitstransportsystem, entwickelt von dem Unternehmen „The Boring Compan“.

Die zukünftige Entwicklung der Mobilität wird durch innovative Konzepte vorangetrieben, die auf Nachhaltigkeit, Sicherheit und Effizienz abzielen. Diese Veränderungen werden sowohl durch infrastrukturelle Entwicklungen als auch durch soziale Veränderungen beeinflusst (vgl. Urbanisierung und demografischer Wandel).

Mögliche Auswirkungen der Mobilisierung auf den Straßenverkehrslärm:

- Multimodalität:

Die Verbesserung der Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr, den Radverkehr und Car-Sharing-Angebote kann die Multimodalität verstärken und damit zu einer Verringerung des Individualverkehrs führen. Dies kann zur positiven Beeinflussung des Straßenverkehrslärms beitragen [2].

- Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge:

Die Optimierung der Motoren durch den technologischen Fortschritt der Fahrzeuge ermöglicht Effizienzsteigerungen. Dies kann bei niedrigen Geschwindigkeiten den Straßenverkehrslärm positiv beeinflussen (vgl. Technologische Entwicklungen) [27].

- Geschwindigkeitsreduzierung:

Die Umsetzung von Maßnahmen zur Geschwindigkeitsbegrenzung erhöht die Verkehrssicherheit und reduziert die Treibhausgasemissionen in städtischen Gebieten. Dies gilt insbesondere für die Einführung von innerörtlichen Tempolimits von 30 km/h sowie eines generellen Tempolimits auf Autobahnen. Zudem kann dies zu einer positiven Beeinflussung des Straßenverkehrslärms beitragen (vgl. Urbanisierung) [32].

2.3 Szenario-Methode

Die beschriebenen Megatrends zeigen die Verknüpfungen der globalen Veränderungsdynamiken, so dass präzise Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen von hoher Komplexität geprägt sind.

Vor diesem Hintergrund stellt die Szenariotechnik eine Methode der Zukunftsforschung sowohl in der Wirtschaft als auch in der Wissenschaft dar. Angesichts großer Unsicherheiten ist sie eine der wichtigsten Techniken der Zukunftsforschung und ein wirksames Instrument der Entscheidungsfindung.

In der Zukunftsforschung hat sich das sogenannte Trichtermodell als Basismethode etabliert (siehe Abbildung 2.3). Es bietet einen strukturierten Ansatz, um die Vielfalt möglicher zukünftiger Entwicklungen zu erfassen.

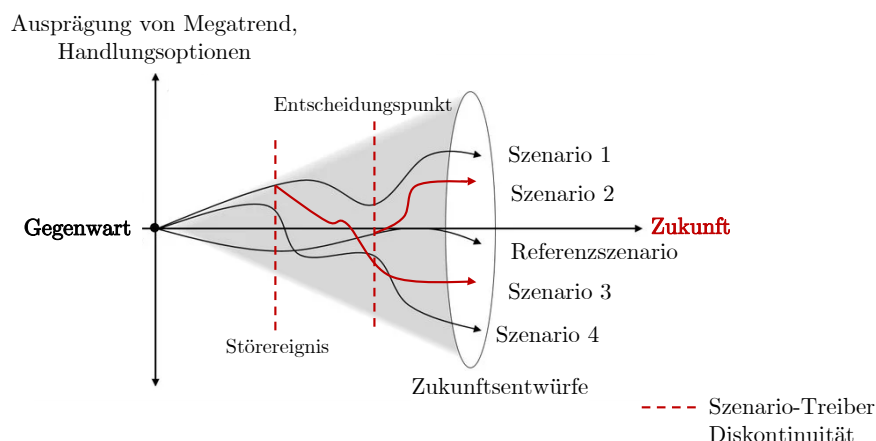


Abbildung 2.3: Trichter-Modell zur Darstellung möglicher Szenarien [33]

Der Rand des Trichters begrenzt die Bandbreite möglicher Zukunftsszenarien und erstreckt sich von der Gegenwart bis in die Zukunft. Außerhalb des Randes ist keine zukünftige Entwicklung zu erwarten und wird daher als unwahrscheinlich betrachtet. Dabei verlaufen die Szenarien nicht immer linear, sondern werden durch Megatrends und mögliche Handlungsoptionen beeinflusst und

können durch Störereignisse beeinflusst und durch Entscheidungspunkte gesteuert werden. Diese können das Eintreten bestimmter Szenarien beeinflussen und damit die zukünftige Entwicklungsrichtung mitbestimmen.

Im mittleren Bereich dieses Trichtermodells befindet sich in der Regel das Referenzszenario, das als Mittellinie dient. Es beschreibt die Fortschreibung der aktuellen Entwicklung in die Zukunft unter der Annahme, dass keine neuen Entscheidungen oder Maßnahmen ergriffen werden. Das extrem optimistische Szenario („Best-Case Scenario“) befindet sich am oberen Rand und das extrem pessimistische Szenario („Worst-Case Scenario“) am unteren Rand.

Diese Extremszenarien stellen keine eindeutigen zukünftigen Endzustände dar. Vielmehr liegen zwischen diesen beiden Extremszenarien die mit höherer Wahrscheinlichkeit eintretenden Zukunftsszenarien. Dies bedeutet, dass es nicht nur einen möglichen Weg, sondern verschiedene Zukunftsszenarien gibt [34].

Szenarioprozess

Die Entwicklung von Szenarien erfolgt in einem Szenarioprozess, der das Ergebnis eines systematischen Vorgehens ist. Um eine umfassende Analyse zu ermöglichen, basiert der Prozess auf einer Abfolge von Phasen, in denen die Megatrends und die Handlungsoptionen einzeln untersucht werden [6].

Die Phasenabfolge kann je nach Ansatz variieren. Von besonderer Bedeutung sind explorative und normative sowie qualitative und quantitative Ansätze.

Bei explorativen Ansätzen werden Entscheidungen getroffen, ohne sich auf vordefinierte Standards zu stützen, während normative Ansätze auf festgelegten Zielen und Werten basieren. Beispielsweise basieren explorative Entscheidungen auf der Formulierung von Fragen wie „Was wäre, wenn?“. Normative Entscheidungen hingegen konzentrieren sich auf die Formulierung von Fragen wie „Wie wird es sein?“ oder „Wie kommen wir dorthin?“. Bei qualitativen Ansätzen werden Methoden wie Fallarbeiten herangezogen. Dahingegen bedienen sich quantitative Ansätze statistischer Modelle und mathematischer Verfahren. Die Auswahl der Ansätze hängt von der Zielsetzung und den Rahmenbedingungen des Szenarioprozesses ab. Häufig werden auch Kombinationen dieser Ansätze verwendet [35].

Neben den Ansätzen sind bestimmte Qualitätskriterien von Bedeutung, die dazu dienen, die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Zu diesen Kriterien zählen beispielsweise Plausibilität, Transparenz, Relevanz, Interdisziplinarität, visionäres Denken und Verständlichkeit [36].

Die Szenariotechnik wird seit vielen Jahren in der Zukunftsforschung eingesetzt. Dennoch gibt es weder eine eindeutige Definition noch ein standardisiertes Vorgehen für die Phasenabfolge des Szenarioprozesses. Zudem hat sich im Laufe der Jahre eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarioprozesse entwickelt. Dies liegt daran, dass Szenarien in unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden und unterschiedliche Bedeutungen haben. Beispielsweise können Szenarien je nach Anwendung das Endprodukt darstellen, sie können aber auch Ausgangspunkt oder Zwischenprodukt sein. Trotz allem lassen sich die Phasen in einen generellen Ablauf gliedern, der allerdings in den verschiedenen Techniken unterschiedlich ausgestaltet ist. Der generelle Ablauf umfasst mindestens vier Phasen: die Szenario-Vorbereitung, die Analyse, die Szenario-Bildung und den Szenario-Transfer [34].

Phasenabfolge des Szenarioprozesses

Im Rahmen der vorliegenden Forschung wird ein siebenphasiger Szenarioprozess gemäß Fink, Schlake und Siebe (2002) und Geschka (1990) angewendet, der sowohl quantitative als auch qualitative und explorative Ansätze beinhaltet [6].

1. Bestimmung des Szenariobereiches

Die erste Phase ist die Bestimmung des Szenariobereiches. Hierbei wird die Ausgangssituation definiert und das Problemfeld konkretisiert. Dieser Schritt ist entscheidend, um den Fokus und die Ziele klar festzulegen. Dabei werden Fragen gestellt wie: „Worum geht es genau?“ und „Was sind die genauen Forschungsziele?“ [34].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird somit als Ausgangslage die Zukunft des Umgebungslärms in städtischen Gebieten in Deutschland definiert. Die Schallemissionen in städtischen Gebieten gehen vor allem von dem Verkehr (Straßen-, Schienen- und Flugverkehr), der Industrie und dem Gewerbe, den Freizeitaktivitäten der Menschen und von den Baustellen aus (siehe Kapitel 2.1).

2. Grundannahmen und Analyse der Systemgrenzen

Die Entscheidung über die Systemgrenzen ist eine entscheidende Phase im Szenarioprozess, um das Szenariofeld bewusst einzugrenzen und eine klare Richtung für den nächsten Schritt vorzugeben. Dabei werden zunächst ein genauer Themenzuschnitt, ein Betrachtungszeitraum und die geographische Lage festgelegt. Anschließend werden spezifische Grundannahmen getroffen. Diese dienen dazu, das Szenariofeld realistisch und relevant zu gestalten [6].

Etwa drei Viertel der Bevölkerung werden durch den Straßenverkehrslärm in ihrer Lebensqualität beeinträchtigt, wobei der Straßenverkehrslärm eines der wichtigsten städtischen Lärmprobleme darstellt (vgl. Kapitel 2.1) [4]. Aus diesem Grund fokussiert sich diese Arbeit beim genauen Themenzuschnitt auf den Straßenverkehrslärm. In diesem Bereich werden die aktuell diskutierte Mobilitäts- und Verkehrswende sowie nachhaltige Stadtentwicklungen berücksichtigt.

Als Betrachtungszeitraum wird ein langfristiger Zeithorizont „2050“ angenommen, wobei dieser nicht im kalendarischen Sinne zu verstehen ist. Vielmehr wird bewusst mit einem Betrachtungszeitraum in ferner Zukunft gearbeitet, der die aktuell diskutierten politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Planungs- und Entscheidungsprozesse berücksichtigt. Ein weiterer Grund für die Annahme eines langfristigen Zeithorizonts liegt darin, dass bereits kurzfristige Prognosen zum städtebaulichen Lärmschutz von Behörden oder Institutionen im Bereich der Stadt- und Verkehrsplanung erstellt werden.

Die Festlegung der geographischen Lage konzentriert sich auf siedlungsstrukturelle Kreistypen: unterteilt in städtische Kreise, kreisfreie Großstädte, ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen sowie dünn besiedelte ländliche Kreise. Diese Kreistypen befassen sich insbesondere mit allgemeinen Wohngebieten mit unterschiedlichen Straßenverkehrslärmquellen.

Im Folgenden werden weitere Grundannahmen als Voraussetzung formuliert [8]:

1. In den nächsten 30 Jahren wird es die Bundesrepublik Deutschland mit ihren nationalstaatlichen Aufgaben auch weiterhin geben.
2. Die Grundprinzipien des demokratischen Sozialstaates und die europäischen Wertvorstellungen werden ihre Relevanz behalten.
3. Eine grundlegende Umwälzung des Wertesystems und der Lebensweise in Deutschland sowie kriegerische Auseinandersetzungen werden nicht erwartet.
4. Die aktuelle Wirtschafts- und Finanzordnung wird nicht zum Zusammenbruch des Systems führen und daher in ihrer jetzigen Struktur erhalten bleiben.
5. Die Bundes- und Landesverwaltungen werden in der Lage sein, ihre Aufgaben im bisherigen Umfang fortzuführen und entsprechend handlungsfähig zu bleiben.
6. Das Themenfeld Lärmbekämpfung wird auf nationaler Ebene relevant bleiben.

Die getroffenen Annahmen dienen als Grundlage für die weiteren Schritte des Szenarioprozesses. Sie ermöglichen es, sich auf die relevanten Aspekte zu konzentrieren, ohne den Fokus zu verlieren. Dies bedeutet nicht, dass enorme Veränderungen in den nächsten 30 Jahren unmöglich oder unwahrscheinlich sind. Solche Überlegungen liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieser Forschung.

3. Identifikation der Schlüsselfaktoren

Ziel dieser Phase ist es, die relevanten Schlüsselfaktoren zu identifizieren, die die zukünftige Entwicklung maßgeblich beeinflussen. Zunächst werden geeignete Einflussfaktoren ausgewählt und einer Analyse unterzogen. Dabei werden sowohl die Megatrends als auch die damit verbundenen sonstigen Entwicklungen berücksichtigt. Es wird untersucht, welche Faktoren signifikanten Einfluss auf das Gesamtsystem haben. Auf diese Weise werden die treibenden Schlüsselfaktoren priorisiert.

Die Analyse der Einflussfaktoren erfolgt mit Hilfe einer softwaregestützten Einflussmatrix (siehe Anhang A). In dieser Matrix werden die einzelnen Faktoren nach individueller Einschätzung ihrer Wirkung auf einer Skala von 0 bis 3 gegenübergestellt.

Beispiel (vgl. Tabelle 2.4): Der Faktor Bevölkerungswachstum hat einen sehr starken Einfluss (3) auf die Erwerbsfähigkeit und die Altersstruktur, aber nur einen schwachen Einfluss (1) auf die Zuwanderung. Dagegen hat der Faktor Zuwanderung einen starken Effekt (3) auf das Bevölkerungswachstum. Auf dieser Grundlage wird eine Schätzung für 20 Faktoren vorgenommen.

Wirkung von ↓ auf →	Bevölkerungswachstum	Altersstruktur - Erwerbsfähigkeit	Immigration – Zuwanderung
Bevölkerungswachstum		3	1
Altersstruktur - Erwerbsfähigkeit	1		2
Immigration – Zuwanderung	3	3	

Tabelle 2.4: Beispiel der Einflussmatrix mit den Wirkungsgraden

0 = kein Einfluss, 1 = geringer Einfluss, 2 = starker Einfluss, 3 = sehr starker Einfluss

Nach der Schätzung der einzelnen Faktoren werden die Zeilen- und Spaltenwerte aufsummiert. Die Summe der Zeilenwerte ergibt die aktive Summe und gibt an, wie stark ein einzelner Faktor alle anderen Faktoren beeinflusst. Die Summe der Spaltenwerte ergibt die passive Summe und gibt an, wie stark ein einzelner Faktor von allen anderen Einflussfaktoren beeinflusst wird.

Die Identifikation der Schlüsselfaktoren erfolgt anhand der aktiven Summe (vgl. Tabelle 2.5). Die Werte der Aktivsumme werden in aufsteigender Reihenfolge aufgelistet und als Indikatorenreihenfolge festgehalten. Diese Reihenfolge bildet die Grundlage für den weiteren Szenarioprozess.

4. Auswahl der nationalen Szenarien und 5. Zusammenstellung der Szenarien

Die Szenarien werden in dieser Phase gestaltet. Zunächst werden die Schlüsselfaktoren in der Reihenfolge der Indikatoren einzeln analysiert. Für jeden Schlüsselfaktor werden verschiedene Entwicklungspfade ermittelt und jeweils ein eigener Zukunftstrichter aufgespannt. Die Zukunftstrichter der einzelnen Schlüsselfaktoren werden anschließend zu einem allgemeinen Szenariobereich zusammengefügt und die Ausprägungen der Faktoren für jedes Szenario definiert. Die verschiedenen Entwicklungspfade eines Schlüsselfaktors können intuitiv vorgestellt und angenommen werden. Dies kann auf verschiedene Weise erfolgen, alleine oder in einem Projektteam sowie durch die Anwendung einer Softwareunterstützung. Darüber hinaus erfordern die meisten Szenariotechniken Ergebnisse aus anderen Zukunftsforschungen [6].

Aufgrund der Komplexität dieser Phase und des Forschungsziels werden danach bereits bestehende nationale Zukunftsforschungen zur Stadt- und Verkehrsentwicklung in Deutschland als Grundlage mit einbezogen, die mit der ermittelten Indikatorenreihenfolge der vorliegenden Arbeit übereinstimmen. Dazu gehören die wirtschaftliche Entwicklung, die technologischen Innovationen, die Globalisierung, der demographische Wandel, die Mobilisierung und die Urbanisierung (vgl. Tabelle 2.5). Dabei wird insbesondere darauf geachtet, dass die Entwicklungspfade dieser Schlüsselfaktoren in den ausgewählten Forschungen vergleichbar sind. Da diese Zukunftsforschungen vor dem Ausbruch der Corona-Pandemie veröffentlicht wurden, werden die aktuellen Daten bei der Erstellung der Szenarien berücksichtigt.

Einflussfaktoren	AS	Megatrend	AS
BIP	48	Wirtschaftliche Entwicklung	48
BIP/Kopf	47		
Technische Innovationen	43	Technologische Entwicklungen	40
Cyberspace	38		
Materialtechnologie	38		
Arbeitsplatz-Homeoffice	35	Globalisierung	39
Online-Handel	25		
Multinationale Organisation	52		
Umweltbewusstsein	42		
Bevölkerungswachstum	34	Demografischer Wandel	36
Altersstruktur-Erwerbsfähigkeit	38		
Immigration-Zuwanderung	37		
Multimodalität	37	Mobilisierung	28
Effizienz und Elektrifizierung	32		
Abbau klimaschädlicher Subventionen	28		
Geschwindigkeitsreduzierung	14		
Gerechte Raumverteilung	16	Urbanisierung	25
Stadt der kurzen Wege	18		
Smart City	35		
Grüne Stadt	31		

Tabelle 2.5: Einflussfaktoren und deren Aktivsumme

Die Grundlage für die Entwicklung der siedlungsstrukturellen Kreistypen ist die Zukunftsforschung „Sozioökonomische Szenarien als Grundlage von Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland (UBA, 2019) [24]“. Dabei werden insbesondere der Urbanisierungsgrad sowie die Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr (aus dem Trend- und dem Stabilitätsszenario) berücksichtigt:

Die Forschung analysiert die Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland. Sie umfasst verschiedene Themenbereiche wie Wertschöpfung, Erwerbstätigkeit, Wohnen, Verkehr, Stromerzeugung und Flächenentwicklung und bietet eine detaillierte Darstellung für jede Kreisebene. Für das Jahr 2045 werden drei sozioökonomische Szenarien entwickelt. Im „Trendszenario“ werden die aktuellen Entwicklungen in den Bereichen Bevölkerung, Wirtschaft, Energie, Verkehr und Flächennutzung als Trend in die Zukunft fortgeschrieben. Dabei werden die Energie- und Klimaschutzziele verzögert. Im „Stabilitätsszenario“ wird von einer nachhaltigen Entwicklung ausgegangen, bei der die Klimaschutzziele der Bundesregierung erreicht werden. Das „DynamikszENARIO“ zeichnet sich durch eine höhere sozioökonomische Dynamik aus. Hierbei ist die Bevölkerungsentwicklung durch eine höhere Zuwanderung und ein steigendes BIP-Wachstum gekennzeichnet. Daraus resultieren hohe Verkehrsleistungen, eine zunehmende Flächeninanspruchnahme und eine deutliche Zielverfehlung.

Die Grundlagen zur Verkehrsentwicklung werden im Wesentlichen der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (UBA, 2016) [25]“ entnommen. Aus dieser Forschung werden insbesondere Prognosedaten zur Verkehrs- und Fahrleistung sowie zum Verkehrsaufkommen, zum Fahrzeugbestand und zur Fahrzeugtechnik berücksichtigt:

In dieser Zukunftsforschung werden die Prognosedaten zu Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuchen, Fahrzeugbeständen und den damit verbundenen Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen überwiegend mit dem Emissionsberechnungsmodell (Transport Emission Model) „TREMOM“ bis zum Jahr 2030 angenommen und bis zum Jahr 2050 interpoliert. Dabei werden zwei Hauptszenarien gebildet. Das Referenzszenario beschreibt die aktuellen Entwicklungen in die Zukunft fort und verfehlt die Klimaschutzziele im Verkehrssektor. Im Klimaschutzszenario werden ambitionierte Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor gesetzt. Der Fokus liegt dabei auf dem Güterverkehr, wobei die Auswirkungen von Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen (Verkehrswende) sowie der Einsatz erneuerbarer Energien (Energiewende) untersucht werden. Dabei wird der Verkehrssektor treibhausgasneutral und kann das sektorübergreifende Minderungsziel von 80-95 % bis 2050 gegenüber 1990 erreichen.

Dazu werden zusätzliche Prognosedaten aus dem Bericht „Aktualisierung der Modelle TREMOM/TREMOM-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (UBA, 2020) [37]“ angewendet. Zudem werden die Auswirkungen der Corona-Pandemie mit Hilfe der aktuellen Daten des Statistischen Bundesamtes, den Daten des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr „Verkehr in Zahlen 2022-2023 (BMDV, 2023) [38]“ und die Zukunftsforschung „Verkehrsprognose 2040 Teil 2: Wirtschafts- und Verkehrsentwicklungsprognose 2040 Prognoseprämissen (BMDV, 2022) [39]“ mit berücksichtigt⁴.

6. Szenariobildung

In der Phase der Szenariobildung werden die Schlüsselfaktoren und ihre aufgespannten Zukunftstrichter zu Endszenarien gebündelt. Dabei wird innerhalb jedes aufgespannten Zukunftstrichters nach der Indikator-Reihenfolge ein Faktor ausgewählt, der zusammen mit anderen eindeutigen Faktoren die Endszenarien entstehen lässt. Aus den entstehenden vielen verschiedenen Endszenarien werden je nach Forschung optimal bis zu drei Szenarien ausgewählt: das Referenzszenario, das extrem optimistische Szenario (Best-Case-Szenario) und das extrem pessimistische Szenario (Worst-Case-Szenario) [6].

In der vorliegenden Arbeit werden jedoch lediglich zwei Szenarien vorgestellt: das Referenzszenario und das Stabilitätsszenario (optimistisches Szenario). Dabei werden die ausgewählten Zukunftsforschungen sowie die aktuellen Daten als Ausgangspunkt betrachtet und es wird vor allem explorativ vorgegangen. Es wird untersucht, inwieweit sich das Erreichen oder Verfehlen der deutschen Klimaschutzziele auf den Straßenverkehrslärm auswirken könnte. Gleichzeitig werden politische und wirtschaftliche Diskussionen sowie die Auswirkungen der Corona-Pandemie berücksichtigt.

7. Szenario-Transfer

Der Szenario-Transfer stellt die letzte Phase dar. Hier werden die gebildeten Szenarien bewertet und zur strategischen Früherkennung genutzt sowie abschließend Handlungsempfehlungen abgeleitet. Ziel ist es, eine strategische Planung durchzuführen und konkrete Entscheidungen zu treffen [6].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden zunächst die qualitativen Daten und Eigenschaften der Szenarien durch statistische Analysen in quantitative Prognosen überführt. Aus den Prognosen der Verkehrsentwicklung werden mit Hilfe von Regressionsgleichungen die durchschnittlichen Verkehrsstärken berechnet. Die Entwicklungen der siedlungsstrukturellen Kreistypen werden durch logarithmische Trendlinien bestimmt. Der Anteil elektrifizierter Fahrzeuge und die Einführung eines generellen Tempolimits auf Bundesautobahnen werden bei der Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegels berücksichtigt und jeweils das Lärminderungspotenzial berechnet. Zudem werden die Gebäudeflächen betrachtet, wobei Gebäudebegrünungen und Photovoltaikanlagen analysiert werden. Diese Quantifizierungsmethoden werden in Kapitel 4 näher ausgeführt.

⁴Eine neue Prognose für das Jahr 2040 ist aktuell in Arbeit und wird vom Bundesverkehrsministerium noch veröffentlicht. Auf diese aktualisierten Prognosedaten kann jedoch nicht gewartet werden.

Als Grundlage für die Prognosemodelle des Referenz- und des Stabilitätszenarios werden städtebauliche Übersichtspläne erstellt. Diese befassen sich mit aktuellen Planungssituationen in der Bestandsentwicklung allgemeiner Wohngebiete unterschiedlicher siedlungsstruktureller Kreistypen. Aufbauend darauf werden die Prognosemodelle unter Anwendung quantifizierter Prognosedaten simuliert. Sowohl für die aktuelle als auch für die zukünftige Planungssituation werden Schallimmissionspläne berechnet und miteinander verglichen (siehe Kapitel 4).

Basierend auf diesen Prognosen werden anschließend Planungssituationen erstellt. Sie befassen sich mit typischen Situationen in der Bestandsentwicklung von allgemeinen Wohngebieten in kreisfreien Großstädten, städtischen Kreisen, ländlichen Kreisen mit Verdichtungsansätzen sowie dünn besiedelten ländlichen Kreisen. Diese Situationen werden mit verschiedenen Schallquellen des Straßenverkehrs zu einem Anwendungsfall kombiniert und als grafische Entwürfe dargestellt. Zu jeder Planungssituation wird ebenfalls ein Schallimmissionsplan simuliert und die Pegeldifferenzen miteinander verglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Lärminderungseffekte erfolgt eine quantitative Bewertung anhand einer Skala (siehe Kapitel 5).

Kapitel 3

Entwicklung bis 2050

3.1 Identische Entwicklungen der Megatrends im Referenz- und Stabilitätsszenario

3.1.1 Einordnung nach Indikatorreihenfolge

Die Megatrends „Demografischer Wandel“, „Wirtschaftliche Entwicklung“, „Globalisierung“ und „Technologische Entwicklung“ zeigen nach der ermittelten Indikatorreihenfolge eine hohe Wechselwirkung mit anderen Megatrends auf und verlaufen im Referenz- und im Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 weitgehend ähnlich. „Urbanisierung“ und „Mobilisierung“ bilden die letzten Indikatoren nach der aktiven Summe und üben somit den geringsten Einfluss auf die anderen Megatrends aus (vgl. Kapitel 2.2).

Vor diesem Hintergrund treten Urbanisierung und Mobilisierung zwar in beiden Szenarien für das Jahr 2050 auf, entwickeln sich jedoch in Abhängigkeit von den Klimaschutzmaßnahmen unterschiedlich. Diese beiden Megatrends sind von besonderer Bedeutung für die Reduzierung der CO_2 -Emissionen in städtischen Gebieten und werden daher in der politischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Diskussion als wichtige Themen angesehen, wobei auch ihre Auswirkungen auf den Straßenverkehrslärm diskutiert werden.

Der Megatrend „Urbanisierung“ beschreibt hauptsächlich die Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr. Dabei zielen verschiedene städtebauliche Maßnahmen und politische Strategien darauf ab, die Flächeninanspruchnahme bis 2050 zu reduzieren. Bei dem Megatrend „Mobilisierung“ stehen die Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs, sowie verschiedene Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung, Verkehrsvermeidung und Effizienzsteigerung im Vordergrund.

3.1.2 Demografischer Wandel

In Deutschland vollzieht sich derzeit ein demografischer Wandel, der durch Alterung und Geburtenrückgang gekennzeichnet ist. Die Zahl der jüngeren Menschen nimmt ab, während die Zahl der älteren Menschen zunimmt. Jeder zweite Mensch in Deutschland ist heute älter als 45 Jahre, jeder fünfte älter als 66 Jahre. Gleichzeitig wird dieser Rückgang durch jährliche Zuwanderungen so weit wie möglich kompensiert, was durch die Politik gesteuert wird [40].

Bis zum Jahr 2050 wird der kontinuierliche demografische Wandel in Deutschland maßgeblich von globalen Einflüssen, Konflikten und Krisen geprägt. Die Bevölkerungszahl wird sinken, beeinflusst durch eine niedrige Fertilitätsrate, trotz stabiler Nettozuwanderung und einer steigenden Lebenserwartung.

Die Prognosen der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes zeigen einen Rückgang von 83,4 Mio. (Stand 2024) auf voraussichtlich 77 Mio. im Jahr 2050 (Variante 2 G1-L1-W2). Die Fertilitätsrate wird auf 1,4 Kinder pro Frau geschätzt, während die Lebenserwartung für Männer auf 77 Jahre und für Frauen auf 83 Jahre steigt. Die Nettozuwanderung wird jährlich rund 200.000 Personen betragen. Diese demographischen Einflüsse führen neben

einem Bevölkerungsrückgang zu einer Verschiebung der Altersstruktur, mit einem wachsenden Anteil älterer Menschen. Dabei wird erwartet, dass der Anteil der 18- bis 75-Jährigen von 72 % auf 69 % sinkt, während der Anteil der über 75-Jährigen steigt [22].

3.1.3 Wirtschaftliche Entwicklung

Die Prognosen der Europäischen Kommission (2023) lassen auf ein moderates, jedoch stabiles Wirtschaftswachstum in Deutschland bis zum Jahr 2050 schließen. Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) wird bis zum Jahr 2025 um 1 % pro Jahr wachsen und in den nachfolgenden Jahren um 0,8 %. Auch das BIP pro Kopf zeigt eine positive Entwicklung, wobei städtische Gebiete stärkere Wachstumsraten aufweisen als ländliche Kreise. Dies ist maßgeblich von dem demografischen Wandel, dem technologischen Fortschritt und der Globalisierung geprägt.

Der demografische Wandel spielt eine zentrale Rolle für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands bis 2050. Die Überalterung der Bevölkerung sowie deren Verringerung durch die sinkende Geburtenrate beeinflussen den Arbeitsmarkt erheblich und führen in einigen Branchen zu einem Mangel an Fachkräften. Die internationale Zuwanderung und die Anhebung des Renteneintrittsalters tragen zur Erweiterung der Arbeitskräftebasis bei. Trotz dieser Erweiterung nimmt die Wachstumsrate der Erwerbsbevölkerung ab.

Künstliche Intelligenz, Automatisierung und Digitalisierung transformieren die deutsche Wirtschaft, sie steigern die Produktivität und ermöglichen neue Geschäftsmodelle. Dieser technologische Fortschritt wird wie in den vergangenen Jahren zu einer weiteren Verschiebung der Wirtschaftsstruktur hin zum Dienstleistungssektor führen, wobei der Anteil des produzierenden Gewerbes abnimmt, während der Dienstleistungssektor überdurchschnittlich wächst.

Mit der Digitalisierung und virtuellen Arbeits- und Einkaufsmöglichkeiten nimmt die globale Vernetzung weltweit zu. Zugleich ist Deutschland nach wie vor stark in die Weltwirtschaft integriert, wobei der internationale Handel und grenzüberschreitende Investitionen wesentliche Wachstumstreiber sind. Allerdings können geopolitische Spannungen, Handelskonflikte sowie globale Ereignisse wie die Corona-Pandemie, der russisch-ukrainische Krieg und der Nahostkonflikt potenziell negative wirtschaftliche Auswirkungen haben. Trotz der globalen Herausforderungen ergeben sich für Deutschland durch die verstärkte Zusammenarbeit der europäischen Länder positive wirtschaftliche Perspektiven [24].

3.1.4 Globalisierung

Die multipolare Weltordnung beeinflusst derzeit Deutschlands internationale Beziehungen. Wie die meisten Industrieländer ist auch Deutschland von der weiteren Zunahme der Globalisierung betroffen, wobei diese erhebliche Auswirkungen sowohl auf die Wirtschaft als auch auf die internationale Zuwanderung hat.

Bis zum Jahr 2050 bietet die Globalisierung wirtschaftliche, technologische und soziokulturelle Wachstumspotenziale: globale wirtschaftliche Vernetzung, internationale Arbeitskräfte und interkultureller Austausch.

Deutsche Unternehmen bauen ihre globalen Netzwerke weiter aus und erhalten erleichterten Zugang zu globalen Arbeitsmärkten und günstigen Produktionsmöglichkeiten, wodurch die internationalen Handels- und Lieferketten gestärkt werden. Zur Minimierung der ökologischen Auswirkungen des erhöhten Handelsaufkommens wird eine umweltfreundliche Wirtschaftsweise durch die Förderung erneuerbarer Energien, die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft und die Etablierung nachhaltiger Produktionsmethoden angestrebt.

Der Arbeitsmarkt verzeichnet einen Strukturwandel mit neuen Arbeitsplätzen in exportorientierten Branchen und einem erhöhten Bedarf an hochqualifizierten Fachkräften aus aller Welt. Dies treibt die internationale Zuwanderung nach Deutschland weiter voran und führt zu einer gesellschaftlichen Vielfalt, die den kulturellen Austausch und das soziale Leben bereichert sowie die Weiterentwicklung einer multikulturellen Gesellschaft fördert (vgl. Kapitel 3.1.2).

Insgesamt wird die Globalisierung bis zum Jahr 2050 Deutschland sowohl Chancen als auch Herausforderungen bieten, die strategisch genutzt werden müssen, um wettbewerbsfähig und nachhaltig zu bleiben [24].

3.1.5 Technologische Entwicklungen

Technologische Entwicklungen lassen Deutschland von Forschung und Innovationen profitieren und verändern die deutsche Wirtschaft und Gesellschaft bis zum Jahr 2050.

Eine präzise Vorhersage und Quantifizierung technologischer Entwicklungen und ihrer Veränderungspotenziale ist nicht möglich. In diesem Themenfeld liegt der Fokus auf den vorhersehbaren Entwicklungen in den Bereichen Mobilität, Digitalisierung und Materialtechnologie.

Steigende Preise für fossile Brennstoffe und der Wunsch nach umweltfreundlichen Wirtschaftsweisen erhöhen die Nachfrage nach elektrifizierten Fahrzeugen. Dies führt zu einem Anstieg der Produktion von elektrifizierten Fahrzeugen, zu einer Verbesserung der Reichweite und zu sinkenden Fahrzeugpreisen. Zusätzlich nimmt der Ausbau von Ladestationen zu. Dadurch erhöht sich der Bestand an elektrifizierten Fahrzeugen (siehe Kapitel 3.2.3).

Darüber hinaus führt die Digitalisierung zu Veränderungen in der Arbeitswelt und im Konsumverhalten. Die Zahl der Homeoffice-Nutzung nimmt zu und der Online-Handel entwickelt sich weiter. Letzteres führt zu einem Anstieg des Lieferverkehrs, wodurch neue Herausforderungen im Verkehrsmanagement entstehen [39].

Des Weiteren sind Innovationen in der Materialtechnologie von entscheidender Bedeutung. Gebäudebegrünung und Photovoltaik werden weiterentwickelt und verstärkt eingesetzt (siehe Kapitel 3.2.4). Sie werden von den Behörden verstärkt gefördert, auch um die Luftqualität und die städtischen Lebensräume zu verbessern [41].

Neben den vorhersehbaren Entwicklungen lassen sich auch Entwicklungen identifizieren, die derzeit schwer prognostizierbar, aber möglich sind. Dazu gehören beispielsweise autonomes Fahren, digitale Mobilitätslösungen, innovative Verkehrssysteme und Stadtplanung, innovative Baustoffe sowie Cyberspace-Technologien (vgl. Kapitel 2.2).

3.1.6 Urbanisierung

Die Abbildung 3.1 zeigt den Urbanisierungsgrad der vergangenen Jahre und die Prognose bis 2050. In den letzten Jahren war die Urbanisierung in Deutschland deutlich stärker als im übrigen Europa, wobei sich dieser Unterschied ab 2010 verringerte. Auch wenn sich der deutsche und der europäische Urbanisierungsgrad parallel entwickeln, wird der Anteil der in Städten lebenden Bevölkerung in Deutschland weiterhin leicht über dem europäischen Durchschnitt liegen. Im Jahr 2020 lag der Urbanisierungsgrad in Deutschland bei knapp 75 %, weltweit bei knapp 56 %. Bis 2050 steigt der Urbanisierungsgrad in Deutschland auf rund 83 %, weltweit auf 66 % [24].

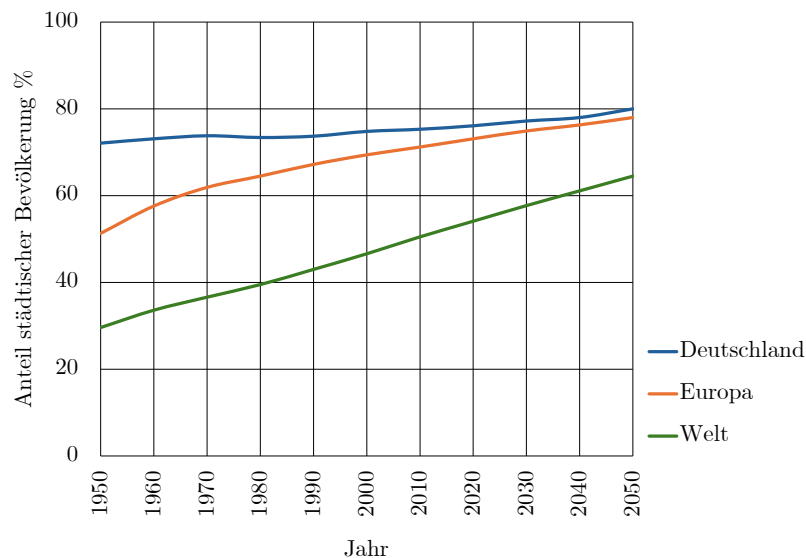


Abbildung 3.1: Historische und projizierte Anteile an städtischer Bevölkerung in Deutschland, Europa und der Welt gemäß [24]

Die Urbanisierung führt vor allem innerhalb Deutschlands zu Binnenwanderungen und damit zu siedlungsstrukturellen Veränderungen, wobei durch diesen Prozess einige Städte wachsen und andere schrumpfen. Bei der Betrachtung dieser schrumpfenden und wachsenden Städte werden verschiedene Faktoren, wie die Bevölkerungsdichte, die Arbeitslosenquote, das Wanderungssaldo, die sozialversicherungspflichtige Beschäftigung und die Gewerbesteuererinnahmen berücksichtigt [31].

Die Bevölkerungswanderung in urbanen Gebieten wird in Deutschland bis 2050 maßgeblich durch die wirtschaftliche Entwicklung und den damit verbundenen demografischen Wandel vorangetrieben und weiter zunehmen, so dass viele städtischen Gebiete weiter wachsen und einen höheren Anteil an der wirtschaftlichen und sozialen Struktur Deutschlands einnehmen werden.

Diese zunehmende Urbanisierung führt zu einer Veränderung der räumlichen Verteilung der siedlungsstrukturellen Kreisebenen mit Auswirkungen auf die Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr und damit auf die Entwicklung der städtischen Infrastruktur. Die Flächeninanspruchnahme hängt vor allem von der Bevölkerungsentwicklung, der Wirtschaftsentwicklung, der Bautätigkeit und den Bodenpreisen ab. In Städten mit Bevölkerungszunahme steigt die Nachfrage nach Wohnraum, was zum Bau neuer Wohnungen und damit zur Neuausweisung von Siedlungsflächen führt. Dies führt zwangsläufig zu einem erhöhten Bedarf an Verkehrsflächen. Steigende Einkommen erhöhen gleichzeitig die Nachfrage nach größeren Grundstücken. Steigende Bodenpreise wiederum verringern die Nachfrage nach Neubauten [24].

Die Bundesregierung strebt durch verschiedene städtebauliche Maßnahmen und politische Strategien eine Reduzierung der täglichen Flächeninanspruchnahme bis 2050 an, um die Klimaschutzziele zu erreichen [42].

Eine nicht nachhaltige Flächennutzung kann die räumliche Struktur durch Veränderung der Bodenfläche und der Bebauungsdichte negativ beeinflussen, was sich wiederum auf die Schallausbreitungsbedingungen auswirkt. In Kapitel 3.3 wird die Erreichung der Klimaschutzziele zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme für Deutschland bis 2050 beschrieben. Dabei werden die Ziele im Referenzszenario verfehlt, im Stabilitätsszenario hingegen erreicht.

3.1.7 Mobilisierung

Die Mobilität in Deutschland wird in besonderem Maße durch Politik, Nachhaltigkeitsziele und technologische Entwicklungen geprägt, die den Alltag und die Infrastruktur verändern. Einer der wichtigsten Treiber ist der angestrebte Klimaschutz, da der Verkehrssektor einen erheblichen Anteil an CO_2 -Emissionen hat. Die Reduzierung dieser Emissionen im Verkehrssektor steht daher im Mittelpunkt der Mobilitätsstrategien bis 2050.

Zentrale Strategien im Personenverkehr sind die Förderung elektrifizierter Fahrzeuge und der Ausbau der Ladeinfrastruktur. Die Nachfrage nach elektrifizierten Fahrzeugen wird durch Effizienzgewinne und Produktivitätssteigerungen vorangetrieben. Der öffentliche Verkehr auf Straße und Schiene wird weiter ausgebaut. Insbesondere wird versucht, innerhalb eines Modal Splits möglichst viele Verkehrsleistungen von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Der Radverkehr gewinnt durch den Ausbau von Radwegen und die Einführung von Fahrradstraßen weiter an Bedeutung, ebenso der Fußgängerverkehr in vielen innerstädtischen Bereichen, wobei möglichst kurze Wege z.B. zum Einkaufen, zur Arbeit und zur Schule geschaffen werden. Zudem werden die Möglichkeiten zur Telearbeit ausgebaut, um den Berufsverkehr zu reduzieren. Darüber hinaus zielen politische Ansätze darauf ab, die Menschen zu einem umweltbewussten Verhalten zu bewegen. Ziel ist es, nachhaltige Städte zu schaffen, die nicht mehr primär auf das individuelle Kraftfahrzeug ausgerichtet sind, und eine gerechtere Verteilung des öffentlichen Raums für den Verkehr zu ermöglichen [2].

Die zentralen Strategien im Güterverkehr sind die mögliche Verlagerung von Transporten von der Straße auf die Schiene sowie die Optimierung des verbleibenden Straßengüterverkehrs. Dazu gehören z.B. Marktzugang und Marktregulierung, ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik, finanzielle Förderungen und Subventionen sowie Infrastrukturpolitik [25].

In Kapitel 3.3 wird detailliert darauf eingegangen, inwieweit die Mobilitätsstrategien in Deutschland eine nachhaltige Stadtentwicklung im Referenz- und Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 ermöglichen können, wobei der Fokus auf der Verkehrsentwicklung im Personen- und Güterverkehr liegt. Dabei werden die Klimaschutzziele bis zum Jahr 2050 im Referenzszenario verfehlt und deutlich verzögert, im Stabilitätsszenario hingegen erreicht.

3.2 Szenario-Rahmenbedingungen

3.2.1 Begründung der Auswahl

Die fortschreitende Urbanisierung und Mobilisierung treibt auch die Entwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen, die Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen, die Gebäudebegrünungen und Photovoltaikanlagen voran. Gleichzeitig beeinflussen diese Entwicklungen auch den Straßenverkehrslärm.

Elektrifizierte Fahrzeuge führen zu einer deutlichen Reduzierung der Antriebsgeräusche. Die Einführung eines generellen Tempolimits reduziert den Verkehrslärm auf Autobahnen. Dach- und Fassadenbegrünungen haben ebenfalls das Potenzial, die Schallreflexion des Straßenverkehrslärms zu reduzieren. Pflanzen und Substratschichten auf Gebäudeoberflächen können je nach Absorptionsgrad und Flächenanteil als poröse Oberflächen wirken und die Schallreflexion bis zu einem gewissen Grad absorbieren. Dagegen können Photovoltaikanlagen durch Schallreflexion den Straßenverkehrslärm verstärken.

Für das Jahr 2050 werden diese Entwicklungen sowohl im Referenzszenario als auch im Stabilitätsszenario als Rahmenbedingungen unter Betrachtung der gleichen Eigenschaften festgelegt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Entwicklungen in beiden Szenarien identisch verlaufen werden. Selbst bei unterschiedlichen Verläufen ist kein signifikanter Einfluss auf den Straßenverkehrslärm zu erwarten. Denn um einen wahrnehmbaren Pegelunterschied zu erreichen, müsste sich die Schallenergie verdoppeln oder halbieren. Zwischen dem Referenzszenario und dem Stabilitätsszenario im Jahr 2050 ist jedoch weder eine Verdopplung noch eine Halbierung der Schallenergie durch diese Entwicklungen zu erwarten.

3.2.2 Antriebstechnologien und Schallemissionen von Kraftfahrzeugen

Die Schallemissionen eines vorbeifahrenden Kraftfahrzeugs werden durch Reifen-Fahrbahngeräusche, aerodynamische Geräusche und Antriebsgeräusche erzeugt.

Die **Reifen-Fahrbahngeräusche** werden durch die Interaktion der Reifen mit der Fahrbahnoberfläche erzeugt. Die Geräuschentwicklung ist dabei von der Geschwindigkeit und dem Gewicht des Fahrzeugs, dem Reifenprofil sowie der Beschaffenheit der Fahrbahn abhängig. Beim Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche erfolgt eine Verformung der Reifenprofile. Die Luft in den Reifenprofilen wird zu Beginn und am Ende des Kontakts des Reifens mit der Straße verdrängt, wodurch ein Schalltrichter entsteht.

Die **aerodynamischen Geräusche** entstehen durch den Luftstrom um das Fahrzeug. Die Geräuschentwicklung wird maßgeblich durch die Form des Fahrzeugs, Anbauteile sowie die Geschwindigkeit beeinflusst. Diese Geräusche nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit zu und sind insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten ab 100 km/h von maßgeblicher Bedeutung [43].

Die **Antriebsgeräusche** sind von der eingesetzten Antriebstechnologie sowie den mechanischen Komponenten des Fahrzeugs abhängig.

Es gibt alternative technische Optionen für zukünftige Antriebstechnologien für Personenkraftwagen (Pkw) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF). Dazu zählen Fahrzeuge, die ausschließlich durch einen Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) angetrieben werden, oder ausschließlich durch einen Elektromotor (E-Kfz), sowie Kombinationen aus Verbrennungs- und Elektromotoren (Hybrid).

Verbrennungsmotoren nutzen chemische Energie aus Kraftstoff, um mechanische Energie zu erzeugen. Die Antriebsgeräusche werden durch die Schallabstrahlung des Motors, der Ansaug- und Abgasanlage sowie weiterer mechanischer Aggregate erzeugt, wobei diese wiederum je nach Antriebsart und Motordrehzahl variieren. Die verschiedenen Antriebsarten lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Dieselmotoren
- Benzinmotoren
- LPG-Motoren (Liquefied Petroleum Gas)

- CNG-Motoren (Compressed Natural Gas)

Fahrzeuge mit reinem Elektromotor nutzen jedoch elektrische Energie zur Fortbewegung. Dabei wird zwischen zwei Kategorien unterschieden:

- Batterie-Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles - BEV)
- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles - FCEV)

Hybridfahrzeuge kombinieren Verbrennungs- und Elektromotoren und werden in zwei Kategorien unterteilt:

- Hybrid-Elektrofahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles - HEV)
- Plug-In-Hybrid Elektrofahrzeuge (Plug-In-Hybrid Electric Vehicles - PHEV)

Bei schweren Nutzfahrzeugen werden ähnliche Antriebstechnologien verwendet, wobei die jeweilige Ausgestaltung von der Einsatzart und Fahrzeuggröße abhängt. Dabei besteht die Möglichkeit, diese Antriebe in der Zukunft durch stromgenerierte Kraftstoffe zu unterstützen. Folgende antriebstechnische Konzepte stehen für den Straßengüterverkehr zur Verfügung¹ [25]:

- mit Power-to-Liquid Kraftstoffen (PtL) betriebene Diesel-Lkw
- mit Power-to-Gas Kraftstoffen (PtG) betriebene CNG (Compressed Natural Gas) und LNG (Liquefied Natural Gas), als Dual-Fuel Fahrzeuge ausgelegte Lkw
- mit PtG-Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Elektro-Lkw
- Batterie-Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles - BEV)

Die Reduzierung der Geräusche eines Kraftfahrzeugs ist seit vielen Jahren eines der Ziele der Automobilindustrie. Die Grenzwerte für das Motorengeräusch eines neu zugelassenen Fahrzeugs im Rahmen der Typgenehmigung werden durch die Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments kontinuierlich verschärft [44].

Infolgedessen und durch die Entwicklung von Elektromotoren konnten die Antriebsgeräusche deutlich reduziert werden. Bei einem Vergleich des Vorbeifahrpegels von Pkw mit Verbrennungsmotor und Elektromotor (sowie Hybridmotor) zeigt sich ein wahrnehmbarer Unterschied im Schalldruckpegel bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h (vgl. Abbildung 3.2).

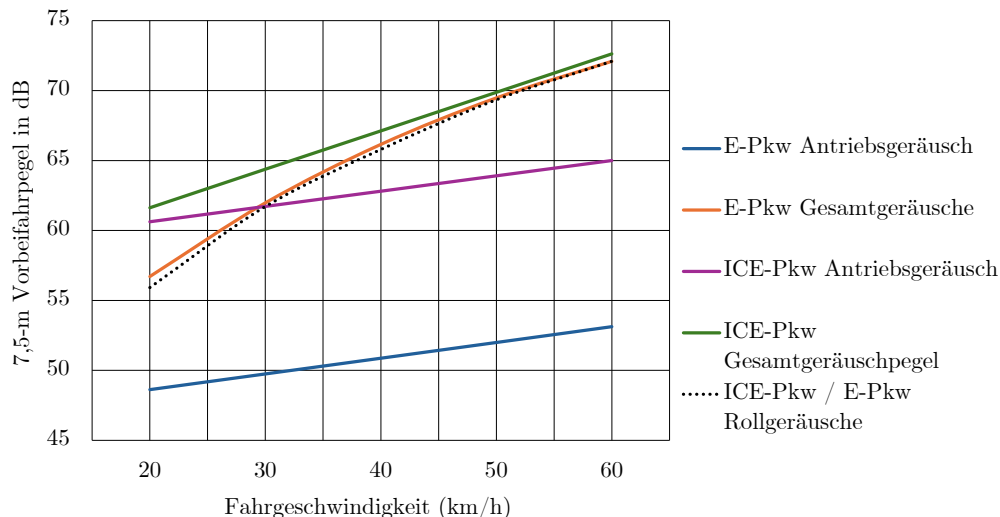


Abbildung 3.2: 7,5-m Vorbeifahrpegel von ICE-Pkw (Internal Combustion Engine, ICE) und E-Pkw (BEV) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit gemäß [27]

Des Weiteren ist bei einem Vergleich zwischen Hybridfahrzeugen und rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen unter 50 km/h lediglich ein Unterschied von 1 bis 2 dB festzustellen (vgl. Abbildung 3.3).

¹Der Einsatz von Oberleitungs-Hybrid-Lkw ist in Zukunft nicht zu erwarten, weshalb diese Technologie in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wird [39].

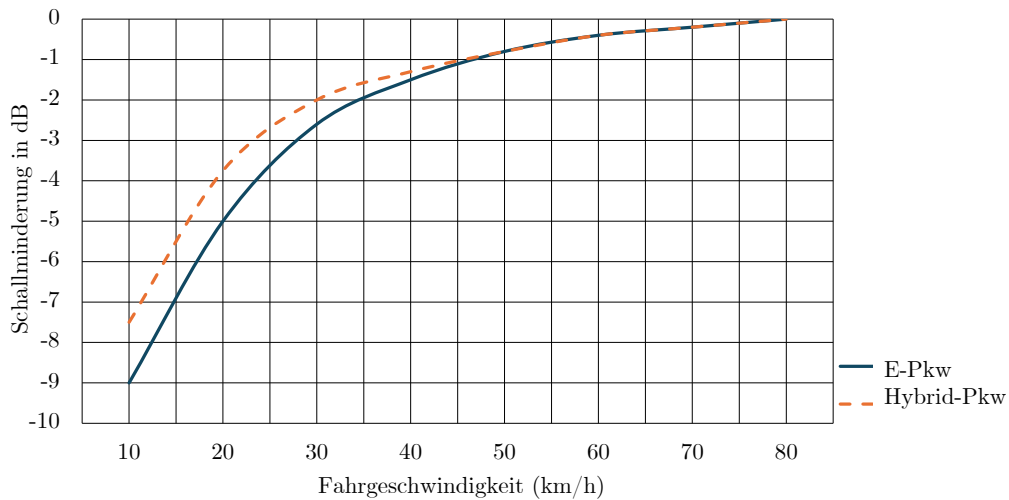


Abbildung 3.3: Vergleich der Lärminderung von E-Pkw und Hybrid-Pkw in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit gemäß [45]

Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Reifen-Fahrbahngeräusche sowie die aerodynamischen Geräusche maßgeblicher als das Antriebsgeräusch. Dies verdeutlicht, dass die Verbesserung des Motors eines Kraftfahrzeugs vor allem bei niedrigeren Geschwindigkeiten das größte Lärminderungspotenzial bietet [45].

Das nahezu geräuschlose Anfahren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen birgt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko im Straßenverkehr. Insbesondere für sehbehinderte Fußgänger sowie für Kinder, Radfahrer, ältere Menschen und abgelenkte Fußgänger besteht ein deutlich erhöhtes Risiko. Um das Sicherheitsrisiko zu minimieren, hat die EU die Einführung eines akustischen Warnsystems (AVAS – Acoustic Vehicle Alerting System) in der Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments festgelegt. Gemäß dieser Verordnung, Anhang VIII, müssen seit Juli 2021 alle neu zugelassenen Hybrid- und Elektrofahrzeuge in der EU mit einem AVAS ausgestattet sein. Das System erzeugt bei Geschwindigkeiten zwischen 0 und 20 km/h sowie beim Rückwärtsfahren künstliche Fahrgeräusche. Diese Geräusche sind akustische Signale zur Wahrnehmung des Fahrzeuges, seiner Geschwindigkeit und Fahrtrichtung. Das Signal muss einem Verbrennungsmotor ähneln und darf nicht leiser als dieser sein, um einen vertrauten akustischen Hinweis zu geben [44].

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Forschungsarbeit das Lärminderungspotenzial von elektrifizierten Fahrzeugen bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 20 km/h und 50 km/h analysiert. Geschwindigkeiten unter 20 km/h werden aufgrund des Grenzwertes des AVAS-Warnsystems nicht berücksichtigt.

3.2.3 Entwicklung des Fahrzeugbestands

Die Entwicklung des Fahrzeugbestands sowie der elektrifizierten Anteile bis zum Jahr 2050 basieren im Wesentlichen auf den Neuzulassungen sowie den Überlebenskurven der Fahrzeuge aus der Zukunftsforschung “Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050 [25]”. Aktuelle Entwicklungen werden ebenfalls berücksichtigt. Die Aufteilung der Fahrzeuggruppen (sowie der Fahrzeuggruppen nach zulässiger Gesamtmasse) erfolgt gemäß der Richtlinie RLS-19 [16].

Personenkraftwagen

Derzeit sind in Deutschland 59,6 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen, von denen der Großteil mit Verbrennungsmotoren ausgestattet ist (Stand 2024). Davon sind 49 Millionen Personenkraftwagen (Pkw), von denen 5,2 Mio. (11 %) elektrisch angetrieben werden. Der Anteil der elektrifizierten Pkw im Jahr 2020 lag bei 1,6 % und damit deutlich unter dem heutigen Wert von 11 % [46].

Im Jahr 2050 bleibt der Pkw-Bestand vor allem aufgrund der Bevölkerungsentwicklung konstant bei 49 Millionen [39]. Gleichzeitig werden elektrifizierte Fahrzeuge weiterhin gefördert, was zu einem deutlichen Anstieg des Anteils elektrisch betriebener Fahrzeuge auf etwa 73 % (davon 26 % PHEV) führt (vgl. Abbildung 3.4)[25].

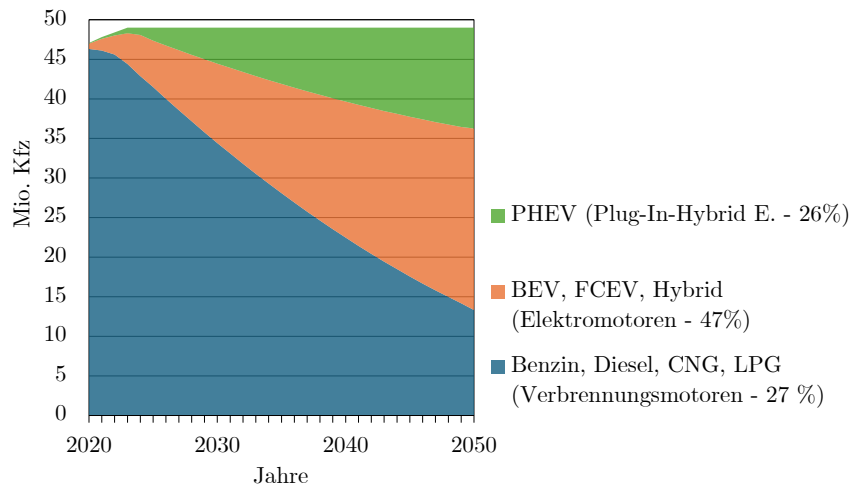


Abbildung 3.4: Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Pkw je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]

Lastkraftwagen mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t - Leichte Nutzfahrzeuge

Der Bestand an leichten Nutzfahrzeugen (LNF) betrug im Jahr 2016 rund 2,3 Millionen. Infolge der Corona-Pandemie ist er auf 3,3 Millionen angestiegen². Dies ist vor allem auf ein verändertes Einkaufsverhalten der Bevölkerung zurückzuführen. Nach einer Umfrage der Gesellschaft für integrierte Kommunikationsforschung in Deutschland gaben 82 % der Befragten an, dass die Corona-Pandemie zu einer Veränderung ihrer Einkaufsgewohnheiten geführt hat. 50 % der Befragten gaben an, dass sie ihre Einkaufsgewohnheiten im Internet beibehalten werden [47]. Dies hat zu einem Boom im Kurier-, Express- und Paketverkehr (KEP-Verkehr) geführt, der insbesondere von spezialisierten Logistikunternehmen abgewickelt wird.

Dies wird auch durch die Analyse der KEP-Branche bestätigt, da das Sendungsvolumen vor der Corona-Pandemie um 5,2 % pro Jahr und während der Pandemie um 11 % pro Jahr gestiegen ist. Darüber hinaus wurde prognostiziert, dass das KEP-Sendungsvolumen bis 2025 um 5,7 % pro Jahr steigen wird. Seit Beginn des Russland-Ukraine-Konflikts ist auch im Online-Handel eine Kaufzurückhaltung zu beobachten, die zu reduzierten Wachstumsraten führt. Dementsprechend wird im Jahr 2021 eine neue Prognose des Sendungsvolumens erstellt, die bis 2026 einen Anstieg von 5,34 % pro Jahr prognostiziert [26].

Heute liegt der Anteil der elektrifizierten LNF bei ca. 2,6 % (Stand 2024 [46]). Dieser Anteil steigt bis 2050 stark an, da sich die Logistikunternehmen bereits das Ziel gesetzt haben, ihre KEP-Dienste CO_2 -neutral zu gestalten. Aus diesem Grund haben Automobilhersteller (z.B. Ford) mit Logistikunternehmen (z.B. Deutsche Post DHL Group) Vereinbarungen unterzeichnet, um den Einsatz von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen [48].

Diese Entwicklungen zeigen für das Jahr 2050 eine Beibehaltung des LNF-Bestands auf hohem Niveau mit einem Bestand von 3,5 Millionen Fahrzeugen, von denen etwa 71,4 % (davon 31,8 % PHEV) elektrifiziert sein werden (vgl. Abbildung 3.5).

²Der Vergleich des aktuellen LNF-Bestandes [46] mit den prognostizierten Werten aus der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050 [25]“ zeigt eine erhebliche Abweichung. Für das Jahr 2050 wurde ein Bestand von 2,5 Mio. prognostiziert, während heute (2024) bereits ein Bestand von rund 3,0 Mio. erreicht ist. Siehe Kapitel 3.3.1

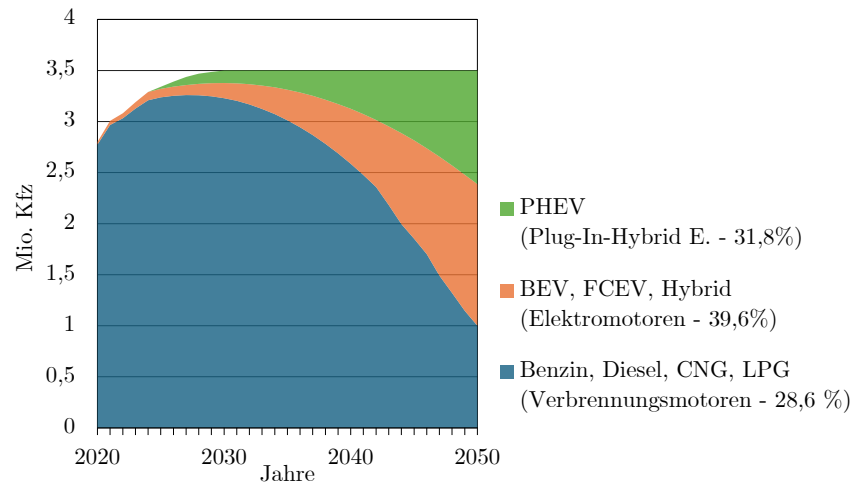


Abbildung 3.5: Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Lkw bis 3,5 t zGM je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]

Busse

Heute gibt es in Deutschland rund 84.600 Busse, von denen bereits etwa 10 % elektrisch betrieben werden (Stand 2024 [46]).

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms hat die Bundesregierung den öffentlichen Nahverkehr dazu verpflichtet, bis 2030 die Hälfte der Stadtbusse elektrisch zu betreiben. Des Weiteren schreibt seit August 2021 die Richtlinie zur Beschaffung sauberer Fahrzeuge (Clean Vehicles Directive, CVD) der Europäischen Kommission bei Neuanschaffungen zumindest anteilig die Einführung von Bussen mit emissionsarmen oder -freien Antrieben vor. Infolgedessen werden seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur insgesamt 99 Projekte zur Entwicklung, Beschaffung und zum Betrieb von 1.967 ÖPNV-Linienbussen bei 80 Verkehrsunternehmen gefördert. Einige Verkehrsunternehmen streben bereits an, bis 2030 mindestens 90 % ihrer Busflotten zu elektrifizieren (z.B. Münchner Verkehrsgesellschaft MVG) [49]. Unter Berücksichtigung dieser Unternehmensziele wird prognostiziert, dass im Jahr 2050 ein konstanter Anteil von 85 % der Busflotte elektrisch betrieben wird³.

Lastkraftwagen mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t und Sattelkraftfahrzeuge - Schwere Nutzfahrzeuge

Der aktuelle Bestand an Lastkraftwagen (Lkw) über 3,5 Tonnen liegt bei rund 531.000 Fahrzeugen, davon sind rund 0,2 % elektrifiziert. Der Bestand an Sattelkraftfahrzeugen beläuft sich auf etwa 200.000 Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Anteil von weniger als 0,1 % [46].

Aufgrund der hohen Kosten werden stromgenerierte Kraftstoffe wie Power-to-Liquid und Power-to-Gas in Zukunft vor allem im internationalen Luft- und Seeverkehr und weniger im Straßenverkehr eingesetzt. Dies führt bereits heute zu einem erhöhten Investitionsbedarf in elektrifizierte Antriebstechnologien und den Ausbau der Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge⁴ [50].

Bis zum Jahr 2050 wird der Bestand an schweren Nutzfahrzeugen (SNF) konstant bleiben. Ab dem Jahr 2030 ist mit einer Zunahme des elektrifizierten Anteils bei den Lkw über 3,5 t zGM zu rechnen, der bis zum Jahr 2050 auf rund 8 % (davon 3,7 % PHEV) ansteigen wird (vgl. Abbildung 3.6).

Bei den Sattelkraftfahrzeugen hingegen wird in der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ bis 2050 keine Elektrifizierung erwartet [25]. Im Gegensatz dazu erwarten andere

³Im Bericht „TREMOT/TREMOT-MM-Modelle für die Emissionsberichterstattung 2020 (UBA, 2020)“ wird für die Neuzulassungen von Nahlinienbusse ab 2030 ein Anteil von 50%, ab 2050 von 100% und für Fernlinien- und Reisebusse ab 2030 von 1%, ab 2050 von 4% angenommen [37]. Da in dieser Arbeit ein pauschaler Wert für die gesamte Busflotte angenommen wird und noch keine Zukunftsforschung für die Busflotte vorliegt, wird eine Prognose von 85 % angenommen.

⁴Ein Beispiel für eine elektrifizierte Sattelzugmaschine ist der Tesla Semi Truck, dessen Prototypen 2017 vorgestellt wurden (Tesla Semi Truck, Tesla Inc. <https://www.tesla.com/semi>, erreicht am 06.12.2024).

Zukunftsforschungen einen höheren Anteil. So geht beispielsweise die Forschung des Öko-Instituts e.V. „Szenarien für die Elektrifizierung des Straßenverkehrs“ bereits für das Jahr 2045 von einem vollständig elektrifizierten Anteil aus [51].

Da die neuesten Technologien der Automobilindustrie von der Bundesregierung gefördert werden und die Entwicklung elektrifizierter Antriebstechnologien für Sattelkraftfahrzeuge bereits begonnen hat, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass diese Antriebe in Zukunft vermehrt eingesetzt werden. Daher wird in der vorliegenden Arbeit der in der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ für Lkw über 3,5 t zGM angenommene Elektrifizierungsanteil von 8 % auch für Sattelkraftfahrzeuge angenommen.

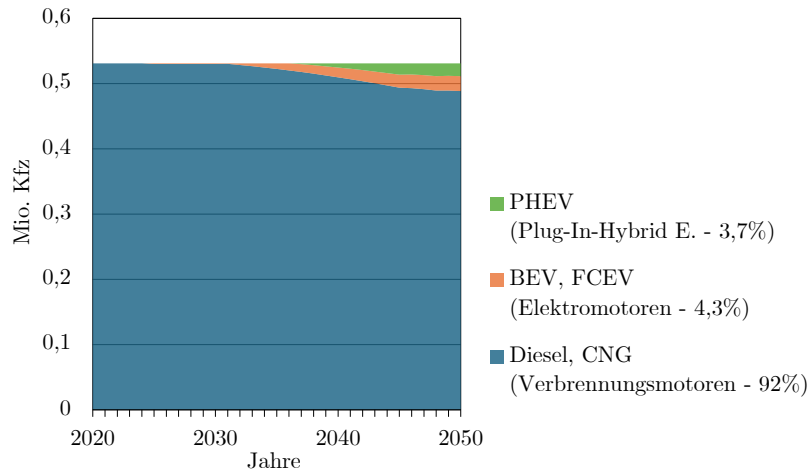


Abbildung 3.6: Entwicklung des Fahrzeugbestandes bei Lkw über 3,5 t zGM je nach Antriebstechnologie gemäß [25],[46]

Krafträder

Im Jahr 2020 betrug der Bestand an Krafträdern insgesamt 4,5 Millionen, wovon nur ein geringer Anteil von 0,3 % elektrisch angetrieben war [52]. Ab dem Jahr 2022 nehmen die Neuzulassungen mit elektrischem Antrieb zu und erreichen aktuell einen Bestand von 5 Millionen Krafträdern mit einem elektrifizierten Anteil von 1,3 % (Stand 2024) [46].

Derzeit gibt es keine offiziellen Ziele für die Elektrifizierung von Krafträdern. Allerdings gibt es einige Unternehmen, die sich emissionsfreien oder emissionsarmen Antriebstechnologien widmen (z.B. Zero Motorcycles und Harley-Davidson). Insbesondere ab 2022 haben diese Projekte zu einem Anstieg der Neuzulassungen von elektrisch angetriebenen Krafträdern geführt.

Bis 2050 werden die Neuzulassungen von Krafträdern konstant bleiben, wobei der Anteil der Elektrofahrzeuge zunimmt. Bis 2030 werden etwa 5 % und bis 2050 etwa 20 % der Neuzulassungen elektrisch sein. Der Bestand an Krafträdern wird demnach im Jahr 2050 etwa 5 Millionen betragen, wovon etwa 14 % elektrisch angetrieben sein werden (vgl. Abbildung 3.7) [37].

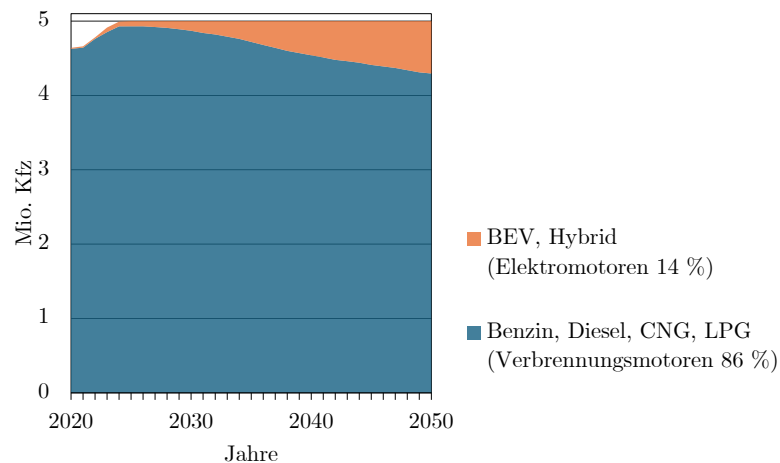


Abbildung 3.7: Entwicklung des Bestandes bei Krafträdern je nach Antriebstechnologie gemäß [37]

3.2.4 Analyse der Fahrleistungsanteile

Fahrleistungsanteil von Plug-in-Hybridfahrzeugen im Jahr 2050

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, ist das Schallminderungspotential durch elektrisch betriebene Fahrzeuge abhängig vom Anteil der Elektrofahrzeuge (E-Kfz) am Gesamtverkehr bei Geschwindigkeiten zwischen 20 km/h und 50 km/h. Zu den elektrifizierten Kraftfahrzeugen gehören allerdings Plug-in-Hybride (PHEV), die sowohl elektrisch als auch mit Verbrennungsmotor betrieben werden können.

Die Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ zeigt auf, dass Nutzer von PHEV-Fahrzeugen in den ersten Jahren nach der Markteinführung eine signifikant höhere elektrische Fahrleistung aufweisen als in späteren Jahren (siehe Tabelle 3.1). Die Aufteilung erfolgt für Pkw und LNF nach Straßenkategorien, wobei innerorts ein höherer Anteil angenommen wird als außerorts. Diese Annahme wird auch in dieser Arbeit für die Berechnung des Schallminderungspotenzials von Elektrofahrzeugen verwendet (vgl. Kapitel 4.2) [25].

Jahr	Außerorts	Innerorts
2020	70 %	90 %
2030	65 %	87 %
2040	60 %	84 %
2050	55 %	80 %

Tabelle 3.1: Elektrischer Fahrleistungsanteil der Plug-in-Hybrid Elektrofahrzeuge nach [25]

In der nachfolgenden Tabelle 3.2 werden die aufsummierten elektrifizierten Anteile in Bezug auf die Fahrzeugbestände (nach Kapitel 3.2.3) und Fahrleistungsanteile der PHEV (vgl. Tabelle 3.1) nach innerorts und außerorts aufgeführt⁵.

E-Fahrleistungsanteil 2050	Außerorts	Innerorts
Pkw	61 %	68 %
Lkw bis 3,5 t zGM	57 %	65 %
Lkw über 3,5 t zGM	6,3 %	7,2 %
Sattelkraftfahrzeug	8 %	
Krafträder	14 %	
Busse	85 %	

Tabelle 3.2: Anteil der elektrifizierten Fahrleistung von Kraftfahrzeugen nach Straßenkategorie für das Jahr 2050

Fahrleistungsanteile von Fahrzeuggruppen im Gesamtverkehr

Im Folgenden erfolgt eine Unterteilung der Fahrzeuggruppen, die zur Berechnung der längenbezogener Schalleistungspegel nach RLS-19 für die Prognosemodelle 2050 herangezogen wird. Die Grundlage dazu stellt ein Vergleich aktueller und prognostizierter Forschungsdaten zu den Anteilen der Fahrleistungen im Gesamtverkehr dar.

⁵Auf die Berechnung einer PHEV-Fahrleistungsanteils für Busse, Krafträder und Sattelzugmaschinen wird aufgrund der begrenzten zukünftigen Einsatzmöglichkeiten verzichtet. Dies bedeutet nicht, dass es in Zukunft keine PHEV-Bestände in diesen Fahrzeugkategorien geben wird. Falls der Anteil dieser Fahrzeugflotten dennoch steigt, wird dies aufgrund der geringen Auswirkungen auf die längenbezogenen Schalleistungspegel keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Schallimmissionen haben, da weder eine Verdopplung noch eine Halbierung der Schallenergie zu erwarten ist.

In der folgenden Tabelle 3.3 sind die prozentualen Anteile der Fahrleistungen am Gesamtverkehr für die Jahre 2020 und 2019⁶ nach den Daten des Statistischen Bundesamtes „Verkehr in Zahlen 2022-2023 [38]“ sowie die Prognosen für das Jahr 2020 aus der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 [25]“ und dem Bericht „Aktualisierung der Modelle TREMOD/ TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 [37]“ dargestellt.

Fahrleistung in %	Pkw	Krafträder	Busse	Lkw <3,5t	Lkw >3,5t	sonst.
TREMOD 2020	82,6	1,8	0,5	6,6	8,0	0,4
Klimaschutzbeitrag 2020	83,3	2,1	0,5	5,7	7,9	0,4
Verkehr in Zahlen 2020	84,8	1,8	0,7	12,3		0,7
Verkehr in Zahlen 2019*	85,4	2,0	0,6	11,6		0,6

Tabelle 3.3: Fahrleistungsanteil im Gesamtverkehr Vergleich gemäß [38],[37],[25]

Ein Vergleich der aktuellen und der prognostizierten Daten für die Anteile der Fahrleistungen am Gesamtverkehr zeigt, dass die Unterschiede untereinander gering sind, so dass sich keine wahrnehmbaren Unterschiede der längenbezogenen Schalleleistungspegel ergeben. Da die Prognosedaten mit den vorliegenden Ergebnissen übereinstimmen und eine Anpassung der Fahrzeuggruppen nach RLS-19 möglich ist, wird die Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 [25]“ als Grundlage für die Berechnung der Fahrleistungsanteile der Fahrzeuggruppen übernommen (vgl. Kapitel 4.1.4).

3.2.5 Tempolimit auf Autobahnen

Deutschland ist das einzige Land in Europa und eines der wenigen Länder weltweit, das bisher kein generelles Tempolimit auf Autobahnen eingeführt hat. Die Einführung eines generellen Tempolimits auf deutschen Autobahnen wird daher seit Jahren in Politik und Gesellschaft diskutiert. Im Mittelpunkt der Diskussionen stehen insbesondere die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt. Autobahnen machen zwar nur etwa 1,5 % des gesamten Straßennetzes in Deutschland aus. Der Verkehr ist auf Autobahnen für mehr als 40 % der CO_2 -Emissionen des Pkw-Verkehrs verantwortlich (2020). Als Gründe hierfür werden häufig die intensive Nutzung der Autobahnen und die hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Autobahnen genannt.

Nach Schätzungen des Umweltbundesamtes kann ein Tempolimit von 120 km/h auf Autobahnen zu einer Minderung der CO_2 -Emissionen des Pkw- und leichten Nutzfahrzeugverkehrs in Deutschland insgesamt um etwa 2,7 % beitragen.

Neben der Minderung der Treibhausgasemissionen werden auch mögliche Senkungen der Luftschadstoffemissionen genannt. Durch niedrigere und gleichmäßigere Fahrgeschwindigkeiten könne der Verkehrsfluss verstetigt und damit der Ausstoß von Luftschadstoffen gesenkt werden. Nach Schätzungen des Umweltbundesamtes kann auf den betrachteten Autobahnabschnitten ein Tempolimit von 120 km/h die NO_x -Emissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen um etwa 28 % und die Feinstaubemissionen um etwa 24 % reduzieren.

Darüber hinaus werden auch die Lärmwirkungen diskutiert, wobei Tempolimits grundsätzlich als eine potenziell wirksame Maßnahme zur Reduzierung verkehrsbedingter Lärmemissionen angesehen werden.

Neben den Umweltwirkungen wird in der Diskussion häufig auf die Verkehrssicherheit verwiesen: Überhöhte Geschwindigkeit wird weiterhin als eine der Hauptursachen für schwere Unfälle auf Autobahnen genannt. In verschiedenen Arbeiten wird beschrieben, dass ein Tempolimit von 130 km/h die Anzahl tödlicher Unfälle und Schwerverletzter deutlich verringern könne [32].

Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass es sowohl im Referenz- als auch im Stabilitätsszenario gelingt, ein generelles Tempolimit von 120 km/h bis zum Jahr 2050 politisch durch-

⁶*2019 ist das Jahr vor Beginn der Corona-Pandemie

zusetzen. In Kapitel 4.3 werden die Lärmwirkungen der Einführung eines Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen für beide Szenarien genauer betrachtet.

3.2.6 Entwicklung der Dach- und Fassadenflächen

Gebäudebegrünungen

Die Verdichtung der Städte führt zu einem erhöhten Bedarf an Grünflächen, der durch Gebäudebegrünung unterstützt werden kann. Die Vorteile von Grünflächen sind vielfältig und tragen zur Optimierung der wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Gegebenheiten in städtischen Gebieten bei: Verbesserung der Luftqualität und des Mikroklimas, Regenwasserbewirtschaftung, Erhaltung der Biodiversität, Erhaltung und Schutz von Gebäuden, architektonische Gestaltung des Stadt- und Landschaftsbildes [53].

Zu den Gebäudebegrünungen zählen sowohl Dach- als auch Fassadenbegrünungen. Im Allgemeinen werden Dachbegrünungen in extensive und intensive Begrünungen unterteilt. Extensive Dachbegrünungen überzeugen durch eine geringe Aufbauhöhe sowie eine trockenheitsverträgliche und pflegeleichte Vegetationsschicht. Intensive Dachbegrünungen hingegen weisen einen höheren Aufbau und ein höheres Gewicht auf und erfordern in der Regel einen höheren Pflegeaufwand.

Auch bei der Fassadenbegrünung wird grundsätzlich zwischen boden- und wandgebundener Begrünung unterschieden. Bodengebundene Begrünungen sind traditionelle Kletterpflanzen, die entweder selbstkletternd sind oder geeignete dauerhafte Kletterhilfen benötigen. Die Wasser- und Nährstoffversorgung erfolgt in der Regel auf natürliche Weise. Eine regelmäßige Pflege ist erforderlich, jedoch in geringerem Umfang als bei wandgebundenen Begrünungen.

Wandgebundene Begrünungen bilden ein komplexeres Fassadensystem mit einem breiten Spektrum an verwendbaren Pflanzenarten. Die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen erfolgt in der Regel über automatische Anlagen. Diese Systeme bieten sofortige Wirksamkeit sowie große Gestaltungsspielräume, beispielsweise für „vertikale Gärten“. Der Pflege- und Wartungsaufwand ist abhängig von der jeweiligen Gestaltung sowie dem verwendeten System [41].

Die Entwicklung in Deutschland

In den letzten Jahren haben Dach- und Fassadenbegrünungen in Deutschland deutlich zugenommen. Dachbegrünungen haben eine lange Tradition, die sich seit Mitte der 1970er Jahre kontinuierlich weiterentwickelt hat. Laut dem Bundesverband zur Gebäudebegrünung (BuGG) umfasst die Gesamtfläche der begrünten Dächer in Deutschland rund 170.000.000 m². Das entspricht ca. 26.500 Fußballfeldern⁷.

Die Abbildung 3.8 zeigt die jährlich neu begrünten Dachflächen in Deutschland im Zeitraum von 2009 bis 2023. Dabei wird zwischen extensiver und intensiver Begrünung unterschieden. Es zeigt sich eine signifikante Zunahme der gesamten Dachbegrünungsfläche, die im Jahr 2023 nahezu 10 Millionen Quadratmeter erreicht hat. Insbesondere ab dem Jahr 2016 ist ein steiler Anstieg der extensiven Dachbegrünung zu beobachten, während die intensive Begrünung einen geringeren, aber stabilen Zuwachs verzeichnet.

Des Weiteren ist eine signifikante Zunahme der Fassadenbegrünungen in den vergangenen Jahren zu verzeichnen. Die Abbildung 3.9 zeigt die jährliche kontinuierliche Zunahme der Fassadenbegrünungsflächen in Deutschland von 2019 bis 2023. Im Jahr 2023 wurden insgesamt etwa 130.000 m² Fassadenfläche neu begrünt, davon etwa 27.700 m² mit wandgebundener Begrünung.

Grund für die in den letzten Jahren gestiegene Nachfrage nach Gebäudebegrünungen ist die zunehmende Bedeutung einer klimaangepassten Stadtentwicklung. Diese Entwicklung hat die zuständigen Behörden dazu veranlasst, verschiedene kommunale Instrumente zu fördern, um die Umsetzung von Maßnahmen zur Gebäudebegrünung zu unterstützen. Der Bebauungsplan ist dabei das am weitesten verbreitete Instrument. Er ermöglicht es den Städten, Vorgaben zu machen und spezifische Maßnahmen zur Klimaanpassung in städtischen Gebieten rechtlich zu verankern. Im Jahr 2023 haben 90 % der Städte mit über 50.000 Einwohnern Dachbegrünungen und 63 % der Städte Fassadenbegrünungen in ihren Bebauungsplänen festgesetzt, während im Jahr 2020 72 % begrünte

⁷einschließlich Extensiv-, Intensiv- und Tiefgaragenbegrünung

Dächer und 40 % begrünte Fassaden in ihren Bebauungsplänen festgesetzt hatten. Ergänzend dazu nutzen einige Städte Gestaltungssatzungen, um die bauliche Gestaltung von Gebäuden weiter zu steuern. Im Jahr 2023 verfügten 13 % der Städte über eine Gründach-Satzung und 9 % über eine Grünfassaden-Satzung.

Neben der rechtlichen Verankerung in Bebauungsplänen und Satzungen setzen viele Städte auch auf finanzielle Anreize zur Förderung von Begrünungsmaßnahmen. Im Jahr 2023 stellten 47 % der Städte finanzielle Zuschüsse für Dachbegrünungen und 39 % für Fassadenbegrünungen bereit. Diese Förderprogramme, die häufig aus kommunalen Haushalten finanziert und durch Landes- oder Bundesmittel ergänzt werden, richten sich primär an Privatpersonen sowie kleine und mittelständische Unternehmen. Darüber hinaus wird auch in der Eingriffsregelung nach dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) der Beitrag von Dach- und Fassadenbegrünungen zur Minderung von Eingriffen in Natur und Landschaft anerkannt. Zudem sind diese Maßnahmen oft mit einer Gebührenreduktion bei der gesplitteten Abwassergebühr verbunden [41].

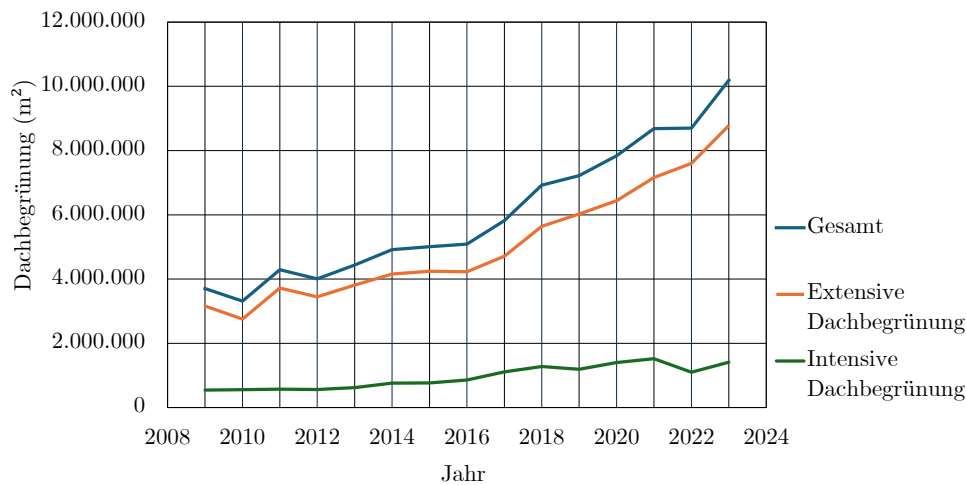


Abbildung 3.8: Entwicklung der jährlich begrünten Dachflächen von 2009 bis 2023 in Deutschland gemäß [54]

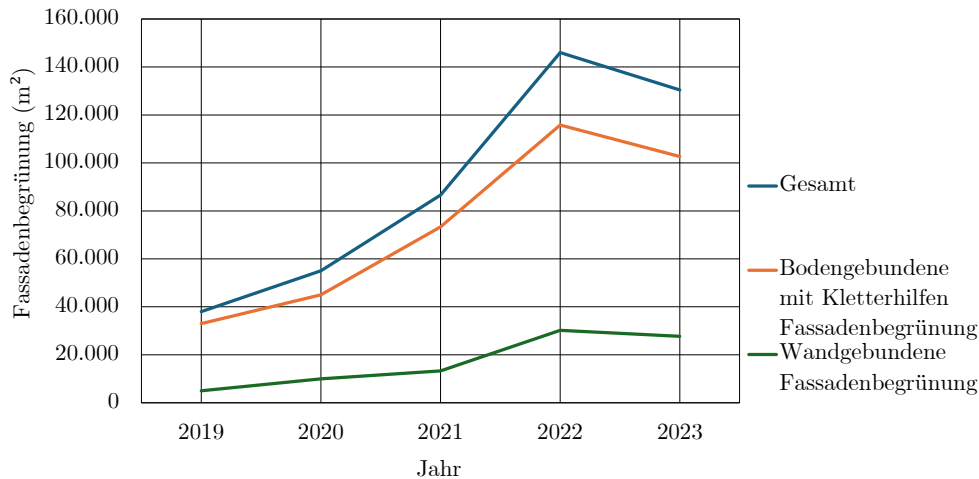


Abbildung 3.9: Entwicklung der jährlich begrünten Fassadenflächen von 2019 bis 2023 in Deutschland gemäß [54]

Schallabsorptionseigenschaften von begrünten Gebäudeflächen

Schallwellen, die auf Gebäudeoberflächen treffen, werden reflektiert. Der Reflexionsverlust ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, der Größe der Fläche, der Frequenz und dem Auftreffwinkel [55]. Pflanzen und Substratschichten auf begrünten Dächern und Fassaden können je nach Absorptionsgrad und Flächenanteil als poröse Oberflächen wirken und die Schallreflexion bis zu einem gewissen Grad reduzieren [29].

Im Bereich der Schallabsorptionseigenschaften von begrünten Gebäudeflächen liegen mehrere Forschungsarbeiten vor [56].

Eine davon ist die Arbeit von Connelly und Hodgson aus dem Jahr 2015, welche die Schallabsorptionseigenschaften von verschiedenen Dachbegrünungen untersucht. Im ersten Teil der Untersuchung werden die frequenzabhängigen Schallabsorptionseigenschaften der verschiedenen Substrate und ihrer Bestandteile gemessen. Dabei zeigt sich, dass die Schallabsorption mit steigendem Anteil an organischem Material zunimmt und mit zunehmendem Feuchtegehalt und Verdichtung abnimmt. Im Allgemeinen wird eine hohe Absorption bei hohen Frequenzen erwartet, wobei die Absorptionskoeffizienten zwischen 0,03 bei 250 Hz und 0,89 bei 2000 Hz liegen. Der mittlere Schallabsorptionskoeffizient der untersuchten Dachbegrünungen beträgt höchstens 0,71 und mindestens 0,20.

Im zweiten Teil wird die Schallabsorption von organischen Dachflächen mit und ohne Vegetation gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schallabsorption mit zunehmender Substrattiefe ohne Vegetation zunimmt und mit zunehmender Vegetation und Etablierung der Pflanzen abnimmt. Der mittlere Schallabsorptionskoeffizient von diesen begrünten Dachflächen mit unterschiedlichen Pflanzenarten in Substrattiefen von 50 bis 200 mm schwankt über einen Zeitraum von zwei Jahren von 0,20 bis 0,63. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Schallabsorption wesentlich von der Substrattiefe, der Etablierung der Pflanzenarten sowie dem Feuchtigkeitsgehalt des Substrates abhängt [57].

Weitere Arbeiten wie die von Wong et al. (2010) [58], Thomazelli et al. (2017) [59] sowie Chang et al. (2022) [60] untersuchen den frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad von Fassadenbegrünungen mit verschiedenen Pflanzsystemen bei unterschiedlichen Begrünungsdichten. Die Ergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass der Schallabsorptionsgrad mit steigender Frequenz sowie mit zunehmender Begrünungsdichte zunimmt. Die Abbildung 3.10 zeigt die Ergebnisse, die gemessenen frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade bei voller Begrünungsdichte für verschiedene Frequenzbereiche.

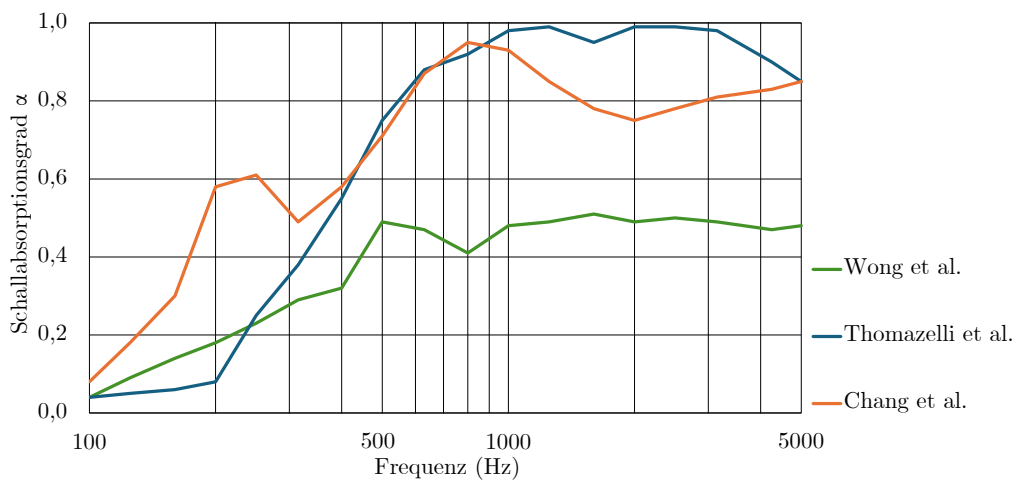


Abbildung 3.10: Vergleich des frequenzabhängigen Verlaufs der Schallabsorptionsgrade gemäß der genannten drei Arbeiten [58],[59],[60]

In Kapitel 4.5 wird unter Berücksichtigung der in den letzten Jahren in Deutschland gestiegenen Nachfrage nach begrünten Gebäudeflächen und deren Schallreflexionseigenschaften der begrünten Gebäudeflächen eine Prognose für das Jahr 2050 entwickelt.

Gebäudeflächen mit Photovoltaikanlagen

Ein langfristiges Ziel der Energiewende ist es, Strom nicht mehr aus fossilen Brennstoffen, sondern nahezu vollständig aus erneuerbaren Energien zu gewinnen. Eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen ist die Sonnenenergie, die mittels Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) in elektrische Energie umgewandelt wird⁸.

⁸Abgesehen von Photovoltaikanlagen existieren auch solarthermische Anlagen, die Sonnenenergie zur Wärmegewinnung nutzen. Da diese jedoch keine grundlegend anderen städtebaulichen schalltechnischen Eigen-

PV-Anlagen können sowohl auf Dächern als auch an Fassaden von Gebäuden installiert oder direkt in die Gebäudehülle integriert werden – eine Bauweise, die als bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) bezeichnet wird. BIPV-Elemente ersetzen herkömmliche Bauelemente und können beispielsweise als Dachziegel oder als Teil einer Glasfassade eingesetzt werden [61].

Die Entwicklung in Deutschland

In den letzten Jahren hat der Ausbau von PV-Anlagen in Deutschland deutlich zugenommen. In den Jahren 2010 bis 2012 war zunächst ein Zuwachs von etwa 7 bis 8 Gigawatt Peak (GWp) pro Jahr zu verzeichnen. In den Jahren 2013 bis 2015 kam es jedoch zu einem Rückgang, bevor dieser ab 2015 wieder anstieg. Im Jahr 2024 erreicht der jährliche Zuwachs 16 GWp, wodurch die gesamte installierte PV-Leistung in Deutschland auf 99 GWp ansteigt (vgl. Abbildung 3.11).

Insgesamt sind trotz des starken Ausbaus in den letzten Jahren bisher nur weniger als 10 % der potenziellen Dachflächen und weniger als 0,1 % der potenziellen Fassadenflächen mit PV-Anlagen ausgestattet [61].

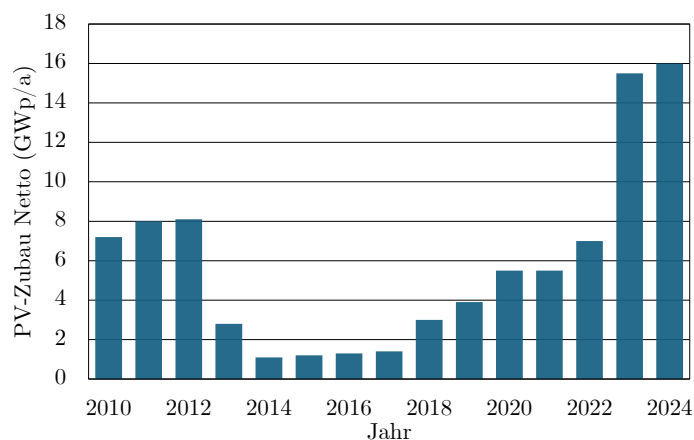


Abbildung 3.11: Entwicklung des netto PV-Zuwachses in Deutschland [61]

Dennoch ist weiterhin ein wesentlicher Treiber für den Ausbau der Photovoltaik in Deutschland das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das seit dem Jahr 2000 als zentrales Instrument zur Förderung regenerativer Stromquellen dient. Hauptziel ist die Transformation zu einer nachhaltigen, treibhausgasneutralen Stromversorgung, bei der bis zum Jahr 2030 mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Das EEG beinhaltet Einspeisevergütungen und Marktprämien für PV-Anlagen, vereinfacht Genehmigungsverfahren und fördert Mieterstrommodelle (vgl. §19 EEG 2023). Das Gesetz enthält Maßnahmen zur besseren Integration der erneuerbaren Energien in das Stromnetz [62]. Darüber hinaus wird der PV-Ausbau durch finanzielle Anreize unterstützt, indem die KfW-Bank zinsgünstige Kredite und Zuschüsse anbietet [63].

Ein weiterer wichtiger Treiber für den Ausbau der Photovoltaik sind die stetig sinkenden Modulpreise. Zwischen 2010 und 2020 sind die PV-Modulpreise um 90 % gesunken. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Module und die Optimierung der Herstellungskosten wird auch in den kommenden Jahren mit weiteren Preissenkungen gerechnet [61].

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) hat im Jahr 2024 mit der Zukunftsforschung „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ verschiedene Langfristszenarien für die Energie- und Klimawende entwickelt. Dabei werden mögliche Entwicklungspfade der zukünftigen Stromerzeugung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen bis zum Jahr 2045 untersucht [64].

Im Szenario T45-Strom* dieser Zukunftsforschung werden die im EEG festgelegten Ausbauziele als Mindestausbau in das Modell vorgegeben. Demnach steigt die installierte PV-Leistung bis zum

schaften als Photovoltaikanlagen aufweisen, werden sie in dieser Arbeit nicht gesondert betrachtet. Ebenso wird das Konzept begrünter Fassaden in Kombination mit Photovoltaik nicht weiter vertieft.

Jahr 2045 auf mindestens 400 Gigawatt (GW) an. Ein noch ambitionierteres Szenario stellt T45-PV+ dar, das von einem deutlich höheren PV-Ausbau ausgeht und eine installierte Leistung von 693 GW bis zum Jahr 2045 prognostiziert. Darüber hinaus betrachtet das Szenario T45-Dezentral zusätzlich einen verstärkten Ausbau von Batteriespeichern, um den durch Photovoltaikanlagen erzeugten Strom effizienter speichern und flexibler nutzen zu können [64].

In Kapitel 4.5 wird auf Grundlage des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und der Langfrist-szenarien des BMWK sowie der Schallreflexionseigenschaften von PV-Anlagen eine Prognose bis zum Jahr 2050 entwickelt.

3.3 Referenz- und Stabilitätsszenario

3.3.1 Verkehrsentwicklung

Personenverkehr im Referenzszenario

Im Referenzszenario führt die rückläufige Bevölkerungsentwicklung zu einer Reduzierung der Personenverkehrsleistung insgesamt (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Mobilitätsgewohnheiten sowie die Nachfrage nach verschiedenen Verkehrsmitteln verändern sich dabei nur geringfügig. Die Bereitschaft zu umweltbewusstem Verhalten im Verkehrsbereich zeigt sich als insgesamt gering.

Bei den jüngeren Altersgruppen lässt sich jedoch eine Tendenz zu einem veränderten Umweltbewusstsein erkennen. Diese Entwicklung lässt sich auch an der Gesamtzahl der Führerscheininhaber ablesen, die trotz einer leicht abnehmenden Tendenz bei den unter 24-Jährigen. Insgesamt erwartet man über alle Altersgruppen hinweg nur in sehr begrenztem Umfang einen bewussten Verzicht auf den Besitz eines eigenen Kraftfahrzeugs aus Umweltgründen.

Gleichzeitig steigen die Kraftstoffpreise, dies führt zu einem weiteren Anstieg der Mobilitätskosten und damit zu einem Rückgang der Nachfrage.

Der Ausbau der Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr und den Schienenverkehr sowie für den Fahrrad- und Fußgängerverkehr ist begrenzt. Auch die Angebote für Carsharing stagnieren auf einem niedrigen Niveau. All diese Entwicklungen führen nur zu einer minimalen Verlagerung innerhalb des Modal Split von der Straße auf die Schiene [25].

Ein weiterer Einflussfaktor auf den Personenverkehr sind veränderte Arbeitsgewohnheiten infolge der Corona-Pandemie. Die zunehmende Homeoffice-Nutzung spielt auch in Zukunft eine wichtige Rolle. Diese neue Arbeitsform, die durch die fortschreitende Globalisierung und technologische Entwicklungen weiter vorangetrieben wird, reduziert den Berufsverkehr (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Abschnitt 3.1.5) [39]:

Prognose der Verkehrsleistung im Straßenpersonenverkehr bis zum Jahr 2050

Während der Corona-Pandemie nahm die Homeoffice-Nutzung unter den Erwerbstätigen deutlich zu. Es wird davon ausgegangen, dass die Homeoffice-Nutzung nach der Pandemie nicht mehr so hoch sein wird wie während der Pandemie, aber immer noch höher als vor der Pandemie. Der Grund dafür ist, dass bereits vor der Pandemie die Arbeitgeber damit begonnen hatten, Homeoffice-Möglichkeiten anzubieten.

Vor diesem Hintergrund wird gemäß den Prognoseprämissen der Verkehrsprognose 2040⁹ langfristig von einer Reduzierung der Fahrten im Berufsverkehr um 3 bis 10 % ausgegangen, wobei ein Mittelwert von 6 % angenommen wird [39].

Da die in dieser Arbeit herangezogenen Zukunftsforschungen vor der Corona-Pandemie veröffentlicht wurden, fehlen in diesen Forschungen die Daten zur Homeoffice-Nutzung nach der Pandemie. Um auch diese Auswirkungen berücksichtigen zu können, wird zunächst der Anteil des Berufsverkehrs von der prognostizierten Personenverkehrsleistung vor der Pandemie gesondert berechnet und anschließend wird die reduzierte Berufsverkehrsleistung hinzuaddiert.

⁹Verkehrsprognose 2040 Teil 2: Wirtschafts- und Verkehrsentwicklungsprognose 2040 Prognoseprämissen (BMDV, 2022) [39]

Zunächst werden gemäß dem Bericht „Aktualisierung der Modelle TREMOD/ TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (UBA, 2020) [37]“ die jährlichen Anstiege der Straßenverkehrsleistung für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den Busverkehr vor der Corona-Pandemie ermittelt. Basierend darauf werden die Verkehrsleistungen für die Jahre 2020, 2030 und 2050 im Referenzszenario berechnet (siehe Tabelle 3.4).

in Mrd. Pkm	MIV	Bus	Summe
2020	944,9	80,4	1025,3
2030	988,9	82,8	1071,7
2050	962,3	84,0	1046,3
vgl. 2020–2050	+1,8 %	+4,5 %	+2,0 %

Tabelle 3.4: Prognose für die Straßenpersonenverkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) und Busverkehr im Referenzszenario vor der Pandemie nach [37]

Auf Basis aktueller Verkehrsdaten werden Mittelwerte für die Anteile des Berufsverkehrs an der Gesamtpersonenverkehrsleistung zwischen 2016 und 2020 ermittelt: ca. 18,8 % für den MIV und ca. 19,2 % für den Busverkehr (ÖSPV) [38]. Diese Anteile werden auf die Prognosedaten des Referenzszenarios (vor Corona-Pandemie, vgl. Tabelle 3.4) angewendet, um die Berufsverkehrsleistung für 2030 und 2050 zu berechnen. Danach wird eine Reduktion der Verkehrsleistung im Berufsverkehr von 6 % berücksichtigt (siehe Tabelle 3.5).

MIV in Mrd. Pkm	2030	2050
Verkehrsleistung	988,9	962,3
Ohne Berufsverkehr (81,2 %)	803,3	781,7
Berufsverkehr (ca. 18,8 %)	185,6	180,6
Pandemiebedingte Reduktion (-6 %)	174,4	169,7
Nach Corona-Pandemie	977,7	951,4
Bus (ÖSPV) in Mrd. Pkm	2030	2050
Verkehrsleistung	82,8	84,0
Ohne Berufsverkehr (80,8 %)	66,9	67,9
Berufsverkehr (ca. 19,2 %)	15,9	16,1
Pandemiebedingte Reduktion (-6 %)	14,9	15,1
Nach Corona-Pandemie	81,8	83,0
Gesamt Verkehrsleistung	1059,5	1034,4
vgl. 2020-2030 sowie 2030-2050	+3,3 %	-2,4 %

Tabelle 3.5: Prognose der Straßenverkehrsleistung des MIV und des Busverkehrs (ÖSPV) im Referenzszenario unter Berücksichtigung der Homeoffice-Nutzung nach der Corona-Pandemie [39]

Diese Entwicklungen führen im Referenzszenario bis zum Jahr 2030 zu einer leichten Zunahme des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) um 1,8 % und des motorisierten Individualverkehrs (MIV) um 3,5 % gegenüber dem Jahr 2020¹⁰. Von 2030 bis 2050 wird eine weitere leichte Zunahme

¹⁰Das Jahr 2020 wird als Ausgangsjahr gewählt, da dies die Vergleichbarkeit mit den anderen Prognosedaten

des ÖSPV um 1,4 % erwartet, während der MIV um 2,7 % abnimmt. Insgesamt ergibt sich bis 2030 ein leichter Anstieg der gesamten Personenverkehrsleistung um 3,3 % gegenüber 2020, gefolgt von einem Rückgang um 2,4 % bis 2050. Dies entspricht einem Gesamtanstieg von 0,9 % über 30 Jahre (vgl. Tabelle 3.5 und Abbildung 3.12).

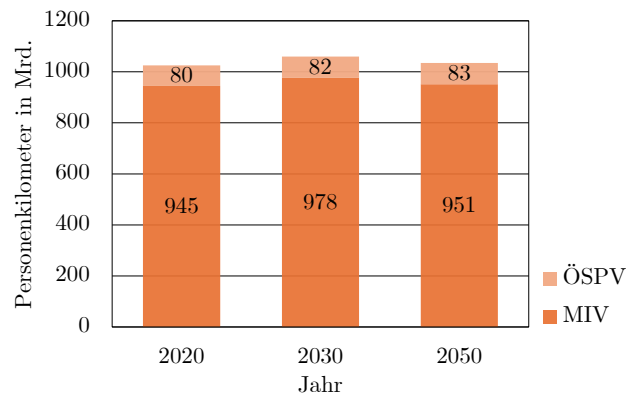


Abbildung 3.12: Entwicklung der Personenverkehrsleistung auf der Straße im Referenzszenario [25], [37], [38], [39]

Personenverkehr im Stabilitätsszenario

Im Stabilitätsszenario entwickelt die Bevölkerung durch gezielte politische Maßnahmen ein verstärktes Bewusstsein für umweltfreundliche Mobilität. Dies führt zu einer signifikanten Zunahme der Nutzung des Fahrrads sowie des öffentlichen Personennahverkehrs. Gleichzeitig wird umweltbewusst auf den Besitz eines eigenen Kraftfahrzeugs verzichtet.

Diese Verhaltensänderungen werden durch gezielte Verbesserungen der Infrastruktur unterstützt. Der zentrale Schwerpunkt liegt dabei auf der Reduktion des motorisierten Individualverkehrs, der ökologisch sinnvollen Verlagerung des Alltags- und Fernverkehrs auf die Schiene, der Verringerung des Verkehrs insgesamt sowie der effizienteren Gestaltung des verbleibenden Verkehrs.

Die Verbesserungen umfassen den Ausbau der Infrastruktur für den Fahrrad- und Fußverkehr, einschließlich neuer Abstellanlagen und Wegweisern. Des Weiteren erfolgt eine Optimierung des öffentlichen Verkehrs (ÖV), insbesondere durch eine bessere regionale Vernetzung, eine höhere Anzahl an Haltestellen, höhere Reisegeschwindigkeiten und eine erhöhte Frequenz der Fahrten. Gleichzeitig erfolgt eine Verbesserung der Infrastruktur für den Schienenpersonenverkehr. Im Weiteren ist eine Anpassung der Ticketpreise für die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel vorgesehen. Im Gegenzug erfolgt eine Erhöhung der Preise für die Nutzung motorisierter Individualverkehrsmittel (MIV). Damit wird der Anreiz zur Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel weiter erhöht.

Im Vergleich zum Referenzszenario zeigt das Stabilitätsszenario Veränderungen in der Personenverkehrsleistung im Alltags- und Fernverkehr. Im Alltagsverkehr nimmt der Fußverkehr um 18 %, der Radverkehr um 22 % und der ÖV um 38 % zu, während der MIV um 38 % abnimmt. Im Fernverkehr kommt es zu einer Verlagerung von 10 % vom MIV auf den ÖV bei gleichzeitiger Erhöhung der Auslastung des MIV um 10 % (vgl. Tabelle 3.6)¹¹ [25].

in %	Fußverkehr	Radverkehr	MIV	ÖV
Alltagsverkehr	+18 %	+22 %	-38 %	+38 %
Fernverkehr	-	-	-10 %	+10 %

Tabelle 3.6: Veränderung der Verkehrsleistung im Stabilitätsszenario gegenüber dem Referenzszenario im Alltags- und Fernverkehr gemäß [25]

erleichtert und eine vereinfachte Darstellung ermöglicht.

¹¹Der Alltagsverkehr umfasst Strecken unter 50 km, die üblicherweise im näheren Umfeld zurückgelegt werden, wie Arbeitswege, Einkäufe und Freizeitaktivitäten. Der Fernverkehr umfasst Strecken über 50 km wie Geschäftsreisen, private Tages- und Übernachtungsreisen sowie Kurzaufenthalte [25]. Die Betrachtung von Alltags- und Fernverkehr wird in Kapitel 4.1 für die Berechnung der Schallemissionen nach inner- und außerorts Fahrten angewendet.

Prognose der Verkehrsleistung im Straßenpersonenverkehr bis zum Jahr 2050

Wie auch im Referenzszenario wird auch hier die Homeoffice-Nutzung nach der Corona-Pandemie berücksichtigt. Um den Anstieg der Personenverkehrsleistung für das Stabilitätsszenario bis 2050 zu ermitteln, wird gemäß der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ unter Berücksichtigung der jährlichen Wachstumsrate auf Basis der Personenverkehrsleistung im Referenzszenario (vgl. Tabelle 3.5) prognostiziert¹². Die Prognoseergebnisse hierzu sind in Tabelle 3.7 dargestellt.

Jahr	Szenario	in Mrd. Pkm	vgl. 2020-2030 sowie 2030-2050
2020	Basisjahr	1025	
2030	Referenz	1060	+3,3 %
	Stabilität	944	-7,9 %
2050	Referenz	1034	+0,9 %
	Stabilität	805	-21,5 %

Tabelle 3.7: Prognose für die Personenverkehrsleistung im Referenz- und Stabilitätsszenario

Im Stabilitätsszenario führt dies insgesamt zu einer Reduktion der Personenverkehrsleistung im Straßenverkehr um 21,5 % bis 2050 im Vergleich zu 2020. Dies entspricht einer Reduktion von rund 11 % bis 2030 und rund 22 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzszenario (siehe Abbildung 3.13).

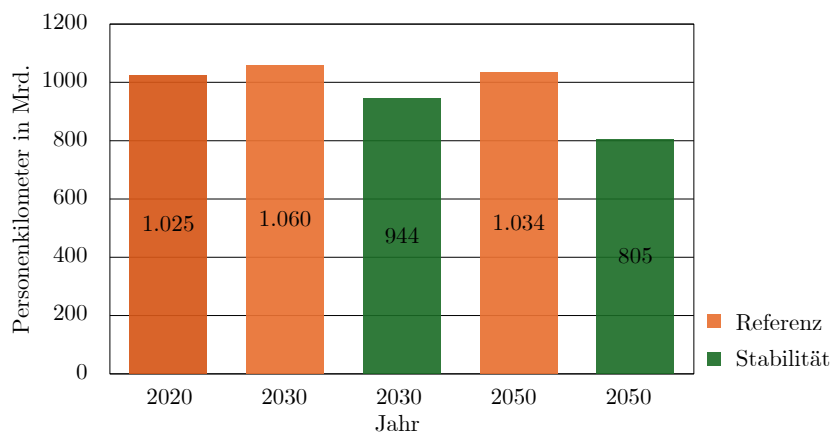


Abbildung 3.13: Entwicklung der Personenverkehrsleistung auf der Straße im Referenz- und im Stabilitätsszenario [25],[37],[38],[39]

Güterverkehr im Referenzszenario

Im Referenzszenario wird der Güterverkehr von der Globalisierung, der Urbanisierung und der wirtschaftlichen Entwicklung beeinflusst, wobei Maßnahmen zur Regulierung des Güterverkehrs bis 2050 nur in geringem Umfang umgesetzt werden.

Die fortschreitende Globalisierung führt zu einer kontinuierlichen Zunahme des Güterverkehrs, da internationale Handelsbeziehungen und Lieferketten eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist der steigende Bedarf an Rohstoffen, Vorprodukten und Konsumgütern, die teilweise über weite Strecken transportiert werden müssen.

¹²In der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ werden zwei Hauptszenarien erstellt: ein Referenzszenario und ein Klimaschutzszenario (vgl. Kapitel 2.3). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Zukunftsforschungen wird in dieser Arbeit die Prognosedaten aus dem Klimaschutzszenario für das Stabilitätsszenario verwendet.

Des Weiteren führt die zunehmende Urbanisierung zu einer Steigerung des Güterverkehrs in städtischen Gebieten. Die steigende Nachfrage nach regelmäßigen Lieferungen von Waren des täglichen Bedarfs sowie nach einer schnellen Lieferung bis an die Haustür treibt diese Entwicklung weiter voran. Zudem wird der Online-Handel aufgrund veränderter Einkaufsgewohnheiten, die durch die Corona-Pandemie bedingt sind, auch in Zukunft eine wichtige Bedeutung beibehalten. Trotz eines verlangsamten Wachstums durch geopolitische Unsicherheiten und wirtschaftliche Herausforderungen u.a. durch Kriegssituationen bleibt die Nachfrage nach schnellen Lieferungen im Kurier-, Express- und Paketverkehr (KEP-Verkehr) hoch [26]:

Prognose des Kurier-, Express- und Paketverkehrs bis zum Jahr 2050

Der Vergleich des aktuellen Bestandes an leichten Nutzfahrzeugen mit den prognostizierten Werten aus der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ aus dem Jahr 2016 zeigt eine erhebliche Abweichung [46],[25]. Für das Jahr 2050 wurde ein Bestand von 2,5 Mio. prognostiziert, während bereits heute (2024) ein Bestand von rund 3,0 Mio. erreicht ist. Dies ist vor allem auf die Zunahme der Online-Bestellungen seit der Corona-Pandemie zurückzuführen, die zu einer erhöhten Nachfrage nach Lieferfahrzeugen geführt hat (vgl. Kapitel 3.2.3).

Die oben genannte Forschung prognostiziert für den Paketdienstverkehr im Referenzszenario eine jährliche Zunahme der Verkehrsleistung um 1,16 % und eine Zunahme der mittleren Transportweite zunächst um 10 % zwischen 2010 und 2030 und um weitere 10 % bis 2050 (daraus ergibt sich eine Transportweite von ca. 198 km im Jahr 2050)¹³.

Nach Angaben der deutschen Paketbranche (2022) stieg das Sendungsvolumen im Kurier-, Express- und Paketdienst (KEP-Dienst) vor der Corona-Pandemie um 5,20 % pro Jahr, während der Pandemie um 11 %. Darüber hinaus prognostiziert die Paketbranche bis 2026 einen Anstieg des Sendungsvolumens um 5,34 % pro Jahr [39],[26].

Um diese Abweichung in der Verkehrsentwicklung im Güterverkehr zu berücksichtigen, wird in dieser Arbeit eine Prognose für den Paketdienstverkehr erstellt. Dazu werden lineare Regressionsanalysen durchgeführt und mit Hilfe der Regressionsfunktionen das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Diese Prognosedaten werden anschließend in die Gesamtprognose des Güterverkehrs integriert.

Zunächst werden die Werte aus den Jahren 2010 bis 2021 als Datenpunkte der Verkehrsleistung (in Mrd. tkm), der Anzahl der Sendungen (in Mio.) und des Verkehrsaufkommens (in Mio. t) zusammengestellt.

Danach werden zwei lineare Regressionsanalysen durchgeführt: in der ersten Analyse ist die Verkehrsleistung die abhängige und das Sendungsvolumen die unabhängige Variable; in der zweiten Analyse ist das Verkehrsaufkommen die abhängige Variable und das Sendungsvolumen die unabhängige Variable (vgl. Tabellen 3.8 bis 3.13).

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.1090	-1.8589	0.5377	2.3024	3.0836

Tabelle 3.8: Regressionsanalyse der Residuen des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

Variable	Koeffizienten	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert
(Konstante)	13.6131	3.9590	3.438	0.00635**
KEP-Sendungsvolumen	0.0136	0.0012	10.976	0.0000673***

Tabelle 3.9: Regressionskoeffizienten des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

¹³Gemäß [25] sowie [38] sind sonstige Produkte definiert als Post, Pakete, Geräte und Materialien für die Güterbeförderung, Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter, Sammelgut, unbekannte Güterarten

Kenngröße	Wert
Residuale Standardabweichung	2.595
Freiheitsgrad	(1,10)
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2	0.9157
Bestimmtheitsmaß R^2	0.9234
F-Statistik	120.5
p-Wert	0.0006726

Tabelle 3.10: Modellstatistiken des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsleistung und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

Min	1Q	Median	3Q	Max
-43.505	-17.972	7.443	19.289	31.262

Tabelle 3.11: Regressionsanalyse der Residuen des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

Variable	Koeffizienten	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert
Konstante	26.8077	40.1487	0.668	0.519
KEP-Sendungsvolumen	0.1149	0.0125	9.170	0.00000349***

Tabelle 3.12: Regressionskoeffizienten des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

Kenngröße	Wert
Residuale Standardabweichung	26.32
Freiheitsgrad	(1,10)
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2	0.8831
Bestimmtheitsmaß R^2	0.8937
F-Statistik	84.1
p-Wert	0.00000349

Tabelle 3.13: Modellstatistiken des Paketdienstverkehrs mit der abhängigen Variable Verkehrsaufkommen und der unabhängigen Variable Sendungsvolumen

Beide linearen Regressionsanalysen weisen mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von etwa 0,9 und einem Signifikanzniveau von kleiner als 0,001 einen starken Zusammenhang auf und das Gesamtmodell ist statistisch hoch signifikant (vgl. Tabelle 3.13 und 3.10)[65]. Daraus ergeben sich die folgenden Funktionsgleichungen der Regressionsgeraden als Grundlage für die Prognose:

$$Y = 0,01356 x + 13,6131 \quad (3.1)$$

mit Y | Verkehrsleistung in Mrd. tkm
 x | Sendungsvolumen in Mio.

$$Y = 0,1149 x - 26,8077 \quad (3.2)$$

mit Y | Verkehrsaufkommen in Mio. t.
 x | Sendungsvolumen in Mio.

Für die Prognose wird zunächst von einer jährlichen Steigerungsrate des Sendungsvolumens von 5,34 % zwischen 2020 und 2026 ausgegangen, sodass im Jahr 2026 mit rund 5.850 Mio. Sendungen gerechnet wird [26]¹⁴. Dieser Wert wird dann mit der Gleichung 3.1 in Verkehrsleistung und mit der Gleichung 3.2 in Verkehrsaufkommen für das Jahr 2026 umgerechnet (vgl. Tabelle 3.14).

Jahr (Nach der Corona-Pandemie)	Sendungsvolumen KEP-Dienste (+5,34 %) in Mio.	Verkehrsleistung in Mrd. tkm	Verkehrsaufkommen in Mio. t.
2020	4050		
2021	4510		
2022	4751		
2023	5005		
2024	5272		
2025	5553		
2026	5850	92,9	698,9

Tabelle 3.14: Prognose für die Verkehrsleistung und das Verkehrsaufkommen im Paketdienstverkehr im Referenzszenario bis 2026

Die Steigerungsrate ab dem Jahr 2026 wird gemäß „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ mit einem jährlichen Wachstum der Verkehrsleistung von ca. 1,16 % angenommen. Gleichzeitig wird das Verkehrsaufkommen mit einer jährlichen Reduktion von 0,14 % berücksichtigt¹⁵.

Somit zeigen die Ergebnisse im Vergleich zu der vor der Corona-Pandemie vorgelegten Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050¹⁶“ höhere Werte für die Verkehrsentwicklung im Paketdienst im Jahr 2050. Im Referenzszenario wird ein Verkehrsaufkommen von 674,8 Mio. t und eine Verkehrsleistung von 122,8 Mrd. tkm prognostiziert. Dies entspricht in etwa einer Verdoppelung des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung (siehe Tabelle 3.15).

Paketdienstverkehr vor Corona-Pandemie gemäß [25]	
Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	342,7
Verkehrsleistung in Mrd. tkm.	68,0
Paketdienstverkehr nach Corona-Pandemie	
Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	674,8
Verkehrsleistung in Mrd. tkm.	122,8

Tabelle 3.15: Vergleich der Prognosen für den Paketdienstverkehr vor und nach der Corona-Pandemie im Referenzszenario für das Jahr 2050 [25],[26]

¹⁴Die Wertschöpfung in der Paketbranche weist zwar ein hohes Wachstumspotenzial auf, bis 2050 könnte jedoch eine Marktsättigung eintreten. Daher wird die Trendfortschreibung gemäß der deutschen Paketbranche (2022) von 5,34 % bis 2026 bewusst nicht bis 2050 extrapoliert [26]. Dies würde zu einem exponentiellen Wachstum und einem Anstieg des Sendungsvolumens um ca. 400 % führen.

¹⁵Die Verkehrsleistung (in Tonnenkilometern) ergibt sich aus der Multiplikation des Verkehrsaufkommens (in Tonnen) mit der mittleren Transportweite (in Kilometer).

¹⁶Gemäß [25] S.170-S.171

Abschließend wird, wie in der Tabelle 3.16 dargestellt, der prognostizierte Paketdienstverkehr, welcher aufgrund der Corona-Pandemie auf ein höheres Sendungsvolumen angepasst ist, in den Gesamtgüterverkehr für das Jahr 2050 einbezogen. Dabei wird der Anteil des ursprünglichen Paketdienstverkehrs, basierend auf Prognosedaten vor der Pandemie, vom gesamten Verkehrsaufkommen und der gesamten Verkehrsleistung des Güterverkehrs getrennt berechnet. Daraufhin werden die Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Pandemie hinzuaddiert.

Straßengüterverkehr - Referenzszenario 2050	Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	Verkehrsleistung in Mrd. tkm.
Güterverkehr gemäß [25]	3598,2	413,8
ohne Paketdienstverkehr gemäß [25]	3255,5	345,8
mit Paketdienstverkehr (nach Corona-Pandemie)	3930,3	468,6
vgl. 2020-2050 (nach Corona-Pandemie)	26,5 %	63,6 %

Tabelle 3.16: Gesamtberechnung des Straßengüterverkehrs im Referenzszenario für das Jahr 2050 basierend auf den Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Tabelle 3.15

Das Referenzszenario zeigt insgesamt einen anhaltenden Anstieg des Güterverkehrs bis 2050 mit einer leichten Verschiebung innerhalb des Modal Splits, wobei der Anteil des Schienenverkehrs bis 2050 nur geringfügig zunimmt. Dementsprechend weist das Verkehrsaufkommen im Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2050 einen Anstieg um 26,5 % (ca. 0,8 % p.a.) auf und die Zunahme der Verkehrsleistung beläuft sich auf 63,6 % (ca. 1,7 % p.a.) im Vergleich zu 2020 (vgl. Tabelle 3.16 und Abbildung 3.14)¹⁷.

Güterverkehr im Stabilitätsszenario

Im Stabilitätsszenario bleibt die Entwicklung des zunehmenden Güterverkehrs bis zum Jahr 2050 bestehen, jedoch werden ambitionierte Maßnahmen umgesetzt. Diese Maßnahmen fokussieren sich auf die potenzielle Verlagerung von Transporten von der Straße auf die Schiene (Modal Shift) sowie auf die Optimierung des verbleibenden Straßengüterverkehrs.

Zu den Maßnahmen gehören [25]:

- **Marktzugang und Marktregulierung:** Maßnahmen und Regulierungen zum Straßengüterverkehr zielen auf eine Optimierung von Fahrten und eine Reduktion von Leerfahrten ab, wodurch eine effizientere Nutzung der Transportkapazitäten erreichen wird.
- **Ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik:** Die Erhöhung der Steuern auf fossile Treibstoffe sowie die Einführung eines Treibhausgas-Zuschlags führen zu einem Anstieg der Kraftstoffpreise, wodurch Anreize für eine schnellere Umstellung auf sparsamere und emissionsärmere Fahrzeugflotten geschaffen werden.
- **Ordnungspolitik:** Die Einführung von Umweltzonen sowie die Schaffung von Benutzervorteilen für alternative Antriebe zielen darauf ab, die Effizienz im Straßengüterverkehr zu steigern und die Verbreitung emissionsarmer Technologien zu fördern.
- **Finanzielle Förderungen und Subventionen:** Investitionszuschüsse für Umschlaganlagen sowie Subventionen für den kombinierten Verkehr zielen darauf ab, die Produktivität des Bahntransports zu erhöhen und dadurch einen Kostenvorteil gegenüber dem reinen Straßenverkehr zu generieren.
- **Infrastrukturpolitik:** Der Ausbau der Infrastruktur für den Schienengüterverkehr zielt darauf ab, die Kapazität und Attraktivität des Schienenverkehrs zu erhöhen. Dazu gehören die Elektrifizierung von Strecken sowie der Ausbau der Gleisanlagen für Hochgeschwindigkeitszüge.
- **Instrumente der Raum- und Verkehrsplanung:** Die Planung von Güterverkehrszentren, die Prüfung von Verkehrsauswirkungen sowie die Förderung regionaler Netzwerke zielen darauf

¹⁷Gemäß der Zukunftsforschung „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ im Referenzszenario steigt das Güterverkehrsaufkommen bis zum Jahr 2050 um ca. 15,82 % und die Verkehrsleistung um ca. 44,50 % gegenüber 2020 [25].

ab, die Verkehrsabläufe effizienter zu gestalten. Dazu gehört beispielsweise die Einführung von Taktverkehr, die Erhöhung der Geschwindigkeiten sowie des Transportvolumens durch u.a. Verlängerung der Züge.

- Informationspolitik und Bewusstseinsbildung: Energielabels für Nutzfahrzeuge und die Zertifizierung der Umweltauswirkungen von Transporten zielen darauf ab, das Image von Unternehmen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ihrer Produktions- und Logistikprozesse zu verbessern.

Prognose des Kurier-, Express- und Paketverkehrs bis zum Jahr 2050

Das Stabilitätsszenario wird auch durch die Zunahme von Online-Bestellungen und die Nachfrage nach schneller Lieferung durch Kurier-, Express- und Paketdienste nach der Corona-Pandemie beeinflusst, allerdings wird durch die oben genannten Maßnahmen die mittlere Transportweite und damit das Verkehrsaufkommen reduziert.

Dabei wird - wie im Referenzszenario - zunächst von einer jährlichen Steigerungsrate des Sendungsvolumens von 5,34 % zwischen 2020 und 2026 ausgegangen. Das Sendungsvolumen für das Jahr 2026 wird dann mit der Gleichung 3.1 in Verkehrsleistung und mit der Gleichung 3.2 in Verkehrsaufkommen für das Jahr 2026 umgerechnet (vgl. Tabelle 3.14).

Anschließend wird die Steigerungsrate ab dem Jahr 2026 gemäß „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ im Klimaschutzszenario mit einer durchschnittlichen Transportweite von 140 km und einer unveränderten Verkehrsleistung bis 2050 angenommen [25]. Daraus ergibt sich eine jährliche Reduktion des Verkehrsaufkommens von ca. 0,54 % bis 2050¹⁸.

Wie im Referenzszenario sind auch im Stabilitätsszenario ähnliche Entwicklungen zu beobachten, wenngleich die Werte etwas niedriger liegen. Auch hier zeigen die Ergebnisse im Vergleich zu den vor der Corona-Pandemie vorgelegten Prognosen höhere Werte¹⁹: ein Verkehrsaufkommen von ca. 613,3 Mio. t und eine Verkehrsleistung von ca. 92,9 Mrd. tkm (siehe Tabelle 3.17).

Paketdienstverkehr vor Corona-Pandemie gemäß [25]		
Szenario 2050	Referenz	Klimaschutz
Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	342,7	285,7
Verkehrsleistung in Mrd. tkm.	68,0	40,0
Paketdienstverkehr nach Corona-Pandemie		
Szenario 2050	Referenz	Stabilität
Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	674,8	613,3
Verkehrsleistung in Mrd. tkm.	122,8	92,9

Tabelle 3.17: Vergleich der Prognosen für den Paketdienstverkehr vor und nach der Corona-Pandemie im Referenz- und im Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 [25],[26]

Abschließend wird, wie in der Tabelle 3.18 dargestellt, der prognostizierte Paketdienstverkehr in den Gesamtgüterverkehr für das Jahr 2050 einbezogen. Dabei wird der Anteil des ursprünglichen Paketdienstverkehrs, basierend auf Prognosedaten vor der Pandemie, vom gesamten Verkehrsaufkommen und der gesamten Verkehrsleistung des Güterverkehrs getrennt berechnet. Daraufhin werden die Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Pandemie hinzuaddiert.

¹⁸Die Verkehrsleistung (in Tonnenkilometern) ergibt sich aus der Multiplikation des Verkehrsaufkommens (in Tonnen) mit der mittleren Transportweite (in Kilometer).

¹⁹Gemäß [25] S.170-S.171

Straßengüterverkehr - Stabilitätsszenario 2050	Verkehrsaufkommen in Mio. ton.	Verkehrsleistung in Mrd. tkm.
Güterverkehr gemäß (Klimaschutzszenario) [25]	3397,2	339,3
ohne Paketdienstverkehr gemäß [25]	3111,5	299,3
mit Paketdienstverkehr (nach Corona-Pandemie)	3724,8	392,0
vgl. 2020-2050 (nach der Pandemie)	19,9 %	37,0 %

Tabelle 3.18: Gesamtberechnung des Straßengüterverkehrs im Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 basierend auf den Prognosen des Paketdienstverkehrs nach der Tabelle 3.17

Insgesamt erreicht der Straßengüterverkehr im Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 um 19,9 % (ca. 0,6 % p.a.) erhöhtes Verkehrsaufkommen und eine Zunahme der Verkehrsleistung von 37,0 % (ca. 1,1 % p.a.) gegenüber 2020. Im Vergleich zum Referenzszenario kommt es bis zum Jahr 2050 zu einer Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene von 5,2 % des Verkehrsaufkommens und 16,3 % der Verkehrsleistung (vgl. Abbildung 3.14)²⁰.

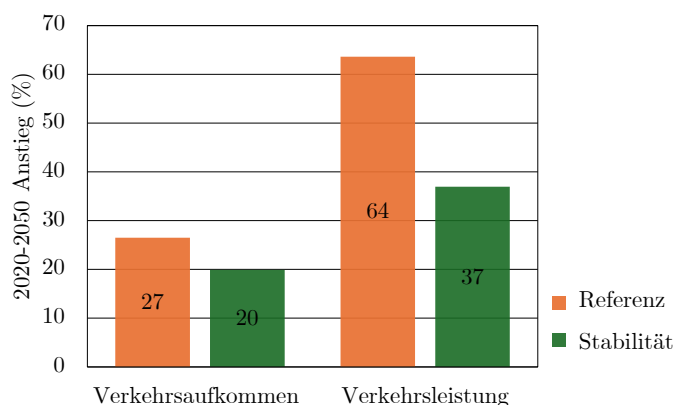


Abbildung 3.14: Anstieg des Güterverkehrs im Referenz- und im Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2020 in %

3.3.2 Flächeninanspruchnahme

Die durchschnittliche tägliche Flächeninanspruchnahme von Siedlungen und Verkehr in Deutschland lag in den Jahren 2007 bis 2010 bei 87 Hektar. Die Bundesregierung hat im Jahr 2002 im Rahmen der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie das Ziel formuliert, den täglichen Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2030 auf weniger als 30 Hektar pro Tag zu reduzieren. So wurde der Durchschnitt für die Jahre 2012 bis 2015 zunächst auf 66 Hektar und für die Jahre 2017 bis 2020 auf 54 Hektar gesenkt (vgl. Abbildung 3.15) [66].

Darüber hinaus beinhaltet das integrierte Umweltprogramm (2024) der Bundesregierung bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung auf 20 Hektar pro Tag sowie für das Jahr 2050 die vollständige Einstellung der zusätzlichen Flächeninanspruchnahme (Netto-Null-Ziel) [67].

Heute wird im gleitenden Vier-Jahres-Durchschnitt ein Tageswert von ca. 52 ha erreicht (Stand 2022) (siehe Abbildung 3.15). Daraus ergibt sich bei einer gesamten Bodenfläche von 35,8 Mio. ha ein Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche von 5,2 Mio. ha bzw. 14,5 %²¹. Hiervon entfallen 9,5 % (3,4 Mio. ha) auf die Siedlungsfläche und weitere 5,1 % (1,8 Mio. ha) auf die Verkehrsfläche. In kreisfreien Großstädten wird im Durchschnitt mehr als die Hälfte der Bodenfläche 50,9 % für Siedlung und Verkehr genutzt. Demgegenüber steht ein geringer Anteil von 10,4 % in ländlichen Kreisen mit geringer Bevölkerungsdichte (vgl. Tabelle 3.19) [68].

²⁰Gemäß der Zukunftsforschung [25] im Klimaschutzszenario steigt das Güterverkehrsaufkommen bis zum Jahr 2050 um ca. 9,35 % und die Verkehrsleistung um ca. 18,47 % gegenüber 2020.

²¹einschließlich Bergbaubetrieb, Tagebau, Grube und Steinbruch

Referenzszenario

Im Referenzszenario führt der Bevölkerungsrückgang zu einem Rückgang der täglichen Flächeninanspruchnahme. Der gleitende Vier-Jahres-Durchschnitt im Jahr 2030 erreicht einen Wert von 44 Hektar und im Jahr 2050 einen Wert von 37 Hektar. Die tägliche Inanspruchnahme der Siedlungsfläche sinkt von 48 Hektar im Jahr 2030 auf 34 Hektar und nähert sich mit knapp 31 Hektar im Jahr 2050 weiter an. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Verkehrsfläche bis 2050 ab (vgl. Abbildung 3.15). Die Werte zeigen, dass im Referenzszenario das Ziel der Reduktion der Flächeninanspruchnahme sowohl im Jahr 2030 als auch im Jahr 2050 verfehlt wird.

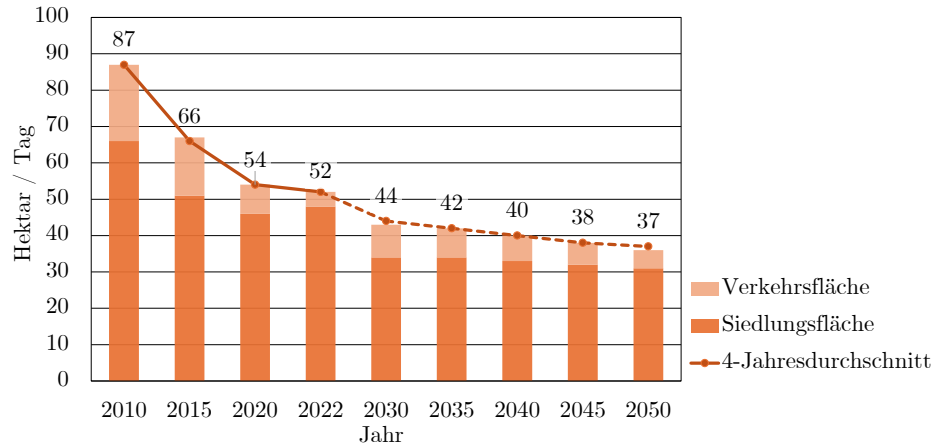


Abbildung 3.15: Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche (gleitender Vier-Jahres-Durchschnitt), historisch und gemäß Referenzszenario nach [66],[24]

Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Bodenfläche erhöht sich damit bis zum Jahr 2050 von 14,5 % auf 15,8 %²². In den kreisfreien Großstädten steigt dieser Anteil von 50,9 % auf 54,6 %. Im Vergleich zu den anderen Siedlungsstrukturen wachsen die kreisfreien Großstädte aufgrund der Urbanisierung mit 3,7 Prozentpunkten am stärksten, die dünn besiedelten ländlichen Kreise mit 0,8 Prozentpunkten am schwächsten (vgl. Tabelle 3.19).

Stabilitätsszenario

Im Stabilitätsszenario wird das Ziel der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme bis 2050 erreicht. Um dieses Ziel erreichen zu können, ist eine Kombination verschiedener Maßnahmen notwendig. Ein wichtiger Ansatz ist die Förderung der Innenentwicklung, die auf die Nutzung innerstädtischer Brachflächen und Nachverdichtung abzielt. Dadurch wird der Bedarf an neuen Baugebieten am Stadtrand reduziert.

Gleichzeitig sind durch fiskalische und ökonomische Maßnahmen wie die Neubesiedelungsabgabe und handelbare Flächenausweisungsrechte Anreize für einen sparsamen Flächenverbrauch gesetzt. Diese Maßnahmen verteuern einerseits die Neuinanspruchnahme von Flächen und verringern damit die Anreize für Bauvorhaben, andererseits schaffen sie durch die flächendeckende Besteuerung von ungenutzten oder ineffizient genutzten Grundstücken einen Anreiz, vorhandene Flächen besser zu nutzen [69].

Somit sinkt im Stabilitätsszenario die tägliche Flächeninanspruchnahme im gleitenden Vier-Jahres-Durchschnitt bis zum Jahr 2030 auf 23 Hektar und bis zum Jahr 2050 auf 3 Hektar. Damit wird das Ziel „unter 30 Hektar/Tag“ der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie im Jahr 2030 erreicht, während der etwas ambitionierte Reduktionspfad von 20 Hektar des integrierten Umweltschutzplans 2030 knapp verfehlt (vgl. Abbildung 3.16).

²²Die Zukunftsforschung „Sozioökonomische Szenarien als Grundlage von Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland“ prognostiziert die siedlungsstrukturellen Kreistypen von 2015 bis 2045 [24]. In der vorliegenden Arbeit werden die Prognosewerte dieser Forschung entsprechend der jährlichen Zunahme bis zum Jahr 2050 extrapoliert.

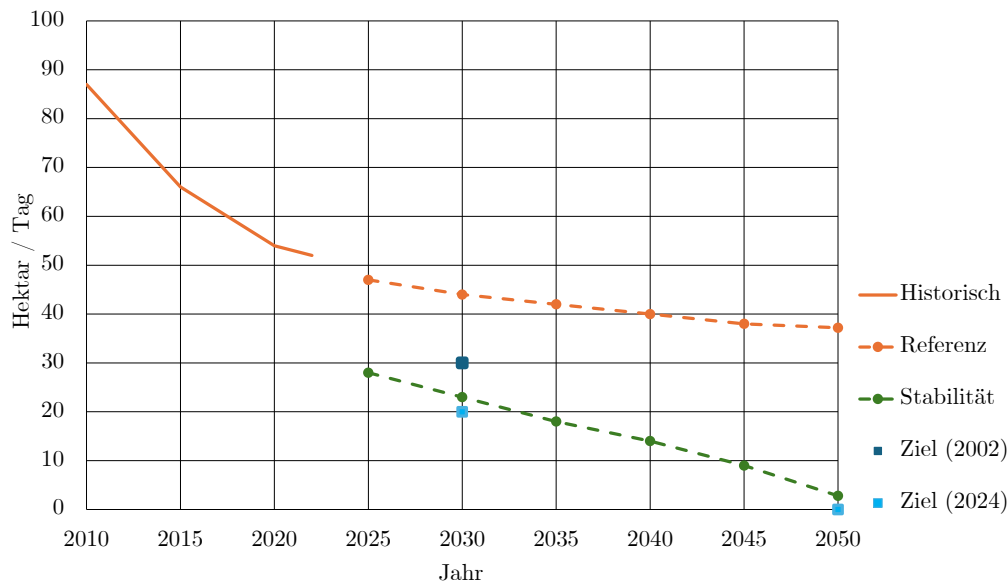


Abbildung 3.16: Entwicklung der Flächeninanspruchnahme im Referenz- und Stabilitätsszenario, gleitender Vier-Jahres-Durchschnitt und Zielwerte nach [24],[66],[67]

Die Flächeninanspruchnahme nimmt gegenüber dem Referenzszenario in allen Kreistypen in ähnlichem Umfang ab. Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der gesamten Bodenfläche steigt bis 2050 auf 15,2 %. Im Vergleich zum Referenzszenario ist der Anteil damit um durchschnittlich 0,6 Prozentpunkte geringer. In den kreisfreien Großstädten steigt der Anteil auf 52,8 %. Hier zeigt sich mit 1,8 Prozentpunkten die größte Differenz zwischen den beiden Szenarien. In den dünn besiedelten ländlichen Kreisen steigt der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche gegenüber 2020 nur geringfügig um 0,4 Prozentpunkte auf 10,8 % (vgl. Tabelle 3.19).

SuV-Flächen an der Bodenfläche in %	Basisjahr	Referenz		Stabilität		vgl. Referenz-Stabilität 2050 in %-Punkten
	2020	2030	2050	2030	2050	
Kreisfreie Großstädte	50,9	52,6	54,6	51,6	52,8	-1,8
Städtische Kreise	17,8	18,5	19,9	18,2	19,0	-0,9
Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen	12,9	13,4	14,1	13,1	13,6	-0,5
Dünn besiedelte ländliche Kreise	10,4	10,7	11,2	10,5	10,8	-0,4
Bundesgebiet gesamt	14,5	15,0	15,8	14,7	15,2	-0,7

Tabelle 3.19: Entwicklung des Anteils der SuV-Flächen an der Bodenfläche in den siedlungsstrukturellen Kreistypen bis 2050 in den Szenarien und Vergleich Referenzszenario mit Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 in Prozentpunkten gemäß [24]

Kapitel 4

Quantifizierung der Szenarien

4.1 Prognose der Verkehrsstärke

4.1.1 Vorgehensweise

Auf der Grundlage erhobener Daten zur Verkehrsentwicklung der vergangenen Jahre im Personen- und Güterverkehr wird die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Dabei wird die statistische Methode „Regressionsanalyse“ verwendet, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen zu untersuchen und Prognosen zu erstellen. Mit Hilfe von linearen Regressionsanalysen werden die Zusammenhänge zwischen Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Verkehrsstärke untersucht. Anschließend werden die Prognosedaten zur zukünftigen Verkehrsentwicklung aus dem Kapitel 3.3 mit den entsprechenden Regressionsgleichungen als Prognosegrößen in die Berechnungen einbezogen und ermöglichen eine Abschätzung der Zunahme der DTV bis zum Jahr 2050 für das Referenz- und das Stabilitätsszenario. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der Verkehrsstärken nach Fahrzeuggruppen, Tages- und Nachtzeiten sowie Straßentypen gegliedert und detailliert analysiert.

4.1.2 Regressionsanalyse des Personenverkehrs

Im Folgenden wird eine lineare Regressionsanalyse für den Personenverkehr im Zeitraum 2010 bis 2021 dargestellt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der DTV der Pkw auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen (in Kfz/24h) und der Verkehrsleistung (in Personenkilometern in Mrd.) analysiert [38]. Die DTV stellt die abhängige Variable dar, während die Verkehrsleistung die unabhängige Variable darstellt¹.

Das Gesamtmodell ist statistisch signifikant, wie die F-Statistik mit $F(1, 7) = 16.37; p < 0.01$ in Tabelle 4.3 zeigt. Zudem weist das Bestimmtheitsmaß R^2 von 0.7005 auf einen nachweisbaren Zusammenhang zwischen der DTV und der Verkehrsleistung hin. Der maximale vertikale Abstand zwischen den Beobachtungspunkten (Residuen) und der geschätzten Regressionsgerade beträgt 2331.8 Kfz/24h bei einer DTV von 39400 Kfz/24h (siehe Tabelle 4.1). Dies zeigt, dass die Abweichungen gering sind, sodass weder eine Verdopplung noch eine Halbierung der emittierten Schallenergie festzustellen ist.

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2331.8	-868.6	-757.3	1933.8	2216.6

Tabelle 4.1: Regressionsanalyse der Residuen des Personenverkehrs mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung

¹Die DTV-Zählungen für die Jahre 2011 bis 2013 sind unvollständig, daher werden drei Datenpunkte nicht in die Analyse einbezogen.

Variable	Koeffizienten	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert
(Konstante)	2547.33	9671.96	0.263	0.79985
Verkehrsleistung	43.44	10.74	4.047	0.00489**

Tabelle 4.2: Regressionskoeffizienten des Personenverkehrs mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung

Kenngroße	Wert
Residuale Standardabweichung	1783
Freiheitsgrad	(1,7)
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2	0.6577
Bestimmtheitsmaß R^2	0.7005
F-Statistik	16.37
p-Wert	0.004892

Tabelle 4.3: Modellstatistiken des Personenverkehrs der Jahre 2010 bis 2021 mit der unabhängigen Variablen Verkehrsleistung

Die Funktionsgleichung der Regressionsgeraden lautet (vgl. Tabelle 4.2):

$$Y = 43,44 x + 2547,33 \quad (4.1)$$

$$\text{mit } \begin{array}{l} Y \mid \text{DTV in Kfz/24h} \\ x \mid \text{Verkehrsleistung in Mrd. Pkm} \end{array}$$

Mit der Gleichung 4.1 wird für die Fahrzeugkategorien Personenkraftwagen, Personenkraftwagen mit Anhänger (Pkw) und Krafträder (Lkw-2) gemäß RLS-19 [16] die Zunahme der DTV bis zum Jahr 2050 im Referenz- und im Stabilitätsszenario prognostiziert². Grundlage hierfür ist die im Kapitel 3.3.1 beschriebene Prognose der Verkehrsleistung im Personenverkehr (vgl. Tabelle 3.5).

Im Referenzszenario nimmt die DTV bis 2030 gegenüber 2020 zunächst um 3,27 % zu und von 2030 bis 2050 um 2,54 % ab. Insgesamt wird für 2050 ein Anstieg der DTV um 0,65 % gegenüber 2020 prognostiziert (siehe Tabelle 4.4).

Jahr	Verkehrsleistung in Mrd. Pkm	DTV in Kfz/24h	vgl. 2020-2030 sowie 2030-2050
2020	945	43593	
2030	978	45021	+3,27 %
2050	951	43878	-2,54 %
vgl. 2020-2050			+0,65 %

Tabelle 4.4: Zunahme der DTV des Personenverkehrs für die Jahre 2030 bis 2050 gegenüber 2020 im Referenzszenario, berechnet nach Gleichung 4.1

²Die DTV-Werte für Personenkraftwagen umfassen gemäß Verkehrszählungen „Verkehr in Zahlen 2022-2023“ auch Motorräder, Personenkraftwagen mit und ohne Anhänger, Lieferwagen und nicht klassifizierbare Kraftfahrzeuge.

Im Stabilitätsszenario wird die Verkehrsleistung in Alltags- und Fernverkehr unterteilt und auf Basis des Referenzszenarios für das Jahr 2050 prognostiziert (vgl. Tabelle 3.6). Dabei wird der Alltagsverkehr als innerorts und der Fernverkehr als außerorts angenommen.

Im Stabilitätsszenario reduziert sich die DTV im Jahr 2050 gegenüber 2020 innerorts um 35,38 % und außerorts um 8,84 %. Gegenüber dem Referenzszenario verringert sich die DTV im Jahr 2050 innerorts um 35,79 % und außerorts um 9,43 % (siehe Tabelle 4.5).

Verkehrsleistung in Mrd. Pkm			DTV in Kfz/24h	
Jahr	innerorts (-38%)	außerorts (-10%)	innerorts	außerorts
2050	590	856	28161	39742
vgl. 2020-2050			-35,38 %	-8,84 %
vgl. Referenz - Stabilität 2050			-35,79 %	-9,43 %

Tabelle 4.5: Zunahme der DTV des Personenverkehrs bis zum Jahr 2050 gegenüber 2020 im Stabilitätsszenario, berechnet nach Gleichung 4.1

4.1.3 Regressionsanalyse des Güterverkehrs

Im Folgenden wird eine lineare Regressionsanalyse für den Güterverkehr im Zeitraum von 2014 bis 2021 dargestellt. Dabei werden die DTV auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen für Lastkraftfahrzeuge (Kfz/24h) als abhängige Variable und das Verkehrsaufkommen (in Mio. t) und die Verkehrsleistung (in Mrd. tkm) als unabhängige Variablen analysiert³.

Die multiple Regressionsanalyse in den Tabellen 4.6, 4.7 und 4.8 zeigt, dass es einige Ausnahmefälle gibt und keine linearen Zusammenhänge gegeben sind. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,3506 zeigt einen nur schwachen Zusammenhang zwischen DTV und Verkehrsleistung sowie Verkehrsaufkommen. Die F-Statistik mit $F(2, 5) = 2,89; p > 0,1$ in Tabelle 4.8 zeigt, dass das Gesamtmodell statistisch nicht signifikant ist.

Der Grund für diese nichtlineare Regression liegt vor allem in den unregelmäßig erhobenen Datenpunkten der Jahre 2020 und 2021, in denen die Corona-Pandemie auftrat. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Modellspezifikationen geändert, sodass diese Jahre aus der multiplen Regressionsanalyse ausgeschlossen werden⁴.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
-321.83	41.32	-101.93	-76.19	-11.61	-112.56	-3.57	586.37

Tabelle 4.6: Regressionsanalyse der Residuen des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit den Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021

³Die Verkehrszählungen umfassen Busse sowie Lastkraftwagen mit und ohne Anhänger, einschließlich Sattelzüge mit einem zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 t gemäß „Verkehr in Zahlen 2022-2023 [38]“. Dabei ist zu beachten, dass Busse in dieser Verkehrszählung zu den Lastkraftwagen gezählt werden, während sie in den Zukunftsforschungen dem Personenverkehr zugeordnet werden; dieser Aspekt wird am Ende dieses Abschnitts berücksichtigt.

⁴Der Einfluss der Corona-Pandemie auf den Güterverkehr zeigt sich vor allem im Bereich des KEP-Verkehrs, für den in dieser Arbeit eine Prognose des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung berechnet wird (siehe dazu Kapitel 3.3.1).

Variable	Koeffizienten	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert
(Konstante)	-2345.904	10334.671	-0.227	0.8294
Verkehrsaufkommen	4.924	2.316	2.126*	0.0868
Verkehrsleistung	-17.886	44.790	-0.399	0.7061

Tabelle 4.7: Regressionskoeffizienten des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021

Kenngröße	Wert
Residuale Standardabweichung	309.2
Freiheitsgrad	(2,5)
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2	0.3506
Bestimmtheitsmaß R^2	0.5361
F-Statistik	2.89
p-Wert	0.1465

Tabelle 4.8: Modellstatistiken des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2021

Die multiple Regressionsanalyse im Zeitraum von 2014 bis 2019 zeigt, dass der Koeffizient in Tabelle 4.10 des Verkehrsaufkommens ($p < 0,05$) einen signifikanten Einfluss auf die DTV hat, während die Verkehrsleistung ($p > 0,1$) nicht als signifikant betrachtet wird. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9516 zeigt einen sehr starken Zusammenhang zwischen DTV und Verkehrsleistung sowie Verkehrsaufkommen. Die F-Statistik $F(2, 3) = 50,16; p < 0,05$ in Tabelle 4.11 zeigt, dass das Gesamtmodell statistisch signifikant ist. Darüber hinaus beträgt der maximale vertikale Abstand zwischen Beobachtungspunkten (Residuen) und der geschätzten Regressionsgerade 78,63 Kfz/24h bei einer DTV von 7400 Kfz/24h (siehe Tabelle 4.9). Dies zeigt, dass die Abweichungen gering sind, sodass weder eine Verdopplung noch eine Halbierung der emittierten Schallenergie festzustellen ist.

2014	2015	2016	2017	2018	2019
-49.58	78.63	-77.50	37.39	-35.33	46.38

Tabelle 4.9: Regressionsanalyse der Residuen des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit den Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019

Variable	Koeffizienten	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert
(Konstante)	-12230	3340	-3.660	0.03524*
Verkehrsaufkommen	3.979	0.6589	6.043	0.00909**
Verkehrsleistung	25.89	15.08	1.717	0.18453

Tabelle 4.10: Regressionskoeffizienten des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019

Kenngröße	Wert
Residuale Standardabweichung	80.51
Freiheitsgrad	(2,3)
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2	0.9516
Bestimmtheitsmaß R^2	0.971
F-Statistik	50.16
p-Wert	0.004947

Tabelle 4.11: Modellstatistiken des Güterverkehrs mit den unabhängigen Variablen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Datenpunkten der Jahre 2014 bis 2019

Anhand dieser Regressionsanalyse wird die Funktionsgleichung 4.2 aufgestellt (vgl. Tabelle 4.10):

$$Y = 3,979 x_1 + 25,89 x_2 - 12230 \quad (4.2)$$

mit	Y	DTV in Kfz/24h
	x_1	Verkehrsaufkommen in Mio. t.
	x_2	Verkehrsleistung in Mrd. tkm.

Mit der Gleichung 4.2 wird der Anstieg der DTV für das Jahr 2050 im Referenz- und im Stabilitätsszenario abgeschätzt, wobei auf die in Kapitel 3.3.1 dargestellten Prognosen der Verkehrsleistung und des Verkehrsaufkommens zurückgegriffen wird (vgl. Tabellen 3.16 und 3.18). Die Anstiege werden gemäß RLS-19 auf die Fahrzeugkategorien des Güterverkehrs bezogen: Güterkraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t (Pkw), Lastkraftwagen ohne Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t (Lkw-1), Lastkraftwagen mit Anhänger bzw. Sattelkraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t (Lkw-2)⁵.

Im Referenzszenario nimmt die DTV des Güterverkehrs bis 2050 gegenüber 2020 um 86,6 % zu, bei einer jährlichen Zunahme von ca. 2,1 %. Im Stabilitätsszenario beträgt der Anstieg 53,0 % bei einer jährlichen Zunahme von ca. 1,4 % (siehe Tabelle 4.12).

Jahr	Szenario	Verkehrsleistung in Mrd. tkm	Verkehrsaufkommen in Mio. t	DTV in Kfz/24	vgl. 2020-2050
2020	Basisjahr	286	3107	8330	
2050	Referenz	469	3930	15542	+86,6 %
2050	Stabilität	392	3725	12745	+53,0 %

Tabelle 4.12: Anstieg der DTV des Güterverkehrs für das Referenz- und Stabilitätsszenario im Jahr 2050 gegenüber 2020, berechnet nach Gleichung 4.2

Anstieg der DTV für Busse bis zum Jahr 2050

In Verkehrszählungen werden Busse zu den Lastkraftwagen (Lkw) gezählt [38], während sie in Zukunftsforschungen dem Personenverkehr zugeordnet werden [25]. Aufgrund dieser methodischen Unterschiede werden für die Berechnungen Annahmen getroffen.

Zunächst wird die mittlere Transportweite der Jahre 2010 bis 2019 gemittelt, wobei ein Mittelwert von 8,4 km pro Jahr ermittelt wird⁶.

⁵sowie Busse (Lkw-1), siehe nächster Abschnitt „Anstieg der DTV für Busse bis zum Jahr 2050“

⁶Die Jahre 2020 und 2021 werden wegen des nichtlinearen Zusammenhangs im Transportverhalten aufgrund der Corona-Pandemie nicht berücksichtigt (mittlere Transportweite 6,7 km).

Unter der Annahme einer konstanten mittleren Transportweite wird auf Basis der prognostizierten Verkehrsleistung der Busse im Referenzszenario (siehe Abbildung 3.12) das Verkehrsaufkommen für die Jahre 2030 und 2050 berechnet. Das Verkehrsaufkommen ergibt sich dabei aus der Division der Verkehrsleistung durch die mittlere Transportweite (siehe Tabelle 4.13).

Jahr	Verkehrsleistung in Mrd. Pkm	Verkehrsaufkommen in Mio. Pers.	mittlere Transportweite in km
2020	80	9604	8,4
2030	82	9775	8,4
2050	83	9916	8,4

Tabelle 4.13: Prognostizierte Verkehrsleistung und Verkehrsaufkommen für Busse im Referenzszenario [25], [37], [38], [39]

Mit Hilfe der Gleichung 4.2 wird anschließend die DTV hochgerechnet, wobei die Gleichung 4.2 für den gesamten Güterverkehr gilt. Die berechneten Werte stellen keine realen Messdaten dar, sondern erlauben eine Abschätzung der Entwicklung bis zum Jahr 2050.

Der Anstieg der DTV für das Stabilitätsszenario wird jeweils innerorts und außerorts gemäß Tabelle 3.6 berechnet (vgl. Kapitel 3.3), bezogen auf die Verkehrsleistung im Jahr 2050 des Referenzszenarios (siehe Tabelle 4.13).

Im Referenzszenario wird für das Jahr 2050 ein Anstieg der DTV um 4,7 % gegenüber 2020 prognostiziert, was einer jährlichen Zunahme von ca. 0,2 % entspricht. Im Stabilitätsszenario wird ein Anstieg der DTV innerorts um 61,0 % (jährliche Zunahme ca. 2,0 %) und außerorts um 19,5% (jährliche Zunahme ca. 1,0 %) prognostiziert (siehe Tabelle 4.14).

DTV in Kfz/24h	vgl. 2020-2050 (jährlicher Anstieg)	
Referenzszenario	+4,7 % (0,2 %)	
Stabilitätsszenario	innerorts	+61,0 % (2,0 %)
	außerorts	+19,5 % (1,0 %)

Tabelle 4.14: Zunahme der DTV für Busse im Referenz- und Stabilitätsszenario bis 2050 im Vergleich zu 2020

4.1.4 Anstieg der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19)

Nach RLS-19 wird der längenbezogene Schalleistungspegel (L'_w) für eine bestimmte Quelllinie durch die stündliche Verkehrsstärke (M in Kfz/h) und die Schalleistungspegel (L_w) der einzelnen Fahrzeuge, unterteilt nach den Fahrzeuggruppen Pkw, Lkw-1 und Lkw-2 berechnet (siehe Kapitel 2.1) [16].

Da sich diese Arbeit nicht auf ein bestimmtes Untersuchungsgebiet beschränkt, werden die standardisierten Werte als Grundlage für die stündliche Verkehrsstärke herangezogen (vgl. Tabelle 2.3). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Fahrleistungen langfristig ändern können. Aus diesem Grund werden zunächst die Fahrleistungsanteile nach Fahrzeuggruppen für das Jahr 2050 nach Kapitel 3.2.4 klassifiziert. Die Fahrleistungsanteile der Fahrzeuggruppen aus der folgenden Tabelle 4.15 werden jeweils für die Straßenarten Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen, Bundesstraßen, Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen sowie Gemeindestraßen gemäß RLS-19 angenommen.

RLS-19 Fahrzeuggruppe	Pkw		Lkw-1	Lkw-2	Lkw-1/2
dazu gehört	Pkw	Lkw < 3,5t	Bus	Krafträder	Lkw > 3,5t
Fahrleistungsanteil	93,5 %	6,5 %	4,7 %	20,3 %	75,0 %

Tabelle 4.15: Fahrleistungsanteil 2050 nach RLS-19 klassifiziert

Aufbauend auf den in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 ermittelten Zunahmen der Verkehrsstärken im Personen- und Güterverkehr sowie der Fahrleistungsanteile für das Jahr 2050 werden die Zunahmen der einzelnen Fahrzeuggruppen nach Tages- und Nachtzeitraum sowie Straßenart sowohl für das Referenzszenario als auch für das Stabilitätsszenario berechnet.

Im Referenzszenario steigt die DTV auf Bundes-, Landes- und Gemeindeverbindungsstraßen im Jahr 2050 gegenüber 2020 um 11,10 %. Tagsüber nimmt der Lkw-1-Anteil um 76 % und der Lkw-2-Anteil um 59 % zu (vgl. Tabelle 4.16). Nachts nimmt der Lkw-1-Anteil um 78 % und der Lkw-2-Anteil um 55 % zu (vgl. Tabelle 4.17). Der Pkw-Anteil nimmt tagsüber und nachts um 6 % zu. Angaben zum Basisjahr siehe Anhang B, Tabellen B.1 und B.2.

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				6,42	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		2,82	3,62		
Bus	+4,7 %		0,23			
Personenverkehr	+0,65 %			0,94	49,78	
Verkehrsstärke		63,81	3,05	4,56	56,20	
vgl. 2020-2050		+11 %	+76 %	+59 %	+6 %	+11,10 %

Tabelle 4.16: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				1,08	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		0,84	0,70		
Bus	+4,7 %		0,05			
Personenverkehr	+0,65 %			0,23	8,38	
Verkehrsstärke		11,28	0,89	0,93	9,46	
vgl. 2020-2050		+13 %	+78 %	+55 %	+6 %	+11,10 %

Tabelle 4.17: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Das Stabilitätsszenario wird zusätzlich nach innerorts und außerorts unterteilt. Gemeindestra-

ßen werden ausschließlich innerorts, Autobahnen ausschließlich außerorts berücksichtigt. Landes-, Kreis-, Gemeindeverbindungsstraßen sowie Bundesstraßen können sowohl innerorts als auch außerorts verlaufen und werden entsprechend differenziert.

Auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts sinkt die DTV im Jahr 2050 um 1,19 %, während tagsüber der Lkw-1-Anteil um 49 % und der Lkw-2-Anteil um 33 % und nachts der Lkw-1-Anteil um 50 % und der Lkw-2-Anteil um 30 % zunimmt. Der Pkw-Anteil nimmt sowohl tagsüber als auch nachts um 5 % ab (vgl. Tabelle 4.18 und 4.19). Angaben zum Basisjahr siehe Anhang B, Tabellen B.1 und B.2.

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,26	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		2,31	2,97		
Bus	+19,5 %		0,26			
Personenverkehr	-8,84 %			0,85	45,11	
Verkehrsstärke		56,76	2,57	3,82	50,37	988,15
vgl. 2020-2050		-1 %	+49 %	+33 %	-5 %	-1,19 %

Tabelle 4.18: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,89	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		0,69	0,58		
Bus	+19,5 %		0,06			
Personenverkehr	-8,84 %			0,20	7,59	
Verkehrsstärke		10,00	0,75	0,78	8,47	988,15
vgl. 2020-2050		0 %	+50 %	+30 %	-5 %	-1,19 %

Tabelle 4.19: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Demgegenüber sinkt auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts die DTV im Jahr 2050 um 24,29 %, während der Lkw-1-Anteil tags und nachts um 54 % und der Lkw-2-Anteil tags um 24 % und nachts um 20 % zunimmt. Der Pkw-Anteil nimmt sowohl tagsüber als auch nachts um 30 % ab (vgl. Tabelle 4.20 und 4.21).

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,26	
Güterverkehr	+53,0 %		2,31	2,97		
Bus	+61,0 %		0,35			
Personenverkehr	-35,38 %			0,60	31,95	
Verkehrsstärke		43,44	2,66	3,57	37,21	757,09
vgl. 2020-2050		-24 %	+54 %	+24 %	-30 %	-24,29 %

Tabelle 4.20: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,89	
Güterverkehr	+53,0 %		0,69	0,58		
Bus	+61,0 %		0,08			
Personenverkehr	-35,38 %			0,14	5,38	
Verkehrsstärke		7,75	0,77	0,72	6,26	757,09
vgl. 2020-2050		-22 %	+54 %	+20 %	-30 %	-24,29 %

Tabelle 4.21: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Im Referenzszenario nimmt die DTV auf Gemeindestraßen im Jahr 2050 gegenüber 2020 um 10,37 % zu. Tagsüber und nachts nimmt der Lkw-1-Anteil um 78 % und der Lkw-2-Anteil um 56 % zu. Dabei nimmt der Pkw-Anteil um 6 % zu (vgl. Tabelle 4.22). Angaben zum Basisjahr siehe Anhang B, Tabellen B.9 und B.10 und Einzelheiten zur Berechnung siehe Tabellen B.11 und B.12.

Referenzszenario 2050	tags sowie nachts in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+10 %	+78 %	+56 %	+6 %	+10,37 %

Tabelle 4.22: Anstieg der Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen im Referenzszenario 2050 für den Tages- sowie Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Im Stabilitätsszenario hingegen sinkt die DTV auf Gemeindestraßen im Jahr 2050 gegenüber 2020 um 25,10 %, während tagsüber und nachts der Lkw-1-Anteil um 54 % und der Lkw-2-Anteil um 22 % zunimmt. Der Pkw-Anteil nimmt um 30 % ab (vgl. Tabelle 4.23). Einzelheiten zur Berechnung siehe Anhang B, Tabellen B.13 und B.14.

Stabilitätsszenario 2050	tags sowie nachts in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	-25 %	+54 %	+22 %	-30 %	-25,10 %

Tabelle 4.23: Anstieg der DTV auf Gemeindestraßen im Stabilitätsszenario 2050 für den Tages- sowie Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Weitere Ergebnisse sind für Autobahnen und Bundesstraßen aufgeführt. Angaben zu den Basisjahren und Einzelheiten zu den Berechnungen sind dem Anhang B zu entnehmen:

Referenzszenario 2050	tags (06.00-22.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+15 %	+69 %	+64 %	+6 %	+15,90 %

Tabelle 4.24: Anstieg der DTV auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Referenzszenario 2050	nachts (22.00-06.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+27 %	+73 %	+62 %	+6 %	+15,90 %

Tabelle 4.25: Anstieg der DTV auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	tags (06.00-22.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+1 %	+49 %	+37 %	-5 %	+2,36 %

Tabelle 4.26: Anstieg der DTV auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	nachts (22.00-06.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+10 %	+47 %	+35 %	-5 %	+2,36 %

Tabelle 4.27: Anstieg der DTV auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Referenzszenario 2050	tags (06.00-22.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+12 %	+74 %	+62 %	+6 %	+12,62 %

Tabelle 4.28: Anstieg der DTV auf Bundesstraße im Referenzszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Referenzszenario 2050	nachts (22.00-06.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	+18 %	+76 %	+60 %	+6 %	+12,62 %

Tabelle 4.29: Anstieg der DTV auf Bundesstraße im Referenzszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	tags (06.00-22.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	0 %	+48 %	+35 %	-5 %	-0,07 %

Tabelle 4.30: Anstieg der DTV auf Bundesstraßen außerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	nachts (22.00-06.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	4 %	+49 %	+34 %	-5 %	-0,07 %

Tabelle 4.31: Anstieg der DTV auf Bundesstraßen außerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	tags (06.00-22.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	-23 %	+54 %	+27 %	-30 %	-22,62 %

Tabelle 4.32: Anstieg der DTV auf Bundesstraßen innerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Tageszeitraum im Vergleich zum Basisjahr

Stabilitätsszenario 2050	nachts (22.00-06.00) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
	M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
vgl. Verkehrsstärke 2020-2050	-17%	+54%	+25%	-30%	-22,62%

Tabelle 4.33: Anstieg der DTV auf Bundesstraßen innerorts im Stabilitätsszenario 2050 für den Nachtzeitraum im Vergleich zum Basisjahr

4.2 Schallminderungspotenzial durch Elektromobilität

Gemäß RLS-19 wird bei der Berechnung der längenbezogenen Schalleistungspegel (L'_w) für eine bestimmte Quelllinie mit der Verkehrsstärke der Schalleistungspegel eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Grundwerten und Korrekturen für die Art des Straßenbelages, die Längsneigung, den Knotenpunkttyp sowie Mehrfachreflexionen berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1). Der Grundwert des Schalleistungspegels eines Fahrzeugs ($L_{W0,FzG}(v_{FzG})$) wird in Abhängigkeit von der Fahrzeuggruppe, der Geschwindigkeit und den entsprechenden Emissionsparametern bestimmt (siehe Tabelle 4.34) [16].

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, hängt das Lärminderungspotenzial von elektrisch betriebenen Fahrzeugen von Geschwindigkeiten zwischen 20 km/h und 50 km/h ab.

Grundwert in dB	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h
$L_{W0,Pkw}$	91,0	94,5	97,7	100,4
$L_{W0,Lkw1}$	100,5	101,4	103,3	105,9
$L_{W0,Lkw2}$	105,5	105,7	106,7	108,4

Tabelle 4.34: Grundwerte des Schalleistungspegels ($L_{W0,FzG}(v_{FzG})$) der drei Fahrzeuggruppen bei unterschiedlichen konstanten Geschwindigkeiten auf ebener, trockener Fahrbahn gemäß RLS-19 [16]

Um den elektrifizierten Fahrzeuganteil für das Jahr 2050 (vgl. Tabelle 3.2) gemäß RLS-19 zu berücksichtigen, wird zunächst eine Vorbeifahrpegeldifferenz ermittelt. Dazu wird die Arbeit von Laib (2021) gewählt, in der die Vorbeifahrpegel der Kraftfahrzeuge unter gleichen Bedingungen⁷ nach der Verordnung (EU) 540/2014 sowohl mit als auch ohne Elektroantrieb gemessen wurden [44]. Die folgende Tabelle 4.35 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Vorbeifahrpegel in 7,5 m in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für Pkw und Lkw über 3,5 t zGM sowie für Busse mit und ohne Elektroantrieb und jeweils die Differenzen [27].

7,5-m Vorbeifahrpegel in dB	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
Pkw	61,6	64,4	67,1	69,9
E-Pkw	55,9	61,7	65,8	69,3
Differenz ΔdB	5,7	2,7	1,3	0,5
7,5-m Vorbeifahrpegel in dB	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
Lkw / Bus	76,0	76,0	78,0	78,0
E-Lkw / E-Bus	62,0	66,0	74,0	78,0
Differenz ΔdB	14,0	10,0	4,0	0,0

Tabelle 4.35: Vorbeifahrpegel in 7,5 m $dB(A)$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für Pkw und Lkw über 3,5 t zGM sowie für Busse mit und ohne Elektroantrieb und jeweils die Differenzen nach [27]

⁷Gleiche Korrekturwerte für Straßendeckschichttyp, Längsneigung, Knotenpunkttyp sowie Mehrfachreflexionen.

Darüber hinaus werden die Grundwerte $L_{W0,FzG(v_{FzG})}$ gleich dem Vorbeifahrpegel der Fahrzeuge $L_{W,FzG(v_{FzG})}$ gemäß RLS-19 gesetzt, wobei die Korrekturwerte mit 0 dB angenommen werden⁸. Die Grundwerte aus der Tabelle 4.34 (bzw. Schalleistungspegel der Fahrzeuge $L_{W,FzG(v_{FzG})}$) werden von den Differenzen der Vorbeifahrpegel aus der Tabelle 4.35 subtrahiert, aufgeteilt nach Fahrzeugklassifizierung (siehe Tabelle 4.36).

$L_{W,FzG}$ in dB	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
$L_{W,E-Pkw}$	85,3	91,8	96,4	99,9
$L_{W,E-Lkw<3,5t}$	85,3	91,8	96,4	99,9
$L_{W,E-Lkw>3,5t}$	86,5	91,4	99,3	105,9
$L_{W,E-SNF}$	91,4	95,7	102,7	108,4
$L_{W,E-Bus}$	86,5	91,4	99,3	105,9
$L_{W,E-Krafträder}$	91,4	95,7	102,7	108,4

Tabelle 4.36: Subtraktion der Schalleistungspegel der Fahrzeuge $L_{W,FzG(v_{FzG})}$ von den Vorbeifahrpegeldifferenzen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Fahrzeugklassifizierung nach RLS-19 [16]

Zur Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegels einer Quelllinie werden die Anteile der Fahrzeuggruppen mit und ohne Elektroantrieb sowie die Fahrgeschwindigkeiten erforderlich. Dazu werden die in Kapitel 4.1.4 ermittelten Anteile der jeweiligen Fahrzeuggruppen am Gesamtverkehr in Abhängigkeit von den Verkehrsstärken der Straßentypen im Referenz- und im Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 und den prognostizierten elektrifizierten Fahrleistungen der Fahrzeuge für das Jahr 2050 nach Innerortsverkehr herangezogen (vgl. Kapitel 3.2.3 und siehe Tabelle 3.2)⁹.

Die Tabelle 4.37 zeigt beispielhaft die Anteile der Fahrzeuggruppen mit und ohne Elektroantrieb am Gesamtverkehr im Referenz- und Stabilitätsszenario für das Jahr 2050 auf Gemeindestraßen im Innerortsverkehr für den Tages- und Nachtzeitraum sowie Schalleistungspegel der Fahrzeuge bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h bis 50 km/h.

⁸Die Korrekturwerte für Straßendeckschichttyp, Längsneigung, Knotenpunkttyp sowie Mehrfachreflexionen werden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, jedoch in späteren Abschnitten. Es handelt sich hier ausschließlich um die Ermittlung der Differenzen zum längenbezogenen Schalleistungspegel durch elektrische Antriebsanteile für das Jahr 2050.

⁹Aufgrund der außerorts üblichen Geschwindigkeiten von mehr als 50 km/h werden elektrifizierte Fahrleistungsanteile an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Fahrzeuggruppe	$L_{W,FzG}(v_{FzG})$ in dB				Gemeindestraße Innerorts (in %)	
	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50km/h	Referenz	Stabilität
a Pkw	91,0	94,5	97,7	100,4	26,64	25,20
b Lkw bis 3,5t	91,0	94,5	97,7	100,4	3,84	4,64
c Lkw über 3,5t	100,5	101,4	103,3	105,9	4,20	5,07
d Sattelkraftfahrzeug	105,4	105,7	106,7	108,4	4,02	4,85
e Bus	100,5	101,4	103,3	105,9	0,05	0,11
f Krafträder	105,4	105,7	106,7	108,4	1,19	1,13
g E-Pkw	85,3	91,8	96,4	99,9	52,65	49,80
h E-Lkw bis 3,5t	85,3	91,8	96,4	99,9	6,38	7,71
i E-Lkw über 3,5t	86,5	91,4	99,3	105,9	0,32	0,38
j E-Sattelkraftfahrzeug	91,4	95,7	102,7	108,4	0,34	0,42
k E-Bus	86,5	91,4	99,3	105,9	0,27	0,60
l E-Krafträder	91,4	95,7	102,7	108,4	0,10	0,10
Summe:					100	100

Tabelle 4.37: Anteile der Fahrzeuggruppen mit und ohne Elektroantrieb am Gesamtverkehr im Referenz- und Stabilitätsszenario 2050 auf Gemeindestraßen im Innerortsverkehr sowie Schallleistungspegel der Fahrzeuge bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h bis 50 km/h

Anschließend wird mit der Gleichung 4.3 der längenbezogene Schalleistungspegel in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit, Zeitraum, Straßentyp im Referenz- und Stabilitätsszenario sowohl für Fahrzeuggruppen mit als auch ohne elektrifizierte Fahrzeuge berechnet und die Pegeldifferenz ermittelt.

$$\begin{aligned}
L'_W = 10 \cdot \lg[M] + 10 \cdot \lg & \left[\frac{a}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,a}(v_a)}}{v_a} \right. \\
& + \frac{b}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,b}(v_b)}}{v_b} + \frac{c}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,c}(v_c)}}{v_c} \\
& \left. + \dots + \frac{l}{100} \cdot \frac{10^{0.1 \cdot L_{W,l}(v_l)}}{v_l} \right] - 30 \quad (4.3)
\end{aligned}$$

mit	L'_W	Längenbezogener Schalleistungspegel in dB
	$L_{W,FzG}(v_{FzG})$	Schalleistungspegel für Fahrzeuge der Fahrzeuggruppen a bis l bei der Geschwindigkeit (v_{FzG}) in dB
	(v_{FzG})	Geschwindigkeit für die Fahrzeuge (v_{FzG}) gemäß der Tabelle 4.37 in km/h
	a bis l	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppen der Tabelle 4.37 (sowie der Tabellen im Anhang B)

Aufgrund der üblichen Geschwindigkeiten von 50 km/h werden hier Gemeindestraßen analysiert, wobei die Ergebnisse jedoch auch auf innerörtliche Bundesstraßen sowie Verbindungsstraßen übertragen werden¹⁰. Die folgende Tabelle 4.38 zeigt die Ergebnisse der längenbezogenen Schallleistungspegeldifferenzen durch elektrifizierte Kraftfahrzeuge im Jahr 2050 für das Referenz- und das Stabilitätsszenario auf Gemeindestraßen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

Referenzszenario 2050				
$\Delta L'_w$ in dB(A)	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
Innerorts	-1,01	-0,89	-0,58	-0,21
Stabilitätsszenario 2050				
$\Delta L'_w$ in dB(A)	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
Innerorts	-0,96	-0,87	-0,57	-0,20

Tabelle 4.38: Längenbezogenen Schallleistungspegeldifferenzen durch elektrifizierte Kraftfahrzeuge im Jahr 2050 für das Referenz- und das Stabilitätsszenario

4.3 Schallminderungspotenzial eines Tempolimits auf Autobahnen

Im Zusammenhang mit der Diskussion um die Umweltauswirkungen der Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen werden häufig auch die Lärmwirkungen thematisiert. Dabei wird vielfach davon ausgegangen, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung grundsätzlich zu einer Reduktion des Verkehrslärms beitragen kann.

Zur Beurteilung dieser potenziellen Auswirkungen im Rahmen der Szenarien wird die Untersuchung des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW) „Richtgeschwindigkeit dominiert – Ergebnisse einer IW-Analyse zu Verkehr und Geschwindigkeit auf Autobahnen in NRW“ berücksichtigt. Ziel dieser Untersuchung war es, zu analysieren, wie viel und wie schnell auf Autobahnen ohne generelles Tempolimit tatsächlich gefahren wird. Hierfür wurden im Jahr 2024 – wie bereits in den Jahren 2021 und 2022 – die Daten der automatisierten Verkehrszählungsstationen an Autobahnen in Nordrhein-Westfalen ausgewertet. Die aktuelle Auswertung basiert auf rund 1,9 Milliarden erfassten Fahrten von Fahrzeugen (Pkw und leichten Nutzfahrzeugen) auf Autobahnabschnitten ohne dauerhafte Geschwindigkeitsbegrenzung. Die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit lag bei 113,5 km/h. Im Vergleich zu den Vorjahren ist ein Rückgang der Durchschnittsgeschwindigkeit zu verzeichnen: 2021 lag sie bei etwa 116,5 km/h, 2022 bei 115,2 km/h. Die Auswertung im Jahr 2024 zeigt, dass ca. 83 % der Fahrzeuge unter 130 km/h, ca. 10 % zwischen 130 und 140 km/h und ca. 7 % über 140 km/h fuhren [70].

Auf Grundlage dieser Verkehrsdaten wird das längenbezogene Schallminderungspotenzial einer Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen im Referenz- und Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 berechnet.

Hierzu wird zunächst die Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten auf Basis der IW-Untersuchung mit dem prognostizierten Anstieg der durchschnittlichen Verkehrsstärke bis zum Jahr 2050 für den Tages- und Nachtzeitraum zusammengeführt (vgl. Abschnitt 4.1). Die Abbildung 4.1 zeigt die Verteilung der Pkw-Anteile in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie die Lkw-1- und Lkw-2-Anteile (zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h) für den Tageszeitraum im Referenzszenario 2050.

¹⁰Die Differenz der längenbezogenen Schallleistungspegel zwischen Gemeindestraßen und innerörtlichen Bundes- bzw. Verbindungsstraßen beträgt nach Berechnung der prognostizierten durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken (DTV) bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h maximal 0,25 dB. Da zudem der innerörtliche Verkehr überwiegend auf Gemeindestraßen verlaufen und die zulässigen Geschwindigkeiten auf Bundes- bzw. Verbindungsstraßen in der Regel über 50 km/h liegen, beziehen sich die Berechnungen ausschließlich auf die Gemeindestraßen.

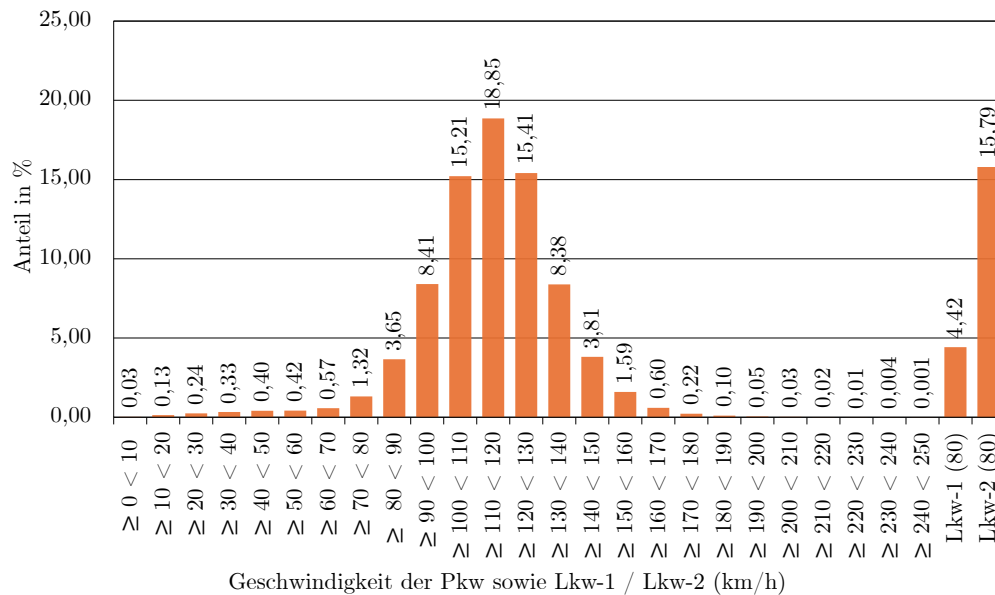


Abbildung 4.1: Prognostizierte Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tageszeitraum auf Autobahnen im Referenzszenario [70]

Anschließend wird in beiden Szenarien die Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h berücksichtigt, wobei davon ausgegangen wird, dass Pkw-Fahrten mit Geschwindigkeiten über 120 km/h in die Geschwindigkeiten 110 - 120 km/h umverteilt werden. Die Abbildung 4.2 zeigt die angepasste Verteilung der Pkw-Anteile sowie der Lkw-1- und Lkw-2-Anteile für den Tageszeitraum im Referenzszenario 2050 unter Annahme eines Tempolimits von 120 km/h.

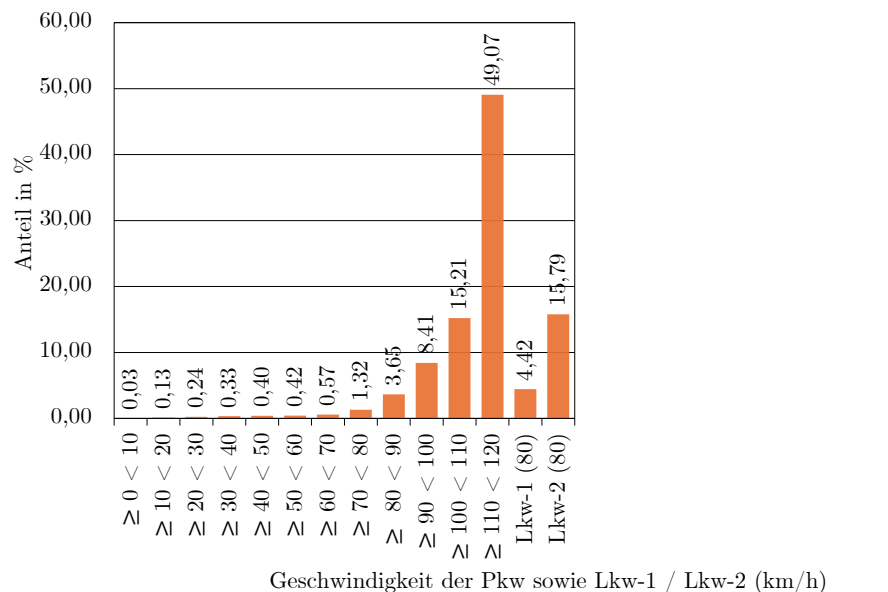


Abbildung 4.2: Prognostizierte Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tageszeitraum auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 bei einem Tempolimit von 120 km/h

Weitere Verteilungen für den Tages- und Nachtzeitraum für das Referenzszenario und das Stabilitätsszenario mit und ohne Einführung eines Tempolimits sind dem Anhang C zu entnehmen.

Anschließend wird der längenbezogene Schalleistungspegel L'_w mit und ohne Einführung eines Tempolimits von 120 km/h in beiden Szenarien anhand der zugehörigen Grundwerte der Fahrzeuggruppen $L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v_{FzG} gemäß RLS-19 berechnet¹¹. Die Berechnung erfolgt auf Basis des Ausgangsjahres mit 10.000 Kfz/24h jeweils für den Tages- und Nachtzeitraum. Die Korrekturwerte werden dabei mit 0 dB angesetzt (siehe Tabelle 4.39)¹².

Nach der Berechnung zeigt sich in beiden Szenarien durch die Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h bis zum Jahr 2050 eine Minderung des längenbezogenen Schalleistungspegels um 0,6 dB sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum. Dies führt zu keinen wahrnehmbaren Pegeldifferenzen.

Referenzszenario 2050			
L'_w in dB	ohne Tempolimit	Tempolimit 120	$\Delta L'_w$ in dB
tags (06.00-22.00 Uhr)	108,2	107,6	-0,6
nachts (22.00-06.00 Uhr)	101,0	100,4	-0,6
Stabilitätsszenario 2050			
L'_w in dB	ohne Tempolimit	Tempolimit 120	$\Delta L'_w$ in dB
tags (06.00-22.00 Uhr)	107,7	107,1	-0,6
nachts (22.00-06.00 Uhr)	100,5	99,9	-0,6

Tabelle 4.39: Längenbezogene Schalleistungspegel und Schalleistungspegeldifferenzen mit und ohne Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen für das Referenz- und das Stabilitätsszenario 2050 (Basisjahr 2020 mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)

4.4 Bebauungsdichte

Die Entwicklung der Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr bis 2050 beeinflusst die Bebauungsdichte, die wiederum die Schallausbreitung des Straßenverkehrslärms verändert (siehe Kapitel 2.1). Zur Analyse der Entwicklung der Bebauungsdichte wird die in Kapitel 3.3.2 beschriebene Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der Bodenfläche im Referenz- und Stabilitätsszenario betrachtet (siehe Tabelle 3.19).

Als Ausgangsjahr für die Analyse wird das Jahr 2020 angenommen und die Bodenflächen nach den siedlungsstrukturellen Kreistypen des Statistischen Bundesamtes analysiert [68]. Da in den vorliegenden Zukunftsforschungen keine spezifische Aufteilung der Anteile zwischen Siedlungs- und Verkehrsfläche für die Szenarien vorliegt, wird angenommen, dass die Anteilsverhältnisse des Jahres 2020 auch für das Jahr 2050 gelten: Dies gilt sowohl für das Referenz- als auch für das Stabilitätsszenario (siehe Tabelle 4.40).

Zusätzlich ist der Anstieg in Prozentpunkten im Referenz- und Stabilitätsszenario bis 2050 gegenüber 2020 dargestellt, um eine vereinfachte Berechnung der Bodenfläche in den Prognosemodellen in Kapitel 5.2 zu ermöglichen. Dies ermöglicht eine differenzierte Analyse der prognostizierten Schallausbreitung im Jahr 2050 verglichen mit 2020 unter Berücksichtigung der Bebauungsdichte.

¹¹Gemäß RLS-19 kann für Pkw bis 130 km/h und für Lkw-1 und Lkw-2 bis 80 km/h gerechnet werden, darüber wird der Wert als hypothetisch angenommen (siehe [16] S. 21).

¹²Die Korrekturen für Straßendeckschichttyp, Längsneigung, Knotenpunkttyp sowie Mehrfachreflexionen werden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, jedoch in späteren Abschnitten. Es handelt sich hierbei ausschließlich um die Ermittlung der Differenzen zum längenbezogenen Schalleistungspegel durch die Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen bis zum Jahr 2050.

SuV-Flächen an der Bodenfläche in % bzw. in %-Punkte	Basisjahr	Referenz		Stabilität		vgl. 2020-2050	
	2020	2030	2050	2030	2050	Referenz	Stabilität
Kreisfreie Großstädte	50,9	52,6	54,6	51,6	52,8	+3,7	+1,9
davon Siedlungsfläche (75,7 %)	38,5	39,8	41,3	39,1	40,0	+2,8	+1,5
davon Verkehrsfläche (24,3 %)	12,4	12,8	13,3	12,5	12,8	+0,9	+0,4
Städtische Kreise	17,8	18,6	19,9	18,2	19,0	+2,1	+1,2
davon Siedlungsfläche (66,2 %)	11,8	12,3	13,2	12,0	12,6	+1,4	+0,8
davon Verkehrsfläche (33,8 %)	6,0	6,3	6,7	6,2	6,4	+0,7	+0,4
Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen	12,9	13,4	14,1	13,1	13,7	+1,2	+0,8
davon Siedlungsfläche (63,5 %)	8,2	8,5	9,0	8,3	8,7	+0,8	+0,5
davon Verkehrsfläche (36,5 %)	4,7	4,9	5,1	4,8	5,0	+0,4	+0,3
Dünn besiedelte ländliche Kreise	10,4	10,7	11,2	10,5	10,8	+0,8	+0,4
davon Siedlungsfläche (60,8 %)	6,3	6,5	6,8	6,4	6,6	+0,5	+0,3
davon Verkehrsfläche (39,2 %)	4,1	4,2	4,4	4,1	4,2	+0,3	+0,1
Bundesgebiet gesamt	14,5	15,0	15,8	14,7	15,2	+1,3	+0,7
davon Siedlungsfläche (64,9 %)	9,4	9,7	10,3	9,5	9,9	+0,9	+0,4
davon Verkehrsfläche (35,1 %)	5,1	5,3	5,5	5,2	5,3	+0,5	+0,2

Tabelle 4.40: Entwicklung der Anteile der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Bodenfläche nach siedlungsstrukturellen Kreistypen im Referenz- und Stabilitätsszenario 2050 nach [24] gegenüber dem Basisjahr 2020 nach [68](sowie in %-Punkten)

4.5 Gebäudeflächen

4.5.1 Reflexionsverluste und Prognose der Flächenanteile für begrünte Gebäudeflächen

Obwohl begrünte Gebäudeflächen in verschiedenen Untersuchungen als schallabsorbierend beschrieben werden, besteht Bedarf an weiterer Forschung. Die Wirkung von begrünter Gebäudeflächen auf die Schallausbreitung im städtischen Raum ist insgesamt als begrenzt einzustufen. Untersuchungen zeigen, dass eine Lärminderung maßgeblich von den Schallausbreitungsbedingungen abhängt: insbesondere vom Einfallswinkel und Ausbreitungspfad des Schalls, vom betrachteten Frequenzbereich sowie von weiteren Randbedingungen wie Substratfeuchte, Dachneigung, Gebäudehöhe, Geometrie und Lage [57], [71]. Zudem werden die Schallabsorptionseigenschaften von Dachflächen im Berechnungsverfahren der RLS-19 nicht direkt berücksichtigt [16]. Begrünte Dachflächen werden daher in dieser Arbeit hinsichtlich der Schallausbreitung als vernachlässigbar bewertet.

Da die Schallabsorptionseigenschaften von Fassadenflächen hingegen gemäß RLS-19 berücksichtigt werden können, basiert die Prognose zum einen auf der Analyse des Reflexionsverlustes begrünter Fassadenflächen und zum anderen auf der Ermittlung ihrer flächenmäßigen Entwicklung bis zum Jahr 2050.

Zur Analyse der Reflexionsverluste der begrünten Fassadenflächen werden die Forschungsarbeiten von Wong et al. (2010) [58], Thomazelli et al. (2017) [59] und Chang et al. (2022) [60] herangezogen (siehe Kapitel 3.2.6, Abbildung 3.10). Gemäß DIN EN 1793-5 wird dabei das ADRIENNE-Verfahren zur Berechnung des Reflexionsverlustes angewendet. Nach diesem Verfahren wird die Einzahl-Angabe zur Schallreflexion nach der Gleichung 4.4 berechnet. Dabei wird eine erweiterte Messunsicherheit (Vergleichsstandardabweichung des Schallreflexionsindex s_R) zum Signifikanzniveau von 95% berücksichtigt¹³. Die Schallabsorptionsgeraden der oben genannten Arbeiten werden in Schallreflexionsindices umgerechnet, wobei die Werte unter den Bedingungen eines diffusen Schallfeldes gemessen wurden. Die Untersuchungen zeigen, dass eine gewisse Übereinstimmung zwischen den Daten eines diffusen Schallfeldes und den Daten eines Direktschallfeldes besteht (vgl. DIN EN 1793-5:2023). Diese Annahme wird für das Prognosemodell übernommen. Darüber hinaus wird, da es sich um Fassadenflächen handelt, von einer Mindestgröße mit den Abmessungen von 4 Metern Höhe und 4 Metern Breite ausgegangen [72].

$$DL_{RI} = -10 \lg \left[\frac{\sum_{i=m}^{18} RI_i \cdot 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (4.4)$$

mit	DL_{RI}	Einzahl-Angabe zur Schallabsorption in einem gerichteten Schallfeld in dB
	RI_i	Schallreflexionsindex des i-ten Terzbandes
	m	Die Zahl für das niedrigste verlässliche Terzband
	L	Der relative A-bewertete Schalldruckpegel in dB des standardisierten Verkehrslärmspektrums nach EN 1793-3:1997 im i-ten Terzband

Bei einem Gebäude können in der Regel nicht alle Flächen begrünt werden, beispielsweise aufgrund von Türen, Fensterflächen oder anderen Fassadenelementen. Auch bei bodengebundenen Fassadenbegrünungen können je nach Pflanzenart und Gestaltung Lücken entstehen oder bestimmte Pflanzungen saisonal, z.B. in der Vegetationsphase, vollständig begrünt sein. Diese Einschränkungen werden bei der Gewichtung des Reflexionsverlustes berücksichtigt und es wird vorausgesetzt, dass ca. 55 % der Fassadenfläche begrünt werden können. Die verbleibende Fassadenfläche von 45 % wird mit einem Reflexionsverlust von 1,0 dB angesetzt (vgl. Tabelle 4.41)¹⁴.

Die Berechnungen ergeben einen Reflexionsverlust $D_{RV1/2}$ nach Wong et al. von 1,1 dB, nach Chang et al. von 4,3 dB und nach Thomazelli et al. von 5,3 dB. Für das Prognosemodell wird der Wert von 5,3 dB angenommen.

Reflexionsverlust $D_{RV1/2}$ in dB	100 % begrünte Fassadenfläche	55 % begrünte Fassadenfläche
Wong et al. (2010)	1,2	1,1
Chang et al. (2022)	5,7	4,3
Thomazelli et al. (2017)	7,1	5,3

Tabelle 4.41: Reflexionsverlust bei vollständig begrünter Fassadenfläche und 55% begrünter Fassadenfläche gemäß der genannten drei Arbeiten [59], [60], [58]

¹³ $D_{RV} = DL_{RI} - U_{95\%}$ [16]

¹⁴Gemäß RLS-19 sind Reflexionen zu berücksichtigen, wenn die Höhe h_R der reflektierenden Fläche mindestens 1,0 Meter beträgt und die Bedingung $h_R \geq 0,3 \cdot \sqrt{a_R}$ erfüllt ist, wobei a_R der kleinere Abstand zwischen Reflektor und Immissionsort ist. Der Reflexionsverlust wird in dB angegeben und überschlägig auf den Schalleistungspegel gerechnet, wobei Reflexionswerte von 0,5 dB für reflektierende Flächen, 3,0 dB für reflexionsmindernde Flächen und 5,0 dB für stark reflexionsmindernde Flächen (nur bei Spiegelschallquellen) in die Berechnung eingehen [16]. Bei glatten Wänden wird ein Reflexionsverlust von 0 bis 1,0 dB angenommen, bei stark gegliederten Wänden, wie z. B. bei gegliederten Fassaden, bei denen die Streuverluste durch Fenster, Balkone usw. zu berücksichtigen sind, 2,0 dB (vgl. VDI 2714: 1988-01 [55]).

Im zweiten Schritt wird der Flächenanteil der Fassadenbegrünung bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Dabei wird angenommen, dass der Trend der letzten Jahre zur weiteren Implementierung von Dach- und Fassadenbegrünungen durch die bestehenden Förderinstrumente weiterhin verstärkt wird. Daher wird mit einer weiteren Zunahme von Gebäudebegrünungen bis zum Jahr 2050 in Deutschland gerechnet (vgl. Kapitel 3.2.6).

Unter dieser Annahme werden die Entwicklungen der begrünten Fassadenflächen der vergangenen Jahre (vgl. Abbildungen 3.9) analysiert und durch lineare Trendlinien die Grundlage für die Schätzung der Flächenentwicklung bis zum Jahr 2050 beschrieben.

Bei der Analyse von Fassadenbegrünungen werden bereits begrünte boden- und wandgebundene Systeme trotz unterschiedlicher Begrünungsdichten zusammen betrachtet (vgl. Abbildung 3.9)¹⁵. Die lineare Trendlinie der Analyse ergibt eine jährliche Zunahme der begrünten Fassadenfläche von ca. 18,4 % bis zum Jahr 2050. Dies entspricht einer Zunahme der begrünten Fassadenfläche bis 2050 im Vergleich zu 2020 auf ca. 14.800.000 m², was ca. 0,12 % der Bruttofassadenfläche von 12.416 km² entspricht¹⁶.

Obwohl die Schallausbreitungsbedingungen von begrünten Dachflächen, wie oben erläutert, im Rahmen der RLS-19 nicht berücksichtigt werden, kann dennoch als Exkurs zur Fassadenbegrünung ihre flächenmäßige Entwicklung bis zum Jahr 2050 prognostiziert werden. Dabei werden die vorhandenen extensiven und intensiven Dachbegrünungen zusammengerechnet, da sowohl die Oberfläche als auch die Substrattiefe mit und ohne Vegetation die Absorptionseigenschaften beeinflussen (vgl. Abbildung 3.8)[57]. Die lineare Trendlinie der Analyse ergibt, dass sich die begrünte Dachfläche bis 2050 im Vergleich zu 2020 etwa vervierfachen wird, was einer jährlichen Zunahme von ca. 4,2 % entspricht. Dies bedeutet eine begrünte Dachfläche von ca. 590.000.000 m² im Jahr 2050 und entspricht ca. 9,7 % der gesamten Dachfläche von ca. 6.101 km² in Deutschland¹⁷. Demnach nehmen die Dachbegrünungen deutlich stärker zu als die Fassadenbegrünungen.

4.5.2 Reflexionsverluste und Prognose der Flächenanteile für Gebäudeflächen mit Photovoltaikanlagen

Die Vorgehensweise bei der Prognose der Gebäudeflächen mit Photovoltaikanlagen entspricht der in Kapitel 4.5.1 für die begrünten Gebäudeflächen. Die Prognose basiert zum einen auf der Analyse der Reflexionsverluste der Fassadenflächen mit PV-Anlagen und zum anderen auf der Ermittlung der flächenmäßigen Entwicklung der Fassaden mit PV-Anlagen bis zum Jahr 2050.

PV-Module auf Fassadenflächen können aufgrund ihrer Vorderseite aus Sicherheitsglas und ggf. Aluminiumrahmen schallreflektierend wirken. Der Reflexionsverlust der Fassadenflächen wird gemäß DIN EN 1793-5 mit dem ADRIENNE-Verfahren berechnet, bei dem die Einzah-Angabe zur Schallreflexion nach Gleichung 4.4 bestimmt wird [72]. Der Schallreflexionsindex wird aus dem frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad einer reflektierenden Spanplatte berechnet. Denn gemäß dem Bericht „Klimaneutraler Lärmschutz, Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken“ hat diese denselben Schallreflexionsgrad wie PV-Module (Fraunhofer IBP (2022)) [74]. Dies ergibt für ein PV-Modul einen Reflexionsverlust von DL_{RI} von 0,25 dB. Unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit zum Signifikanzniveau von 95 % entsteht eine stark reflektierende Fläche, wobei ein Reflexionsverlust DL_{RV} von 0 dB angenommen wird.

Da nicht alle Gebäudeflächen mit PV-Modulen belegt werden können, wie z.B. Fenster, Türen und andere Fassadenelemente, wird der Reflexionsverlust DL entsprechend gewichtet. Es wird angenommen, dass maximal 55 % der Fassadenfläche mit PV-Modulen ausgestattet werden, während die verbleibenden 45 % einen Reflexionsverlust von 1,0 dB aufweisen. Unter Berücksichtigung dieser Gewichtung ergibt sich ein Reflexionsverlust $DL_{RV1/2}$ von 0,5 dB.

¹⁵Die unterschiedlichen Begrünungsdichten sowie die saisonalen Unterschiede in der Bepflanzung werden durch den gewichteten Reflexionsverlust berücksichtigt (siehe Tabelle 4.41).

¹⁶Die Prognose geht davon aus, dass die Bruttofassadenfläche von 12.416 km² bis 2050 unverändert bleibt und der prognostizierte Flächenanteil auch für Neubauten bis 2050 gilt [73].

¹⁷Im Jahr 2020 lag der Flächenanteil begrünter Dächer ca. bei 2,3 % der gesamten Dachfläche von 6.101 km². Die Prognose geht davon aus, dass die Dachfläche von ca. 6.101 km² bis 2050 unverändert bleibt und der prognostizierte Flächenanteil auch für Neubauten bis 2050 gilt [73].

Die Schallabsorptionseigenschaften von Dachflächen mit PV-Modulen werden in dieser Arbeit ebenso wie begrünte Dächer nicht berücksichtigt, da sie nicht direkt in das Berechnungsverfahren der RLS-19 eingehen.

Im nächsten Schritt werden die Flächenanteile für Fassadenflächen (sowie Dachflächen) mit PV-Anlagen bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Grundlage hierfür ist die Analyse relevanter Flächenpotenziale in Deutschland sowie der damit erzielbaren elektrischen Leistung von PV-Anlagen, basierend auf der Untersuchung „PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland“.

Nach dieser Untersuchung stehen in Deutschland insgesamt 18.517 km² Bruttofläche zur Verfügung, wovon ca. 6.101 km² (ca. 33 %) auf Dächer und ca. 12.000 km² (ca. 67 %) auf Fassaden entfallen. Zur Ermittlung der für den PV-Ausbau geeigneten Gebäudeflächen – mit besonderem Fokus auf bauwerkintegrierte Photovoltaik-Modulflächen (BIPV) – werden verschiedene Abschlagsfaktoren auf die Bruttofläche angewendet. Bei Fassadenflächen werden beispielsweise mehrgeschossige Gebäude sowie Verschattungen durch Bäume und andere Gebäude berücksichtigt. Zudem ist die Fassadenfläche von Wohn- und Bürogebäuden im Durchschnitt zu 30 % durch Fenster und Türen belegt, sodass rund 70 % potenziell für PV-Anlagen nutzbar sind. Ausgeschlossen werden jedoch kleine Flächen unter 7 m² sowie Bereiche mit einer geringen solaren Einstrahlung ($< 500 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Auch für Dächer werden verschiedene Abschläge vorgenommen, beispielsweise für Bereiche mit starken Verschattungen, baulichen Aufbauten oder anderen Einflussfaktoren, die eine Nutzung für PV-Anlagen einschränken. Basierend auf den Abschlagsfaktoren ergibt sich in Deutschland eine potenziell installierbare elektrische BIPV-Leistung von insgesamt ca. 900 GWp, wovon ca. 504 GWp auf Dachflächen und ca. 396 GWp auf Fassadenflächen entfallen. Dies entspricht einer Flächennutzung von etwa 45,9 % der Dachflächen und etwa 17,7 % der Fassadenflächen (vgl. Tabelle 4.42) [73].

Unter Berücksichtigung der verfügbaren Potenzialflächen wird eine Prognose für den PV-Ausbau bis zum Jahr 2050 erstellt. Hierfür wird das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) entwickelte Langfristszenario herangezogen, wobei das Szenario T45-Strom* berücksichtigt wird. Dieses Szenario stellt Mindestmaßnahmen dar, um bis zum Jahr 2045 die Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) zu erreichen. Das Szenario definiert die festgelegten Ausbauziele als Mindestausbau und geht von einer installierten PV-Leistung von mindestens 400 GW bis zum Jahr 2045 aus. Als Annahme wird im Rahmen dieser Arbeit die PV-Leistung im Jahr 2050 mindestens auf dem Niveau des Jahres 2045 gehalten (vgl. Kapitel 3.2.6 [64]).

Im Folgenden wird berechnet, welcher Anteil der Bruttofassaden- und Dachflächen mit PV-Anlagen belegt werden müsste, um das definierte Ausbauziel des Szenarios T45-Strom* zu erreichen¹⁸. Von den insgesamt 400 GW installierter PV-Leistung entfallen ca. 224 GW auf Dachflächen und ca. 176 GW auf Fassadenflächen [30].

Folglich sind bis zum Jahr 2050 etwa 20,4 % der potenziellen Dachflächen und etwa 7,9 % der potenziellen Fassadenflächen in Deutschland mit Photovoltaikanlagen zu belegen (vgl. Tabelle 4.42).

¹⁸Freiflächenanlagen und ähnliche Systeme werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da gemäß den Empfehlungen des Umweltbundesamtes der Fokus darauf liegt, möglichst viel Photovoltaiksysteme auf bestehenden Gebäudeflächen zu installieren, anstatt zusätzliche Flächen in Anspruch zu nehmen [75].

Prognose für PV-Anlagen	Dächer	Fassaden	Summe
vorhandene Bruttofläche in km ²	6101	12416	18 517
davon Potenzielle PV-Fläche in km ²	2800	2200	5000
Anteil an der Bruttofläche in %	45,9 %	17,7 %	27,0 %
Potenziell installierbare elektrische PV-Leistung in GWp	504	396	900
Szenario T45-Strom* PV-Leistung in GW	224	176	400
davon erforderliche PV-Fläche 2050 in km ²	1244	978	2222
Anteil an der Bruttofläche 2050 in %	20,4 %	7,9 %	12,0 %

Tabelle 4.42: Prognose der Dach- und Fassadenflächen für PV-Anlagen bis 2050 gemäß [64],[73]

Kapitel 5

Schallimmissionspläne 2050

5.1 Modellierung aktueller Planungssituationen

Als Grundlage für die Prognosemodelle werden städtebauliche Übersichtspläne mit der Lärmsoftware SoundPLAN 9.1 simuliert, die es ermöglicht, Untersuchungen in allen Bereichen des Schallimmissionsschutzes sowie der Raumakustik durchzuführen. Dazu gehören Berechnungen und Modellierungen der Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung standardisierter und aktueller Berechnungsverfahren des Umgebungslärms. Durch die Einbindung von Geodaten aus öffentlichen Quellen wie den Geoportalen der Bundesländer oder des Projekts OpenStreetMap können realitätsnahe grafische Pläne erzeugt werden. Diese Pläne enthalten vereinfachte Gebäudestrukturen, Straßenverläufe, Dämpfungsflächen sowie topographische Informationen.

Die städtebaulichen Planungssituationen werden als realistische Strukturen in der Bestandsentwicklung von allgemeinen Wohngebieten in kreisfreien Großstädten, städtischen Kreisen, ländlichen Kreisen mit Verdichtungsansätzen und dünn besiedelten ländlichen Kreisen modelliert. Städtebauliche Strukturen mit einer Mischung aus Wohnnutzung, gewerblicher Nutzung und öffentlicher Infrastruktur werden berücksichtigt. Darüber hinaus werden mögliche kritische Lärmbelastungen verschiedener Quelllinien des Straßenverkehrs einbezogen: Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen, Bundesstraßen, Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen sowie Gemeindestraßen.

Die Verkehrsdaten der einzelnen Fahrstreifen, wie Straßenquerschnitte, durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV), Fahrzeuggeschwindigkeiten und Straßendeckschichttypen, werden als repräsentative Durchschnittsschätzungen in Abhängigkeit von der Straßenart und den örtlichen Gegebenheiten bestimmt (siehe Tabelle 5.1). Für die stündlichen Verkehrsstärken (M) der einzelnen Fahrzeuge der Fahrzeuggruppen Pkw, Lkw-1 und Lkw-2 werden standardisierte Werte nach RLS-19 ermittelt (vgl. Tabelle 2.3). Die Gebäudekubaturen in den Übersichtsplänen werden mit einer vereinfachten quadratischen Struktur und die Fassadenflächen mit einem Reflexionsverlust von 1,0 dB dargestellt, wobei bei gegliederten Fassaden die Streuverluste durch Fenster, Balkone etc. berücksichtigt werden (vgl. RLS-19 [16] sowie VDI2714:1988 [55]). Die Fassadenflächen der Gebäude mit PV-Modulen werden mit einem Reflexionsverlust von 0,5 dB angesetzt (vgl. Kapitel 4.5.2). Die Übersichtspläne beinhalten außerdem Dämpfungsgebiete und Bodeneffekte wie Gras, Wiese, sonstigen Bewuchs sowie Wasserflächen.

Zu jedem Übersichtsplan werden Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum gemäß RLS-19 als Vergleichsgrundlage für die Prognosemodelle berechnet. Die Schallimmissionspläne werden anhand von Rasterkarten mit einem Rasterabstand von 5 m und einer Messhöhe von 2 m über Grund berechnet.

Straßenart	km/h	DTV (Kfz/24h)	Straßen- deckschicht
Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen	Pkw: ohne Tempolimit Lkw: 80	30.000	Nicht geriffelter Gussasphalt, OPA
Bundesstraßen	50 - 100	2.000 - 10.000	Nicht geriffelter Gussasphalt
Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen	30 - 70	500 - 7.000	
Gemeindestraßen	10 - 50	100 - 2.000	

Tabelle 5.1: Bandbreite der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV), der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und des Straßendeckschichttyps für die verschiedenen Straßenarten

Kreisfreie Großstädte

Als Beispiel ist ein Übersichtsplan der Ausgangssituation einer kreisfreien Großstadt mit den zugehörigen Schallimmissionsplänen für den Tageszeitraum in Abbildung 5.1 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.2 dargestellt. Das allgemeine Wohngebiet wird über Gemeindestraßen und eine angrenzende Bundesstraße erschlossen.

Die in Nordwest-Südost-Richtung verlaufende Bundesstraße mit einer DTV von 8.000 Kfz/24h und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h wird von zwei in Ost-West-Richtung verlaufenden, stark befahrenen Gemeindestraßen gekreuzt. Im nördlichen Planausschnitt verläuft die stark befahrene Gemeindestraße mit einer DTV von 4.000 Kfz/24h mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h sowie 30 km/h und im südlichen Planausschnitt mit einer DTV von 6.000 Kfz/24h mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Die Höhe der Bebauung reicht von eingeschossigen Gebäuden bis zu mehrgeschossigen Gebäuden mit einer Höhe von bis zu 11,20 m.

Der Schallimmissionsplan für den Tageszeitraum (vgl. Abbildung 5.1) zeigt entlang der Bundesstraße eine Lärmbelastung an den straßenzugewandten Gebäudefassaden mit Beurteilungspegeln zwischen 70 und 74 dB, während entlang der beiden stark befahrenen Gemeindestraßen die Beurteilungspegel überwiegend zwischen 67 und 70 dB liegen. Die Beurteilungspegel entlang der Bundesstraße überschreiten im Tageszeitraum sowohl den Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge gemäß 16.BImSchV als auch den Auslösewert für die Lärmsanierung an bestehenden Straßen gemäß VLärmSchR97 für allgemeine Wohngebiete. Entlang der Gemeindestraßen hingegen überschreiten die ermittelten Werte den Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge, liegen aber noch unter dem Auslösewert für die Lärmsanierung (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2). In den verkehrsberuhigten Innenbereichen entlang der Gemeindestraßen mit geringeren Verkehrsstärken liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend im Bereich von 52 bis 59 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden sind geringere Beurteilungspegel zwischen 44 und 48 dB zu verzeichnen. Diese Werte liegen unter dem Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge sowie dem Auslösewert für die Lärmsanierung.

Der Schallimmissionsplan für den Nachtzeitraum (vgl. Abbildung 5.2) zeigt insgesamt eine geringere Lärmbelastung als im Tageszeitraum. Dennoch treten an den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Bundesstraße Beurteilungspegel zwischen 64 und 68 dB und an den beiden stark befahrenen Gemeindestraßen zwischen 56 und 60 dB auf. Wie im Tageszeitraum werden auch im Nachtzeitraum entlang der Bundesstraße der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge sowie der Auslösewert für die Lärmsanierung überschritten. Entlang der stark befahrenen Gemeindestraßen wird hingegen lediglich der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge überschritten, während der Auslösewert für die Lärmsanierung noch unterschritten wird. (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2). In den verkehrsberuhigten Innenbereichen liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend zwischen 49 und 56 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden sind niedrigere Beurteilungspegel zwischen etwa 36 und 44 dB zu verzeichnen. Der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge wird an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überschritten, an den straßenabgewandten jedoch nicht. Dabei wird der Auslösewert für die Lärmsanierung eingehalten.

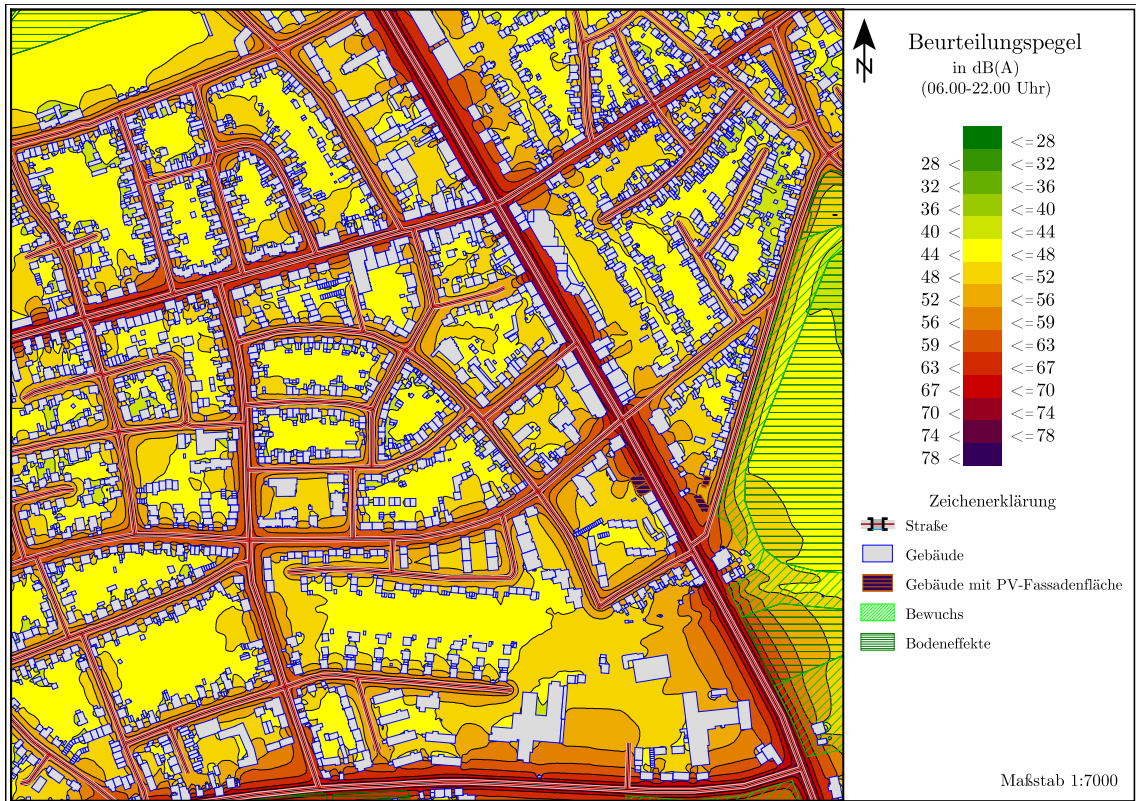


Abbildung 5.1: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)

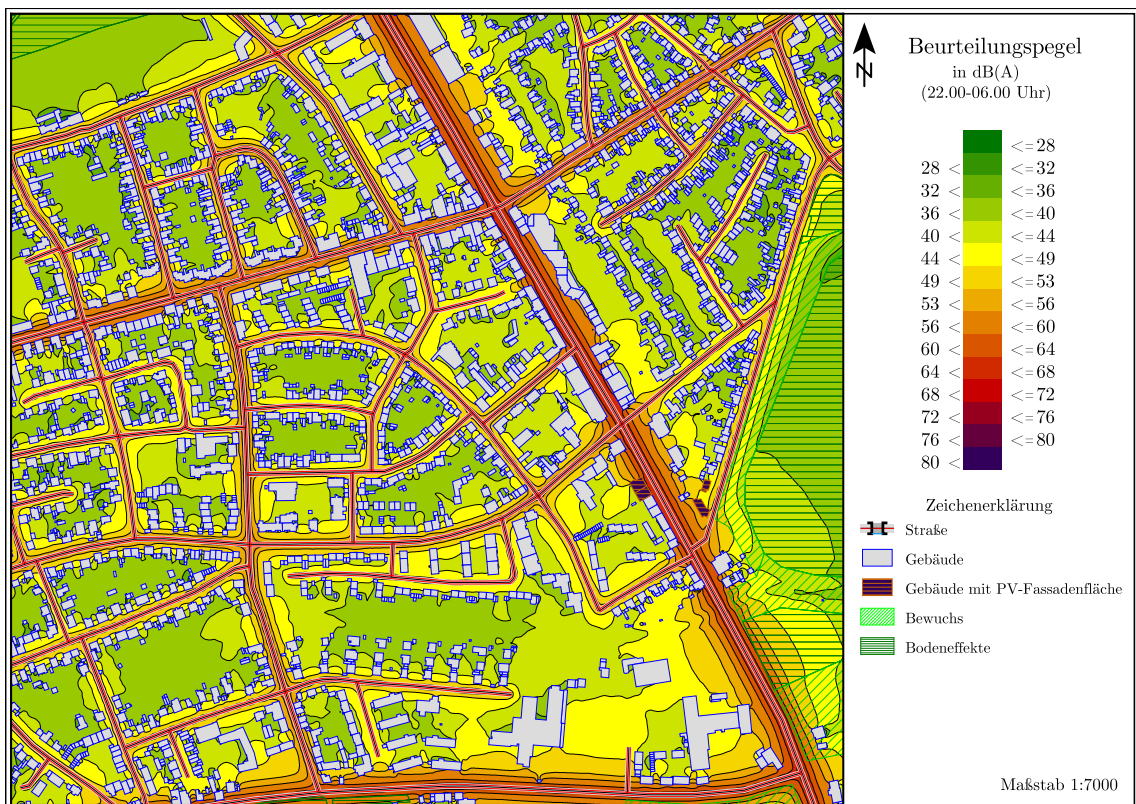


Abbildung 5.2: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)

Städtische Kreise

Als weiteres Beispiel ist ein Übersichtsplan der Ausgangssituation eines städtischen Kreises in einem allgemeinen Wohngebiet mit den zugehörigen Schallimmissionsplänen für den Tageszeitraum in Abbildung 5.3 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.4 dargestellt. Das Wohngebiet wird durch eine Bundesstraße, eine Kreisverbindungsstraße, eine Bundesautobahn sowie durch Gemeindestraßen erschlossen.

Die in Nordnordwest-Südsüdost- und Ostwestrichtung verlaufende Bundesstraße weist eine DTV von 2.000 bis 3.000 Kfz/24h bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h bzw. 70 km/h auf. Die in Ost-West-Richtung verlaufende Kreisverbindungsstraße, die die Bundesstraße kreuzt, wird von etwa 8.000 Kfz/24h mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h befahren. Die angrenzende Bundesautobahn verzeichnet eine DTV von ca. 30.000 Kfz/24h und ist ohne Geschwindigkeitsbeschränkung befahrbar. Die Bundesautobahn wird durch ca. 6 m hohen Lärmschutzwände vom allgemeinen Wohngebiet abgeschirmt. Die Höhe der Bebauung reicht von eingeschossigen Gebäuden bis zu mehrgeschossigen Gebäuden mit einer Höhe von bis zu 28,00 m.

Die Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum zeigen ähnliche Straßenverkehrslärmbelastungen wie die Situation in einer kreisfreien Großstadt. Laut Schallimmissionsplan für den Tageszeitraum (vgl. Abbildung 5.3) erreicht der Beurteilungspegel entlang der Bundesautobahn einen Wert von über 80 dB, wobei die Lärmbelastung in allgemeinen Wohngebieten durch die vorhandenen Lärmschutzwände abgemildert wird. Entlang der Bundesstraße liegen die Beurteilungspegel der Lärmbelastung an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend zwischen 63 und 67 dB, an einzelnen Gebäudefassaden bis zu 67 und 70 dB. Vergleichbare Werte finden sich entlang der Kreisverbindungsstraße. Diese Beurteilungspegel überschreiten den Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge, liegen jedoch noch unterhalb des Auslösewerts für die Lärmsanierung (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2). In den verkehrsberuhigten Innenbereichen entlang der Gemeindestraßen liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend zwischen 56 und 63 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden liegen die Beurteilungspegel darunter, zwischen 48 und 52 dB, teilweise auch zwischen 44 und 48 dB. Diese Beurteilungspegel liegen unterhalb des Immissionsgrenzwerts der Lärmvorsorge sowie des Auslösewerts für die Lärmsanierung.

Der Schallimmissionsplan für den Nachtzeitraum (vgl. Abbildung 5.4) weist entlang der Bundesautobahn Beurteilungspegel von 76 bis 80 dB auf, gegen die die angrenzenden allgemeinen Wohngebiete durch Lärmschutzwände abgeschirmt werden. An den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Bundesstraße liegen die Beurteilungspegel zwischen 53 und 60 dB, an einigen Gebäudefassaden auch über 60 dB. Entlang der Kreisverbindungsstraße sind die Gebäudefassaden überwiegend von Lärmbelastungen zwischen 60 und 64 dB betroffen. Entlang der Bundesstraße sowie der Kreisverbindungsstraße wird der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge überschritten. Der Auslösewert für die Lärmsanierung wird dabei entlang der Kreisverbindungsstraße überschritten, entlang der Bundesstraße teilweise (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2). In den verkehrsberuhigten Innenbereichen ist die Nachtruhe an den straßenzugewandten Gebäudefassaden mit Beurteilungspegeln zwischen 53 und 60 dB überwiegend beeinträchtigt. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden liegen die Pegel zwischen ca. 32 und 49 dB. Während die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden den Immissionsgrenzwert für die Lärmvorsorge überschreiten, liegen sie noch unterhalb des Auslösewertes für die Lärmsanierung. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden werden sowohl der Vorsorge- als auch der Sanierungswert eingehalten.

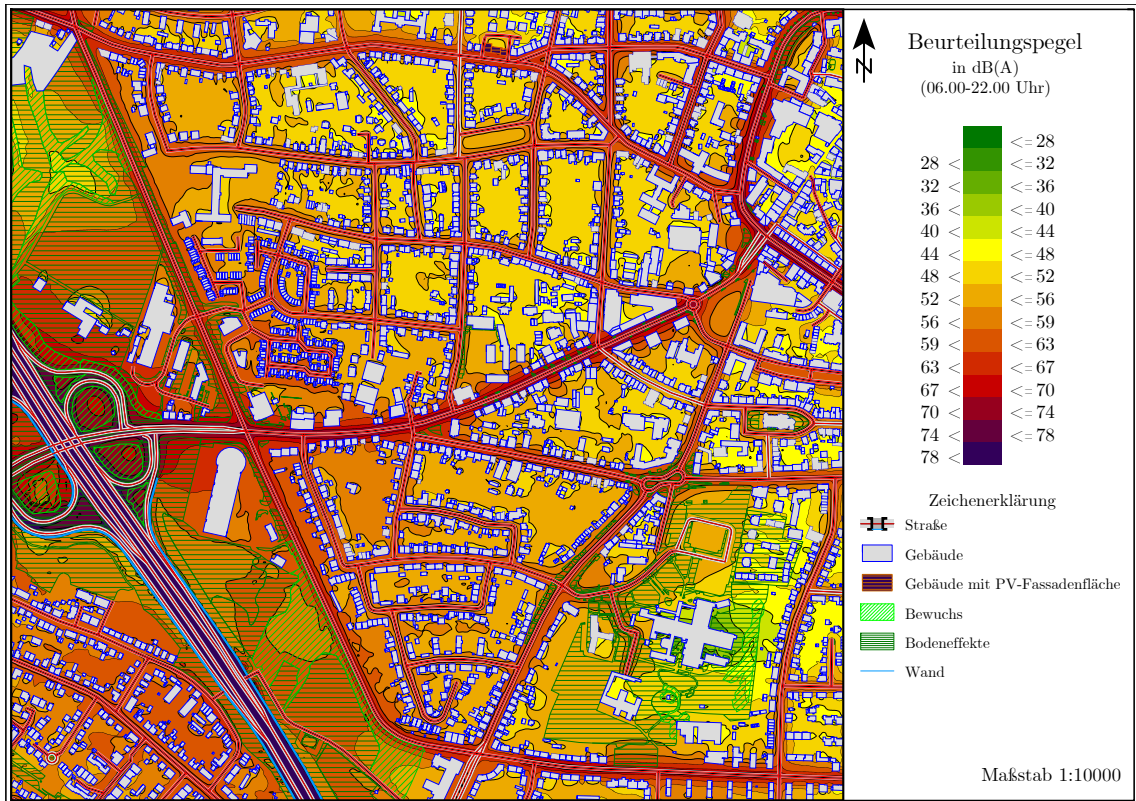


Abbildung 5.3: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines städtischen Kreises (Tageszeitraum)

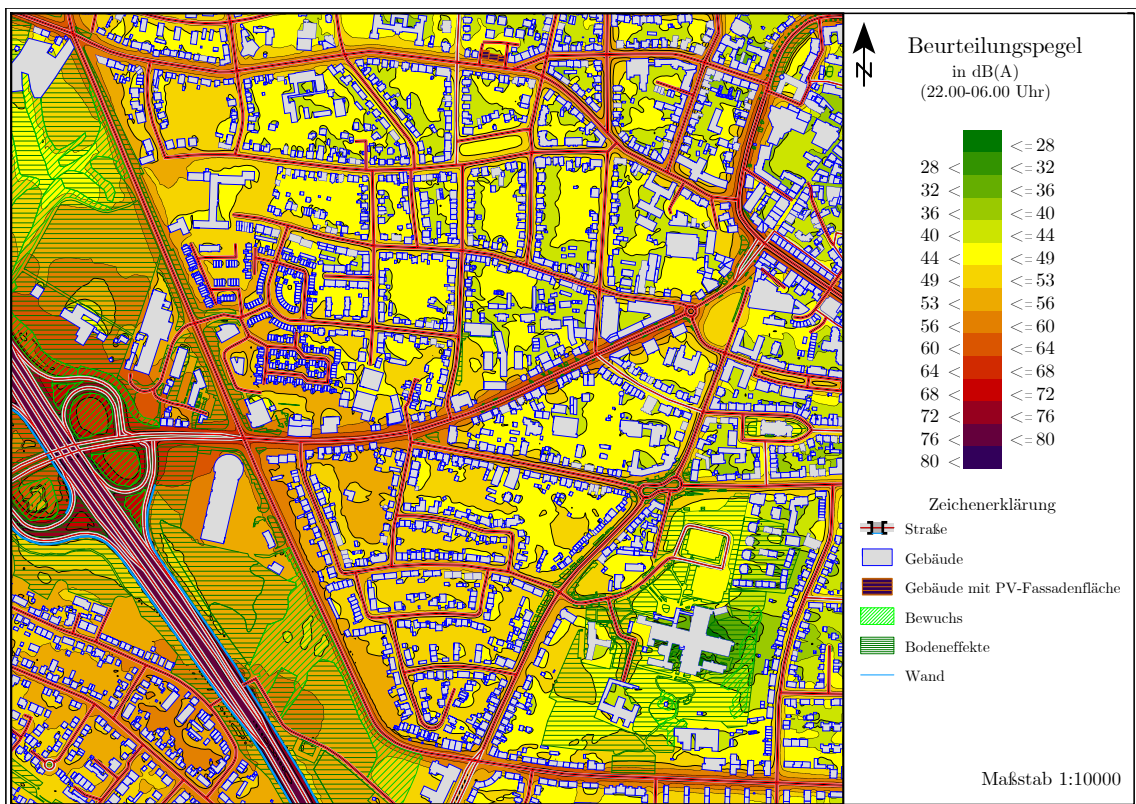


Abbildung 5.4: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines städtischen Kreises (Nachtzeitraum)

Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen

Als Beispiel ist ein Übersichtsplan der Ausgangssituation eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen in einem allgemeinen Wohngebiet mit den zugehörigen Schallimmissionsplänen für den Tageszeitraum in Abbildung 5.5 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.6 dargestellt. Das allgemeine Wohngebiet wird über Gemeindestraßen und Gemeindeverbindungsstraßen erschlossen.

Die in West-Ost-Richtung verlaufende Gemeindeverbindungsstraße (unten im Planausschnitt) verzeichnet eine DTV von rund 2.000 Kfz/24h bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h bzw. 50 km/h. Die in Nord-Süd-Richtung verlaufende Gemeindeverbindungsstraße (rechts im Planausschnitt) weist eine DTV von etwa 2.000 bis 3.000 Kfz/24h auf und ist mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h bzw. 70 km/h befahrbar. Diese wird von einer stark befahrenen, in West-Ost-Richtung verlaufenden Gemeindestraße (im mittleren Planausschnitt) mit einer DTV von rund 3.000 Kfz/24 h gekreuzt. Die Gemeindestraßen werden überwiegend mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h befahren, wobei in den verkehrsberuhigten Innenbereichen auch Spielstraßen bestehen. Die Bebauungshöhe ist insgesamt niedrig und reicht von eingeschossigen Gebäuden bis zu mehrgeschossigen Gebäuden mit einer Höhe von bis zu 8,40 m.

Der Schallimmissionsplan für den Tageszeitraum (vgl. Abbildung 5.5) zeigt an den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Gemeindeverbindungsstraßen überwiegend Beurteilungspegel zwischen 56 dB und 59 dB, stellenweise auch höhere Pegel bis 67 dB. Im Abschnitt mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h werden Beurteilungspegel bis zu 67 dB und 70 dB erreicht. Entlang der stark befahrenen Gemeindestraße liegen die Beurteilungspegel überwiegend zwischen 59 dB und 63 dB, stellenweise werden auch Pegel bis 67 dB erreicht. Entlang der Gemeindeverbindungsstraßen werden bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h und an einigen Gebäudefassaden der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge überschritten, liegen jedoch noch unter dem Auslösewert für die Lärmsanierung. Entlang der Gemeindestraße liegen die Beurteilungspegel überwiegend über dem Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge, aber auch noch unter dem Auslösewert für die Lärmsanierung. In den verkehrsberuhigten Innenbereichen entlang der Gemeindestraßen mit geringeren Verkehrsstärken liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend zwischen 56 dB und 59 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden werden dagegen niedrigere Pegel zwischen 44 dB und 48 dB erreicht. Diese Beurteilungspegel überschreiten weder den Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge noch den Auslösewert für die Lärmsanierung.

Der Schallimmissionsplan für den Nachtzeitraum (vgl. Abbildung 5.6) weist insgesamt eine geringere Lärmbelastung auf als im Tageszeitraum. Jedoch treten an den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Gemeindeverbindungsstraßen und der stark befahrenen Gemeindestraße überwiegend Beurteilungspegel zwischen 56 dB und 60 dB. Diese Beurteilungspegel überschreiten den Immissionsgrenzwert für die Lärmvorsorge, liegen aber noch unterhalb des Auslösewertes für die Lärmsanierung für den Nachtzeitraum. Im Abschnitt mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h werden Beurteilungspegel von bis zu 64 dB erreicht, wobei beide Werte überschritten werden. In den verkehrsberuhigten Innenbereichen entlang der Gemeindestraßen mit geringeren Verkehrsstärken liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend zwischen 49 dB und 53 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden werden dagegen geringere Pegel zwischen 36 dB und 44 dB, stellenweise auch zwischen 32 dB und 36 dB erreicht. Die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überschreiten den Immissionsgrenzwert der Lärmsanierung, liegen aber noch unterhalb des Auslösewertes der Lärmsanierung. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden werden beide Werte nicht überschritten (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2).

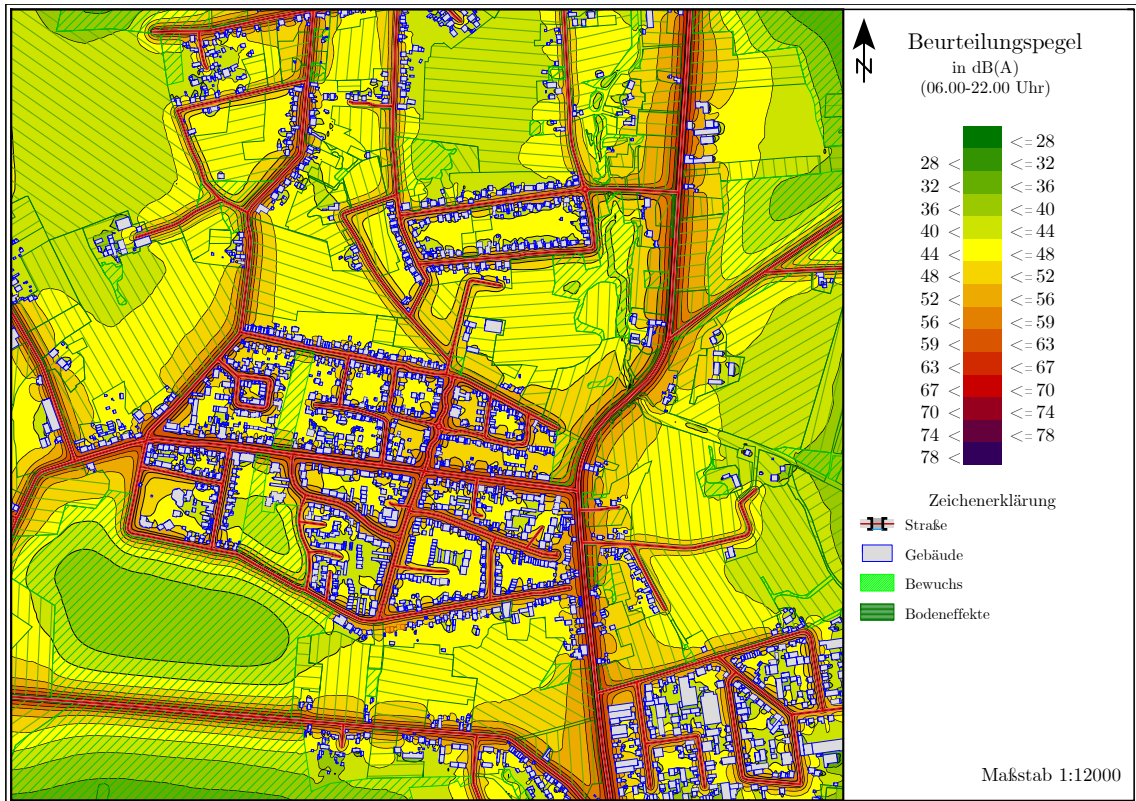


Abbildung 5.5: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen (Tageszeitraum)

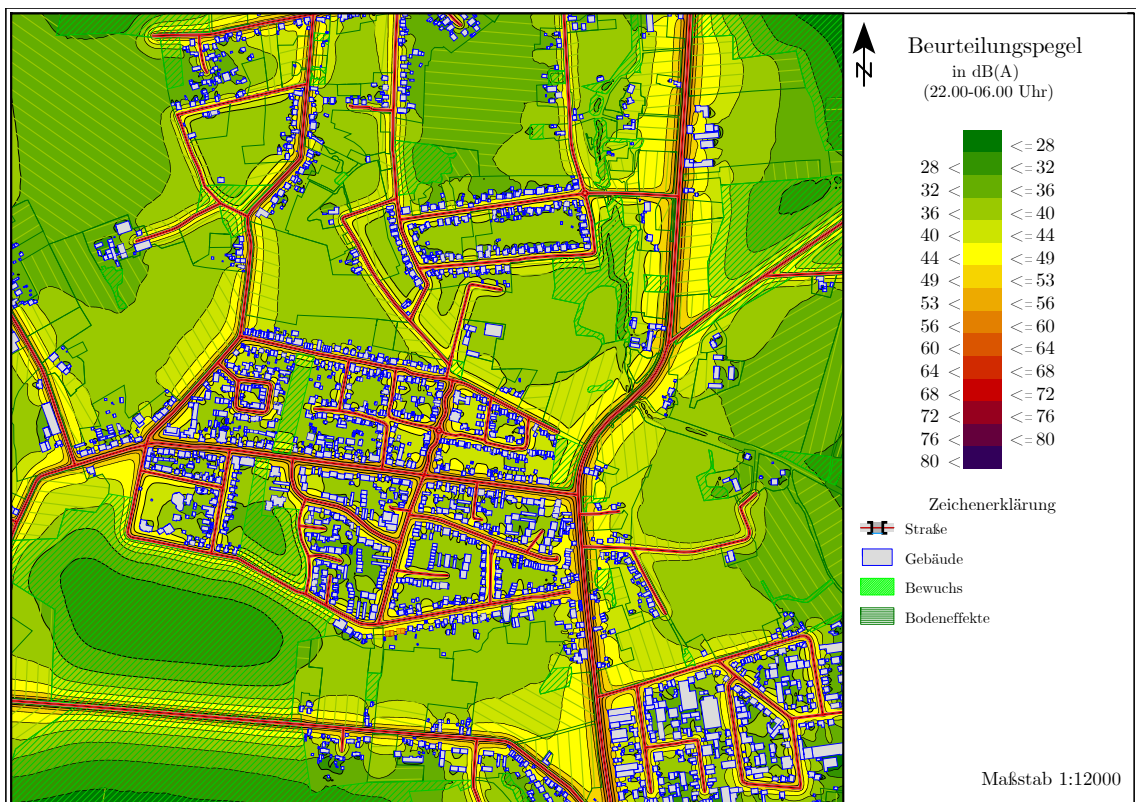


Abbildung 5.6: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen (Nachtzeitraum)

Dünn besiedelte ländliche Kreise

Als Beispiel für allgemeine Wohngebiete in dünn besiedelten ländlichen Kreisen mit den zugehörigen Schallimmissionsplänen zeigt Abbildung 5.7 eine Übersicht über den Tageszeitraum und Abbildung 5.8 über den Nachtzeitraum. Die Wohngebiete werden über Gemeindestraßen und Gemeindeverbindungsstraßen erschlossen. Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf den in Nord-Süd- und West-Ost-Richtung verlaufenden Gemeindeverbindungsstraßen beträgt etwa 800 Kfz/24h. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf den Gemeindeverbindungsstraßen liegt bei 30 km/h bzw. 50 km/h und auf den Gemeindestraßen bei 30 km/h. Die Bebauung besteht überwiegend aus ein- bis zweigeschossigen Gebäuden.

Die Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum zeigen insgesamt eine geringere Lärmbelastung durch Straßenverkehr. Im Tageszeitraum (vgl. Abbildung 5.7) werden an den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Gemeindeverbindungsstraße Beurteilungspegel von bis zu 56 dB bzw. 59 dB erreicht. An einzelnen Gebäudefassaden bis zu 63 dB, wobei nur wenige Fassaden von diesem Pegel betroffen sind. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden liegen die Pegel dagegen zwischen 40 dB und 48 dB. Entlang der Gemeindestraßen treten an den straßenzugewandten Gebäudefassaden überwiegend Beurteilungspegel zwischen 48 dB und 52 dB auf, stellenweise auch niedrigere Pegel zwischen 36 dB und 44 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden liegen die Beurteilungspegel noch niedriger, überwiegend zwischen 32 dB und 36 dB.

Im Nachtzeitraum (vgl. Abbildung 5.8) zeigt sich, dass an den straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Gemeindeverbindungsstraße Beurteilungspegel zwischen 49 dB und 53 dB erreicht werden. Entlang der Gemeindestraßen liegen die Beurteilungspegel an den straßenzugewandten Gebäudefassaden höchstens zwischen 44 dB und 49 dB. An den straßenabgewandten Gebäudefassaden werden dagegen Beurteilungspegel von höchstens 36 dB erreicht.

Die Beurteilungspegel liegen insgesamt sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum größtenteils unter dem Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge sowie unter dem Auslösewert für die Lärmsanierung. Lediglich an einzelnen straßenzugewandten Gebäudefassaden entlang der Gemeindeverbindungsstraße wird der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge überschritten.

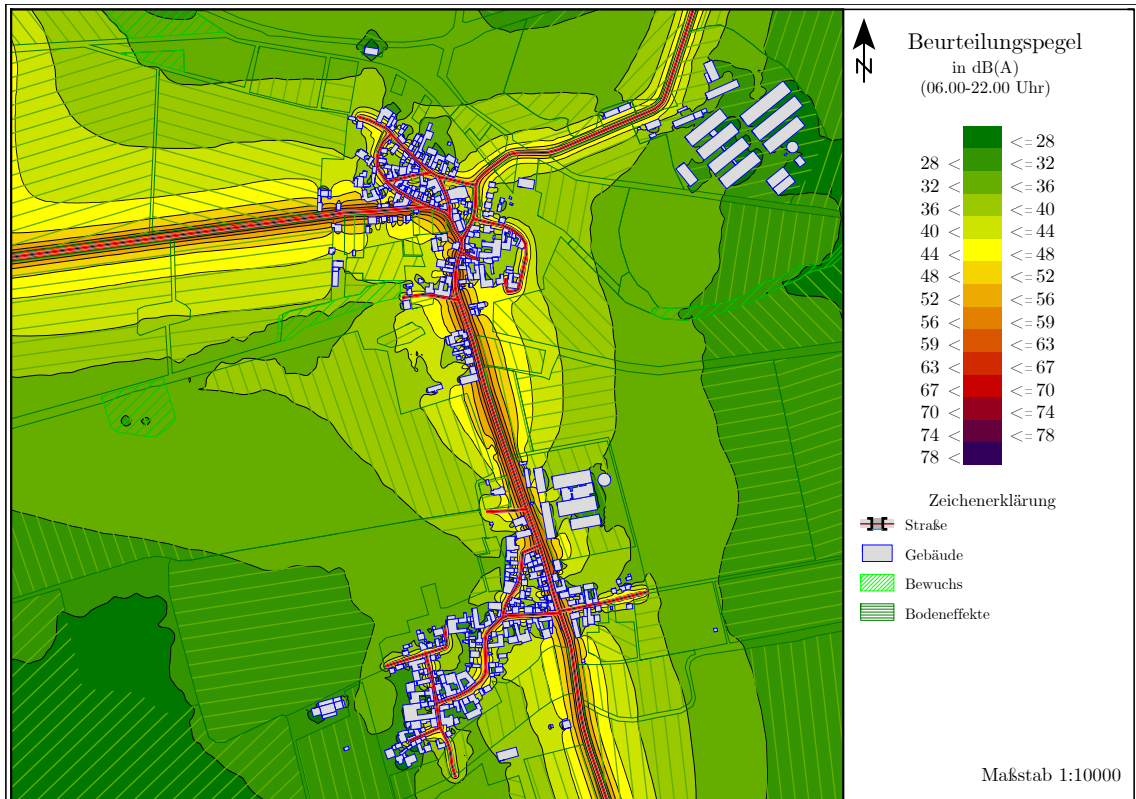


Abbildung 5.7: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines dünn besiedelten ländlichen Kreises (Tageszeitraum)

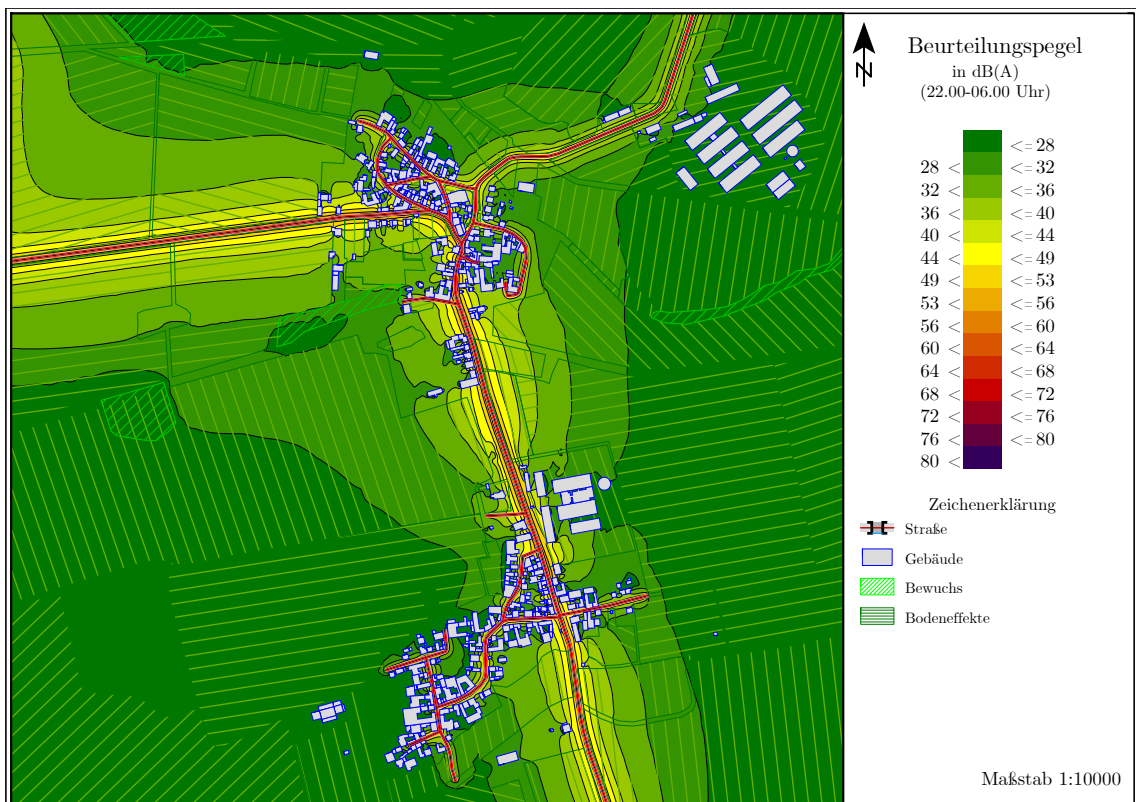


Abbildung 5.8: Beispiel zur aktuellen Planungssituation: Schallimmissionsplan eines dünn besiedelten ländlichen Kreises (Nachtzeitraum)

5.2 Prognosemodelle für das Referenz- und Stabilitätsszenario 2050

Die Prognosemodelle für das Referenz- und das Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 werden auf der Grundlage der aktuellen Planungssituation simuliert, wobei die quantifizierten Prognose-daten aus Kapitel 4 überführt werden.

Zu jedem Prognosemodell werden die zugehörigen Schallimmissionspläne simuliert. Aufgrund der unsicheren zukünftigen Entwicklung erfolgt jedoch keine Beurteilung nach den aktuellen Vorschriften. Stattdessen werden die Pegeldifferenzen zwischen der aktuellen Planungssituation und den zukünftigen Plänen dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Lärminderungseffekte sowie der veränderten Schallausbreitungsbedingungen erfolgt eine qualitative Bewertung anhand einer festgelegten Skala.

Zunächst werden am Beispiel der Ausgangssituation einer kreisfreien Großstadt die jeweiligen Entwicklungen im Referenz- und Stabilitätsszenario bis zum Jahr 2050 einbezogen, um die Auswirkungen auf den Straßenverkehrslärm im Einzelnen zu untersuchen. Davon abweichend wird am Beispiel der Ausgangssituation eines städtischen Kreises die Einführung eines Tempolimits auf Bundesautobahnen untersucht. Zu jeder Untersuchung werden Schallimmissionsprognosen berechnet, die sowohl für den Tages- als auch für den Nachtzeitraum mit den entsprechenden Schallimmissionsplänen der Ausgangssituation verglichen werden.

Zu beachten ist, dass die prognostizierten Entwicklungen bis zum Jahr 2050 nicht unabhängig voneinander zu betrachten sind, sondern in Wechselwirkung zueinander stehen. Beispielsweise führt eine zunehmende Bevölkerungsdichte in städtischen Gebieten zu einer höheren Verkehrsbelastung, was wiederum mit einer veränderten Inanspruchnahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen einhergeht (vgl. Kapitel 2.2).

Entwicklung der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050:

In Abhängigkeit von der Straßenart und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) der Fahrstreifen in der Ausgangssituation werden die prognostizierten Anstiege der Verkehrsstärken für die Fahrzeuggruppen Pkw, Lkw-1 und Lkw-2 jeweils für den Tages- und Nachtzeitraum sowohl für das Referenzszenario als auch für das Stabilitätsszenario gemäß Kapitel 4.1.4 berechnet.

Aufgrund des zunehmenden elektrifizierten Fahrzeugbestandes werden zusätzlich für zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 20 km/h bis 50 km/h Korrekturfaktoren der längenbezogenen Schallleistungspegeldifferenz nach Tabelle 4.38 (vgl. Kapitel 4.2) angewendet.

Für den Zeithorizont 2050 sind die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf den Straßenverkehrslärm im Referenz- und Stabilitätsszenario im Vergleich mit den Schallimmissionsplänen der Ausgangssituation einer kreisfreien Großstadt für den Tages- und Nachtzeitraum in den Abbildungen 5.9 bis 5.12 dargestellt.

Im Referenzszenario nimmt die DTV auf Gemeindestraßen um 10,37 % zu. Im Tages- und Nachtzeitraum nimmt der Lkw-1-Anteil um 78 % und der Lkw-2-Anteil um 56 % zu, während der Pkw-Anteil um 6 % steigt (vgl. Tabelle 4.22). Auf Bundesstraßen steigt die DTV um 12,62 %. Der Lkw-1-Anteil steigt um ca. 75 % und der Lkw-2-Anteil um ca. 61 %. Der Pkw-Anteil nimmt dabei um 6 % zu (vgl. Tabellen 4.28 und 4.29).

Aufgrund dieser erhöhten Verkehrsbelastung, insbesondere durch den Lkw-1- und Lkw-2-Anteil, kommt es zu einer leichten Erhöhung der Beurteilungspegel entlang der Gemeindestraßen und der Bundesstraße um 0,5 dB bis 1,0 dB. Im Nachtzeitraum erhöht sich der Pegel entlang der Bundesstraße zudem um bis zu 1,5 dB. Durch die geringeren Vorbeifahrpegel elektrifizierter Fahrzeuge wird dieser Pegelanstieg gedämpft, sodass an Gemeindestraßen mit zulässigen Geschwindigkeiten von 30 km/h keine Pegelunterschiede zu erwarten sind (vgl. Abbildungen 5.9 und 5.10).

Im Stabilitätsszenario hingegen sinkt die DTV auf Gemeindestraßen um 25,10 %. Dabei steigt der Lkw-1-Anteil um 54 %, der Lkw-2-Anteil um 22 %, während der Pkw-Anteil um 30 % sinkt (vgl. Tabelle 4.23). Auf innerörtlichen Bundesstraßen sinkt die DTV um 22,62 %. Der Pkw-Anteil sinkt dabei um 30 %, während der Lkw-1-Anteil um 54 % und der Lkw-2-Anteil um ca. 26 % steigt (vgl.

Tabellen 4.32 und 4.33). Auf außerörtlichen Bundesstraßen sinkt die DTV dagegen nur um 0,07 %, wobei der Pkw-Anteil um 5 % abnimmt und der Lkw-1-Anteil um ca. 48 % und der Lkw-2-Anteil um ca. 34 % zunimmt (vgl. Tabellen 4.30 und 4.31).

Dadurch reduzieren sich die Schallimmissionen entlang der Gemeindestraßen sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum um 0,5 bis 1,0 dB. Wie im Referenzszenario führt zusätzlich der geringere Vorbeifahrpegel der elektrifizierten Fahrzeuge bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h zu einer Minderung von bis zu 1,5 dB. Entlang der Bundesstraße sind sowohl innerorts als auch außerorts aufgrund des hohen Anteils an Lkw-1 und Lkw-2 keine Pegelunterschiede zu erwarten, wobei der Pegel im Nachtzeitraum außerorts um 0,5 dB bis 1,0 dB erhöht wird. Zudem ist die Schallausbreitung im Nachtzeitraum aufgrund der um 4 % höheren Verkehrsstärke (M) größer als im Tageszeitraum (vgl. Abbildungen 5.11 und 5.12).

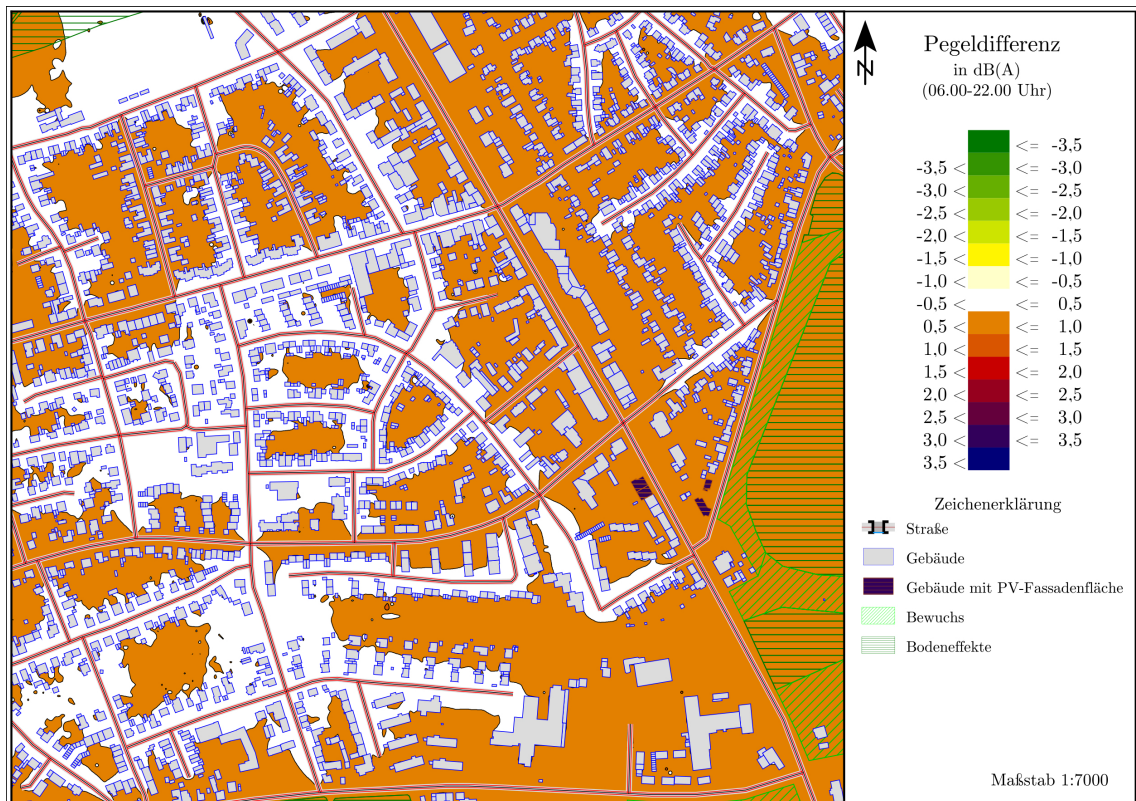


Abbildung 5.9: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)

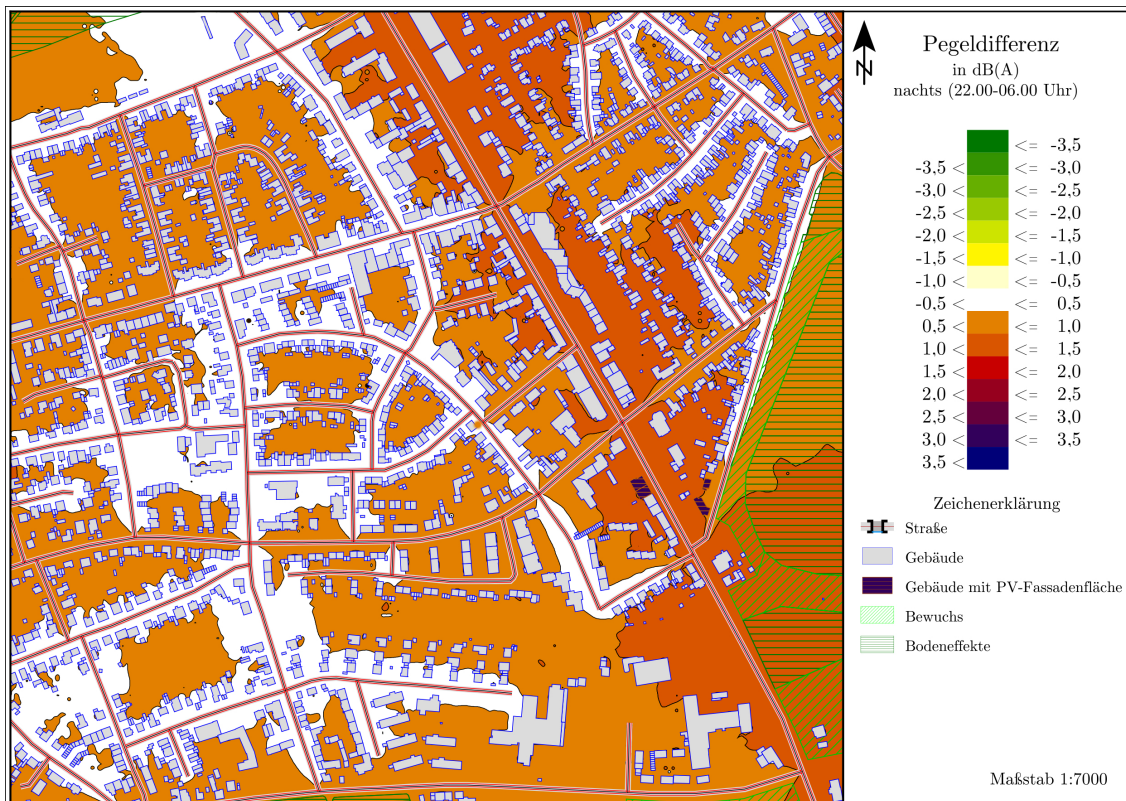


Abbildung 5.10: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)

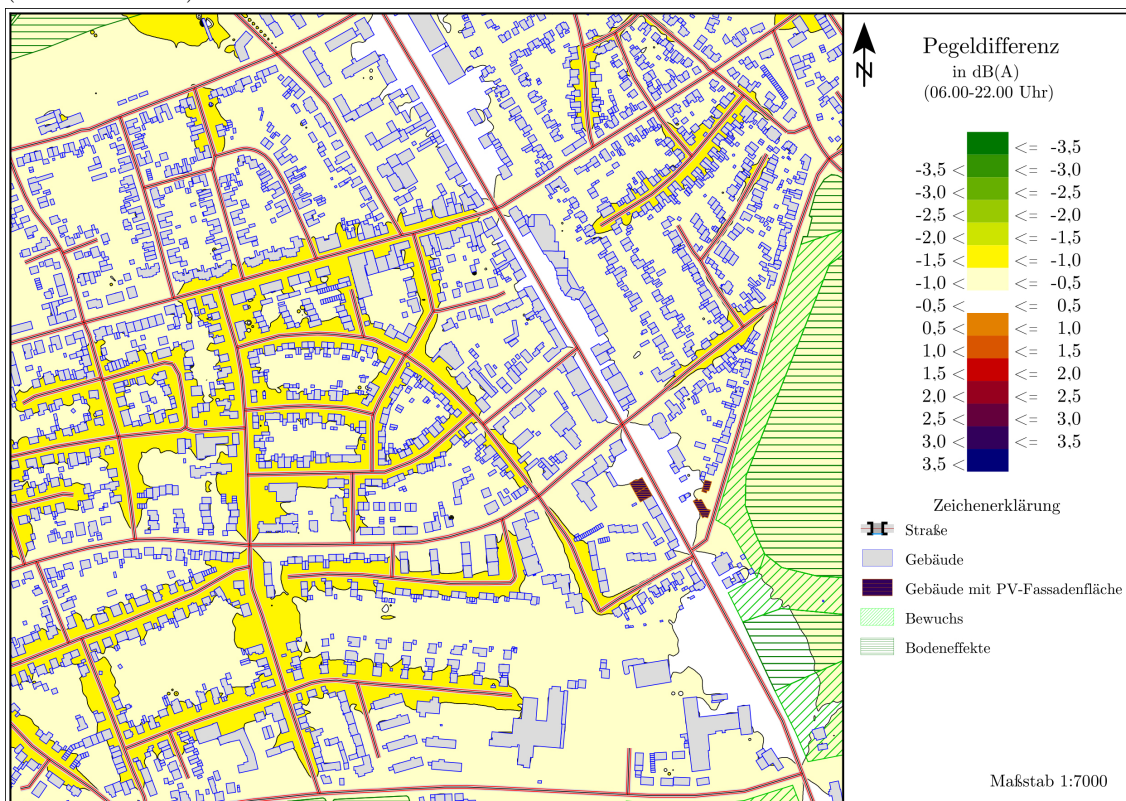


Abbildung 5.11: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Tageszeitraum)

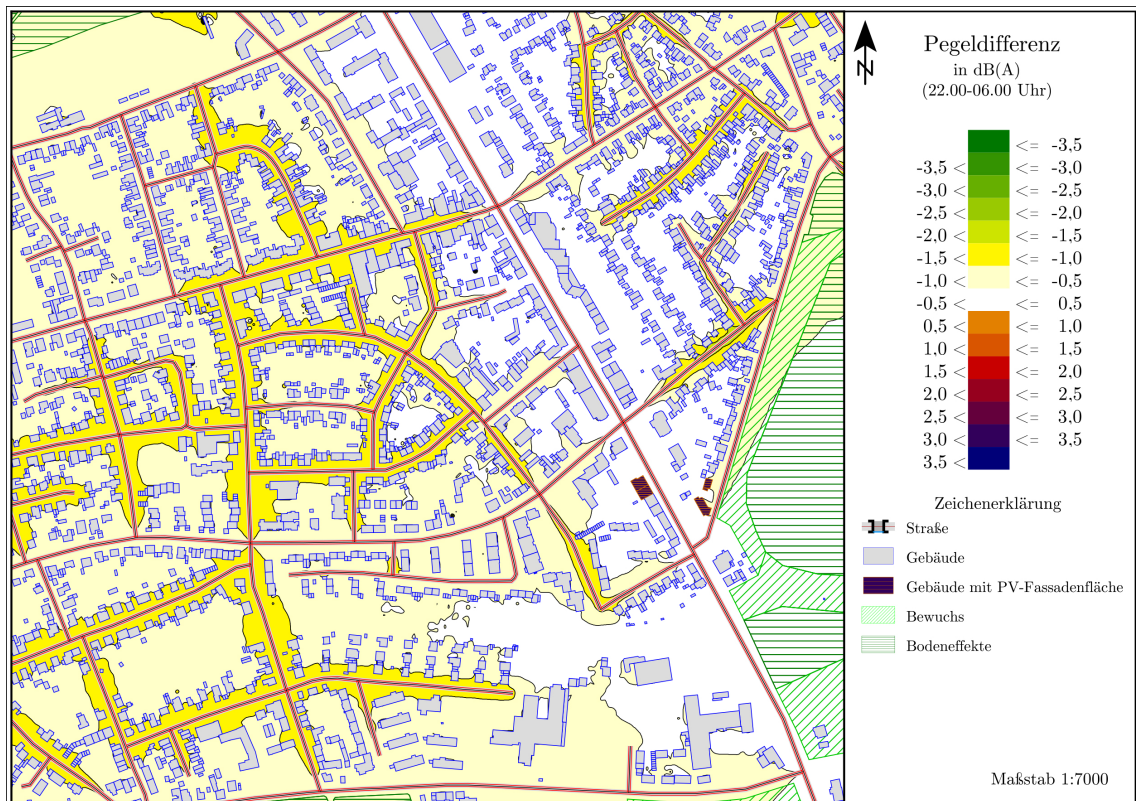


Abbildung 5.12: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (Nachtzeitraum)

Entwicklung der Bebauungsdichte

Zur Modellierung der Entwicklung der Bebauungsdichte im Referenz- und Stabilitätsszenario wird ausgehend von der aktuellen Planungssituation die Bodenfläche aller Gebäude einzeln und die Fläche für den Verkehr aufsummiert und der Anteil je siedlungsstrukturellem Kreistyp aus Tabelle 4.40 addiert. Die neu hinzukommenden Gebäude- und Verkehrsflächen werden, soweit möglich, nach den Vorgaben des Flächennutzungsplanes modelliert, wobei die Gebäudehöhen entsprechend der vorhandenen Bebauungstypologie der Umgebung vereinfacht dargestellt werden.

Für den Zeithorizont 2050 sind die Auswirkungen der Entwicklung der Bebauungsdichte auf den Straßenverkehrslärm im Referenz- und Stabilitätsszenario im Vergleich mit den Schallimmissionsplänen der Ausgangssituation einer kreisfreien Großstadt in den Abbildungen 5.13 bis 5.14 dargestellt. Da sich die Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum nicht unterscheiden, wird der 24-Stunden-Zeitraum betrachtet.

Sowohl im Referenzszenario als auch im Stabilitätsszenario ändern sich die Schallausbreitungsbedingungen. Da jedoch im Stabilitätsszenario brachliegende Siedlungsflächen einer neuen Nutzung zugeführt werden, um das Ziel der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme bis 2050 zu erreichen, verändern sich die Schallausbreitungsbedingungen im Vergleich zum Referenzszenario geringer. Die weitere Bebauung führt zu einer Abschirmung gegen den Verkehrslärm, indem die straßenabgewandten Seiten der neuen Bebauung stellenweise für eine Lärminderung sorgen. Die neuen Verkehrsflächen hingegen führen zu einer neuen Quelllinie.

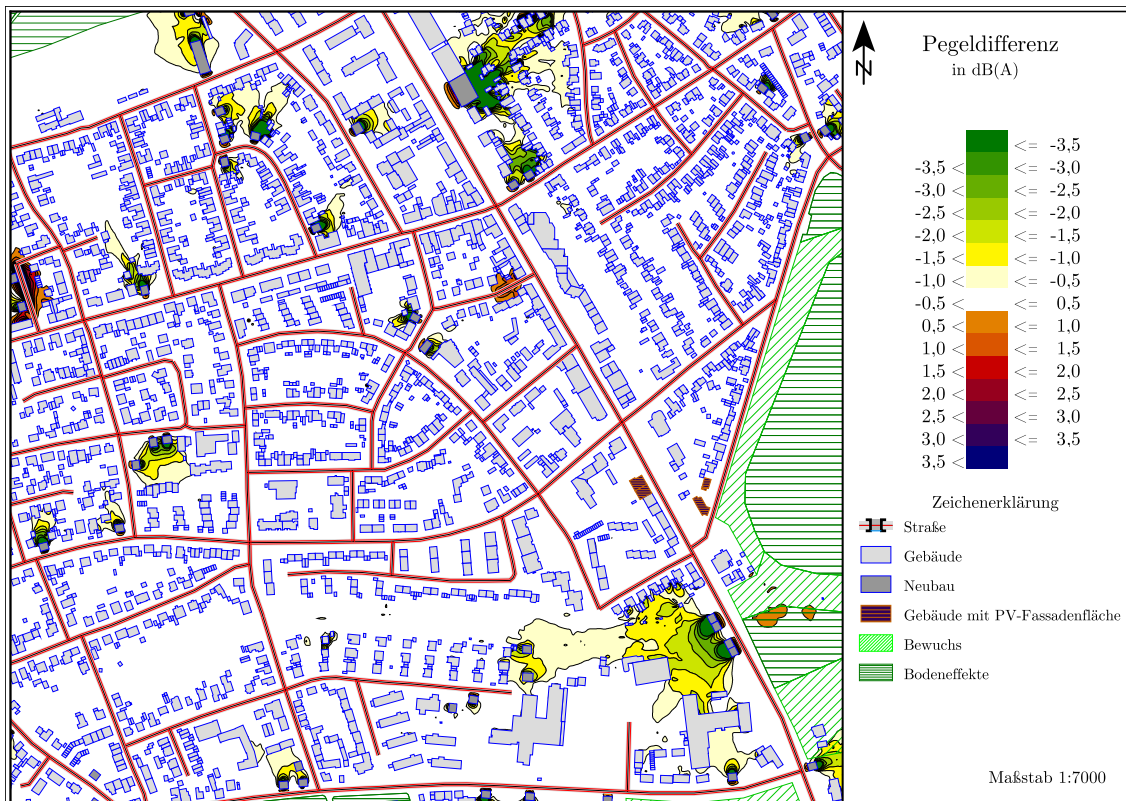


Abbildung 5.13: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklung der Bebauungsdichte im Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt

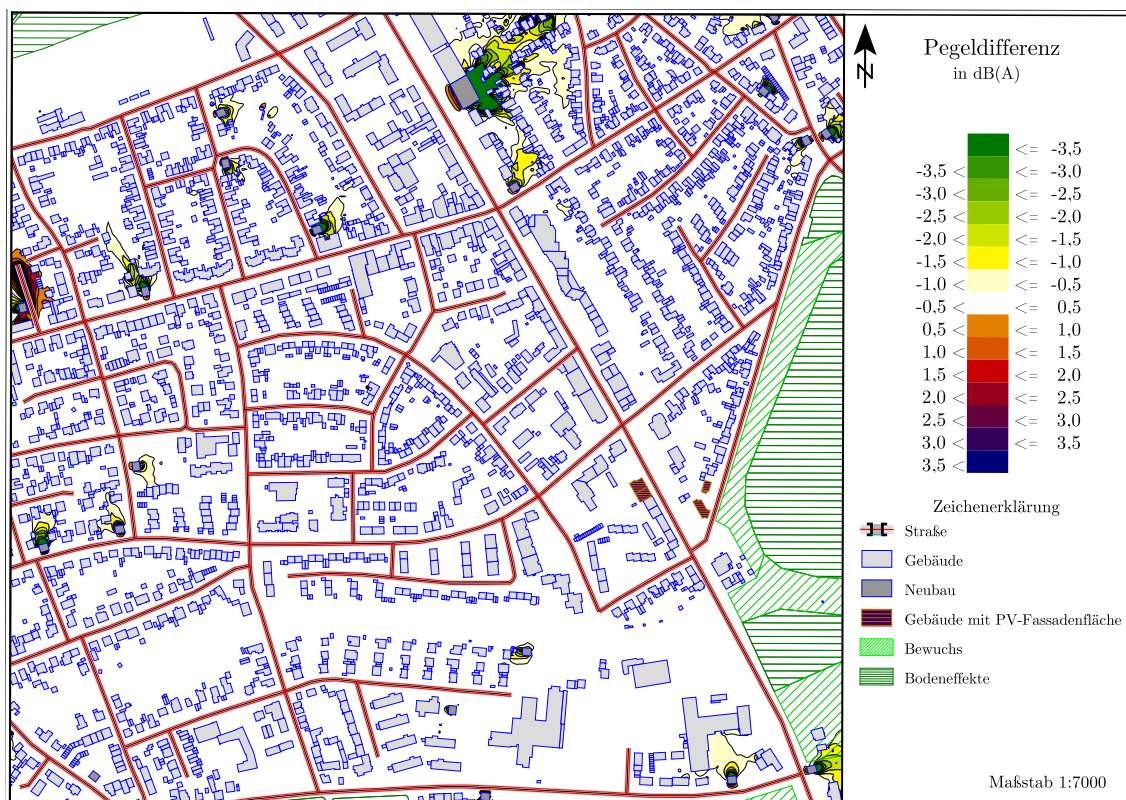


Abbildung 5.14: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklung der Bebauungsdichte im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt

Entwicklung der Gebäudefassaden mit Begrünung oder mit PV-Modulen

Um die Auswirkung der Entwicklung der Gebäudefassaden für den Zeithorizont 2050 zu untersuchen, wird zunächst der Gebäudebestand aus der Ausgangssituation ermittelt. Dementsprechend wird der prognostizierte Flächenanteil mit dem berechneten Reflexionsverlust für die Fassadenflächen von begrünten Gebäudefassaden gemäß Kapitel 4.5.1 und von Gebäuden mit PV-Modulen gemäß Kapitel 4.5.2 angesetzt: Unter der Annahme, dass sowohl im Referenzszenario als auch im Stabilitätsszenario eine identische Entwicklung zu verzeichnen ist (vgl. Kapitel 3.2.6), wird für die Gebäudeflächen mit Begrünung der prognostizierte Flächenanteil von 0,12 % mit einem Reflexionsverlust von 5,3 dB und für die Gebäudeflächen mit PV-Modulen der prognostizierte Flächenanteil von 7,9 % mit einem Reflexionsverlust von 0,5 dB angesetzt¹. Diese Prognosedaten werden auch auf den Neubau bis 2050 übertragen.

Für den Zeithorizont 2050 sind die Auswirkungen dieser Entwicklung der Gebäudeflächen auf den Straßenverkehrslärm im Vergleich mit dem Schallimmissionsplan der Ausgangssituation einer kreisfreien Großstadt in der Abbildung 5.15 dargestellt. Da sich die Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum nicht unterscheiden, wird der 24-Stunden-Zeitraum betrachtet.

Der Vergleich zeigt, dass die Entwicklung der Gebäudeflächen nahezu keinen Einfluss auf den Straßenverkehrslärm hat. Dies liegt vor allem daran, dass PV-Module auf Fassadenflächen annähernd den gleichen Reflexionsverlust wie Fassadenflächen haben und der Bestand an begrünten Gebäudeflächen bis zum Jahr 2050 noch sehr begrenzt bleibt. Eine genauere Betrachtung des Einflusses begrünter Gebäudeflächen im Maßstab 1:2.000 zeigt die Abbildung 5.16, in der dargestellt ist, dass diese Gebäudefassaden ein Lärminderungspotenzial (bei einem Reflexionsverlust von 5,3 dB) von bis zu 1,0 dB haben.

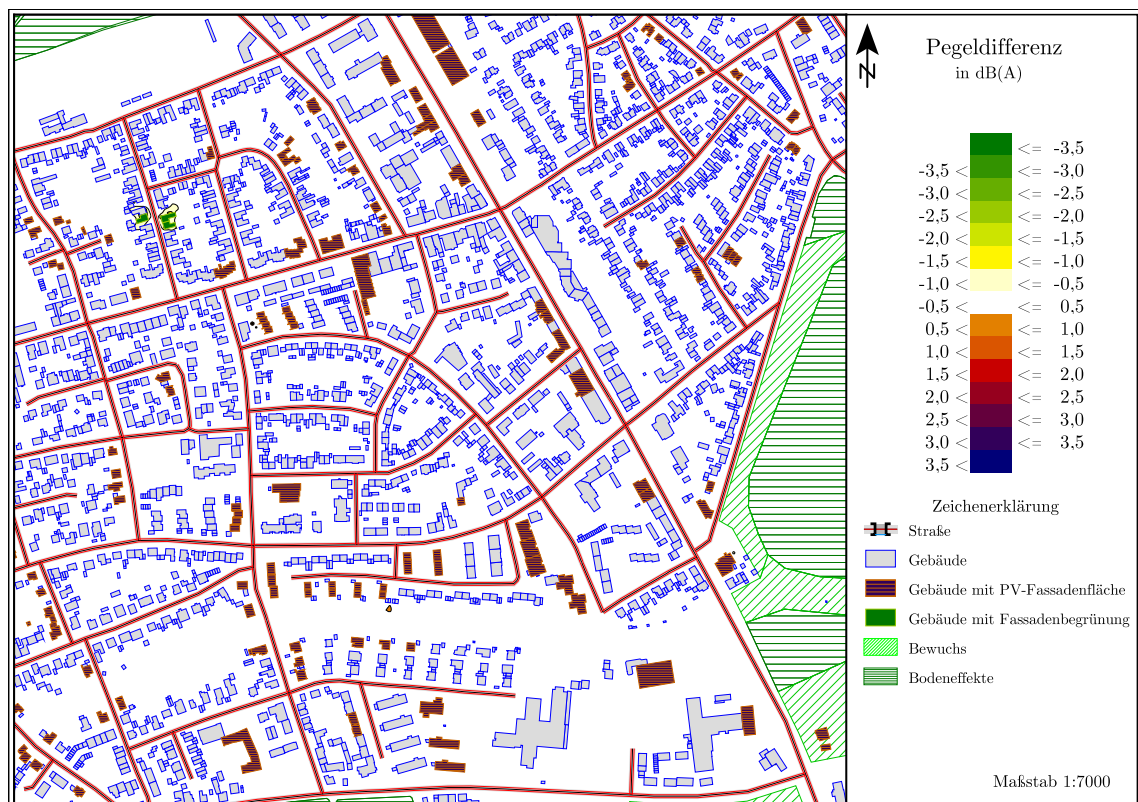


Abbildung 5.15: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Gebäudeflächen im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt

¹Bei der Zuweisung von Fassadenflächen mit PV-Modulen erfolgt keine detaillierte Prüfung der solaren Eignung einzelner Gebäudeseiten. Stattdessen werden sie entsprechend ihrer flächenmäßigen Entwicklung auf Grundlage der in Kapitel 4.5.2 ermittelten relevanten Flächenpotenziale sowie des angenommenen Reflexionsverlusts berücksichtigt. Dabei wird ausschließlich die mögliche Auswirkung auf den Straßenverkehrslärm untersucht. Darüber hinaus könnten PV-Module an Gebäudefassaden – ähnlich wie bei Lärmschutzwänden – durch eine gezielte Anordnung zur Schalllenkung und -senkung beitragen. Auch diese Auswirkungen werden nicht näher untersucht.

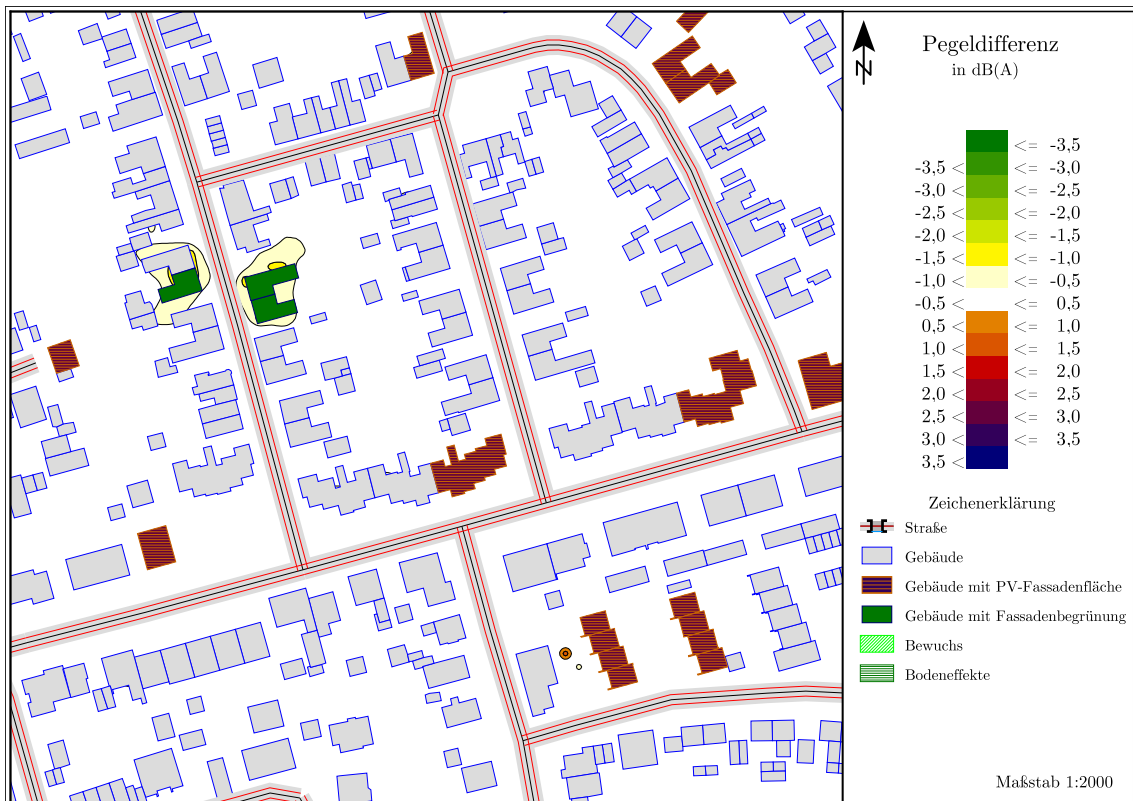


Abbildung 5.16: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Entwicklungen der Gebäudeflächen im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel einer kreisfreien Großstadt (vergrößerter Kartenausschnitt aus Abbildung 5.15)

Einführung eines Tempolimits auf Bundesautobahnen

Zur Untersuchung der Auswirkung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Bundesautobahnen wird die Ausgangssituation am Beispiel eines städtischen Kreises herangezogen. Basierend auf dem im Kapitel 4.3 ermittelten längenbezogenen Lärminderungspotenzial für das Referenz- und das Stabilitätsszenario wird ein Minderungsfaktor von 0,6 dB zur Anpassung des Beurteilungspegels auf Bundesautobahnen angesetzt (vgl. Tabelle 4.39).

Für den Zeithorizont 2050 sind die Auswirkungen der Einführung eines Tempolimits von 120 km/h auf Bundesautobahnen auf den Straßenverkehrslärm im Vergleich mit dem Schallimmissionsplan der Ausgangssituation eines städtischen Kreises in der Abbildung 5.17 dargestellt. Da sich die Schallimmissionspläne für den Tages- und Nachtzeitraum nicht unterscheiden, wird der 24-Stunden-Zeitraum betrachtet.

Der Vergleich zeigt eine Minderung der Beurteilungspegel entlang der Bundesautobahn von ca. 0,5 bis 1,0 dB. Diese Reduktion wird jedoch durch die vorhandenen Lärmschutzwände nur in geringem Umfang in das angrenzende Wohngebiet übertragen, wobei sich insbesondere für die an die Autobahn angrenzende Bebauung eine Pegeldifferenz ergibt. Entlang des Ausbreitungsweges ohne Lärmschutzwand in Richtung des allgemeinen Wohngebietes ist ebenfalls eine Pegelminderung zu verzeichnen, die jedoch durch Bewuchs und Bodeneffekte gedämpft wird.

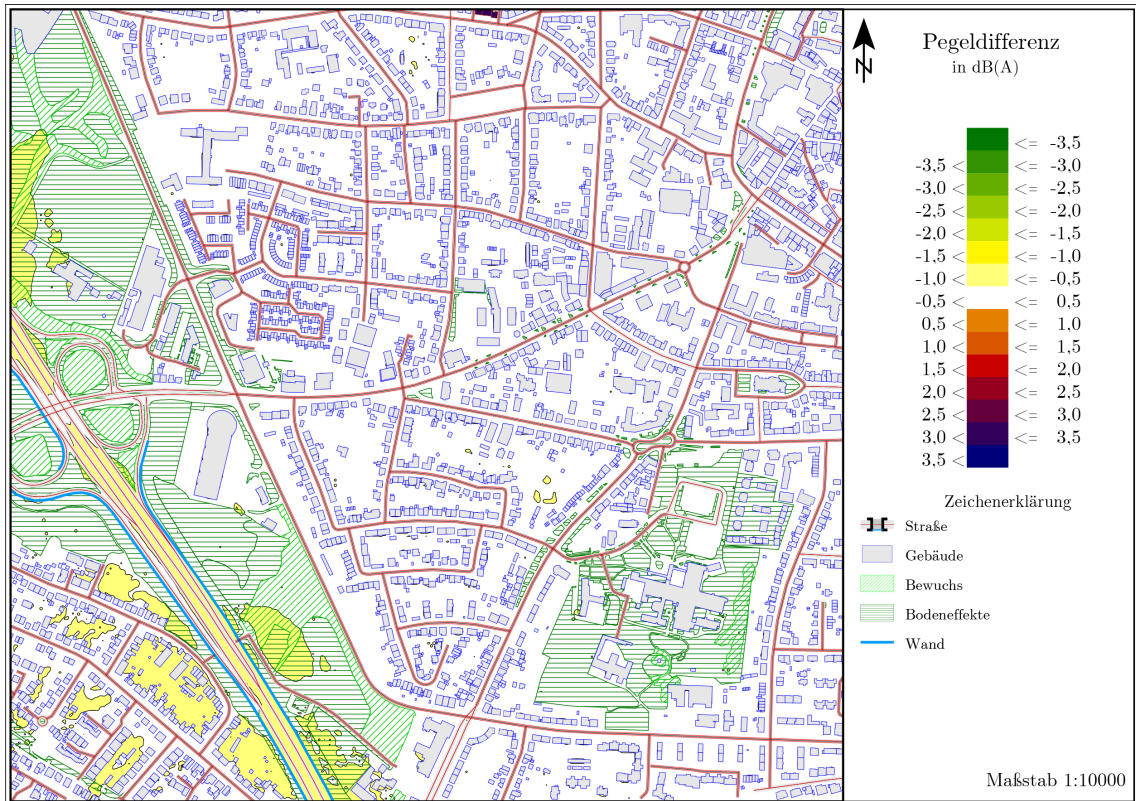


Abbildung 5.17: Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der Einführung eines Tempolimits von 120 km/h im Referenz- und im Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 am Beispiel eines städtischen Kreises

5.2.1 Kreisfreie Großstädte

Referenzszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel einer kreisfreien Großstadt für den Tageszeitraum in Abbildung 5.18 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.19 dargestellt.

Im Referenzszenario kommt es aufgrund der erhöhten Verkehrsbelastung zu einer Erhöhung der Beurteilungspegel. Entlang der Gemeindestraßen erhöht sich der Beurteilungspegel sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum um 0,5 dB bis 1,0 dB. Diese Pegelerhöhung wird durch die Zunahme des elektrifizierten Fahrzeugbestandes gedämpft, sodass für diese Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h keine Pegelunterschiede zu erwarten sind. Entlang der Bundesstraße erhöht sich der Beurteilungspegel im Tageszeitraum um 0,5 dB bis 1,0 dB und im Nachtzeitraum um 1,0 dB bis 1,5 dB (vgl. Abschnitt 5.2 „Entwicklung der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050“ und Kapitel 4.1.4).

Darüber hinaus verändert die Bebauungsdichte die Schallausbreitungsbedingungen: Neue Erschließungsstraßen führen zu zusätzlichen Quelllinien, die neue Bebauung trägt zur Abschirmung bei, sodass auf der straßenabgewandten Seite der neuen Bebauung teilweise Lärminderungen auftreten. Die veränderten Reflexionsverluste von Gebäudefassaden mit Begrünung oder PV-Modulen zeigen insgesamt keinen Einfluss auf den Beurteilungspegel, in Einzelfällen tragen begrünte Fassaden zu einer leichten Pegelminderung bei.

Stabilitätsszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel einer kreisfreien Großstadt für den Tageszeitraum in Abbildung 5.20 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.21 dargestellt.

Im Stabilitätsszenario hingegen führt die reduzierte Verkehrsbelastung zu einer Minderung der Beurteilungspegel. Entlang der Gemeindestraßen verringert sich der Beurteilungspegel sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum um 0,5 dB bis 1,0 dB. Diese Pegelminderung wird durch die Zunahme des elektrifizierten Fahrzeugbestandes auf Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h nochmals um bis zu 1,5 dB verstärkt. Entlang der Bundesstraße sind aufgrund des hohen Anteils an Lkw-1 und Lkw-2 keine Pegelunterschiede zu erwarten. Zudem ist die Schallausbreitung im Nachtzeitraum größer als im Tageszeitraum (vgl. Abschnitt 5.2 „Entwicklung der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050“ und Kapitel 4.1.4).

Wie im Referenzszenario entstehen durch weitere Erschließungsstraßen zusätzliche Quelllinien und die weitere Bebauung wirkt stellenweise abschirmend, jedoch in geringerem Umfang. Gebäudefassaden mit Begrünung oder mit PV-Modulen haben keinen Einfluss auf den Lärm.

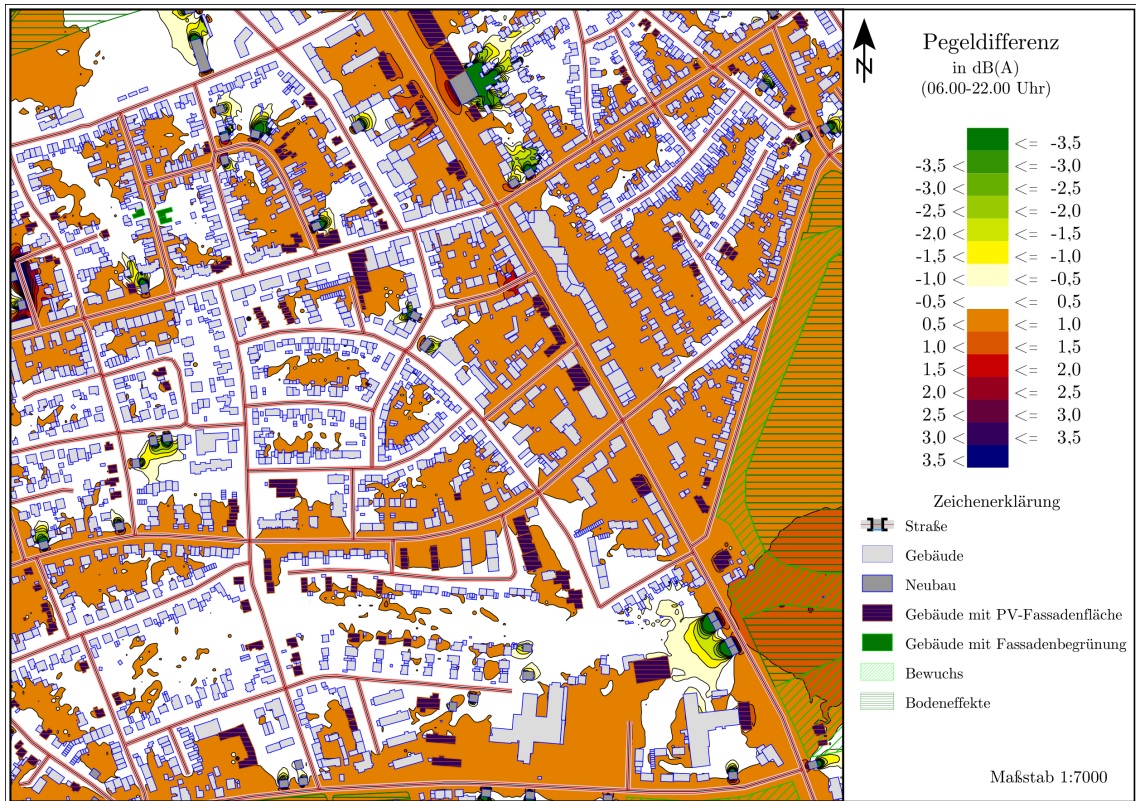


Abbildung 5.18: Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)

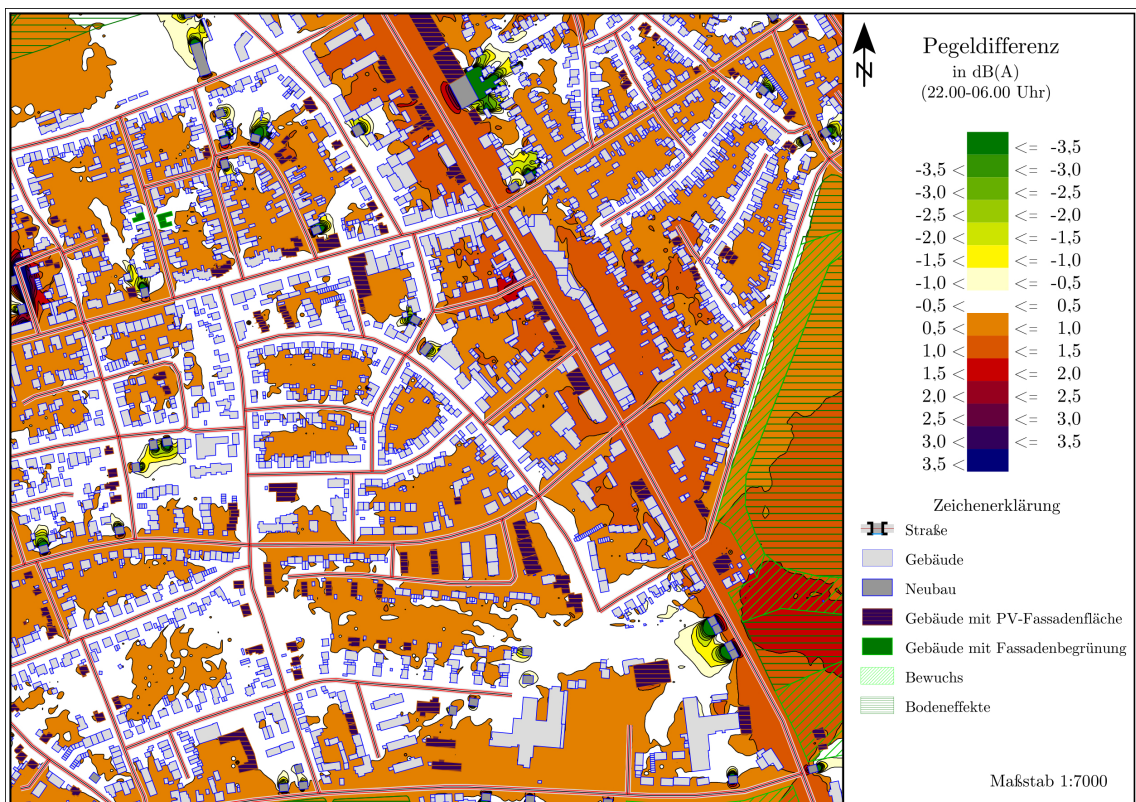


Abbildung 5.19: Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)

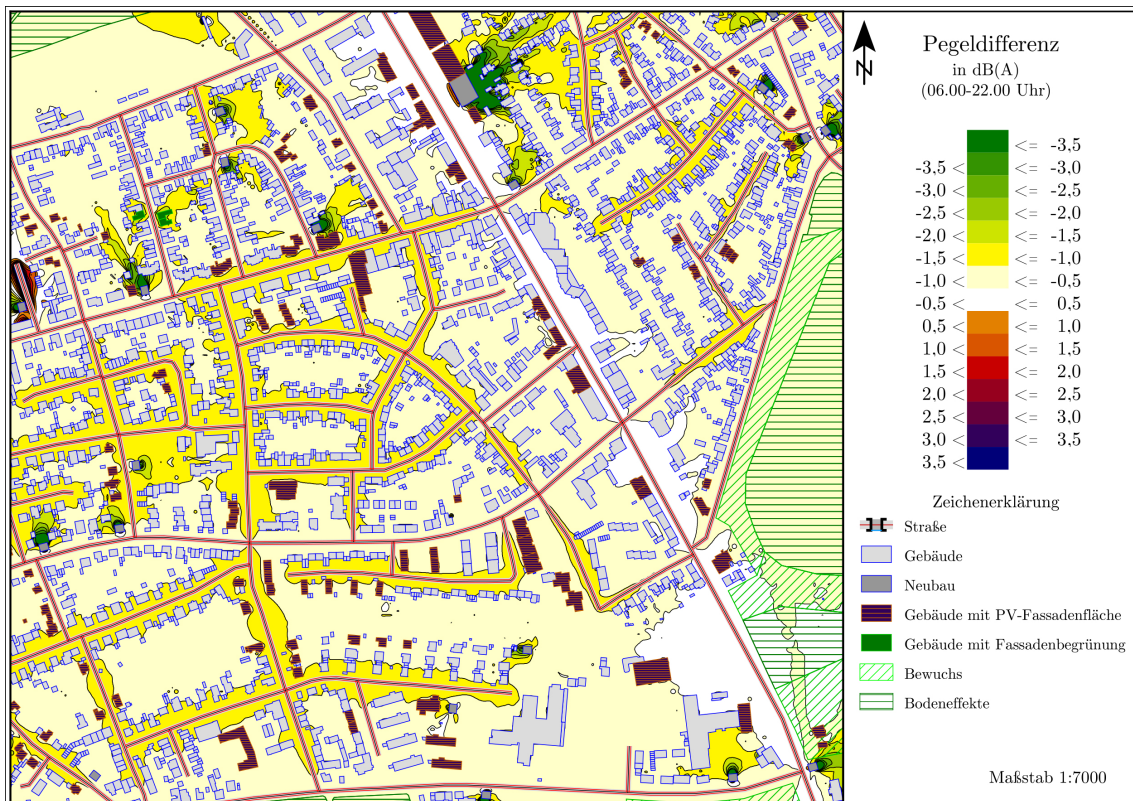


Abbildung 5.20: Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)

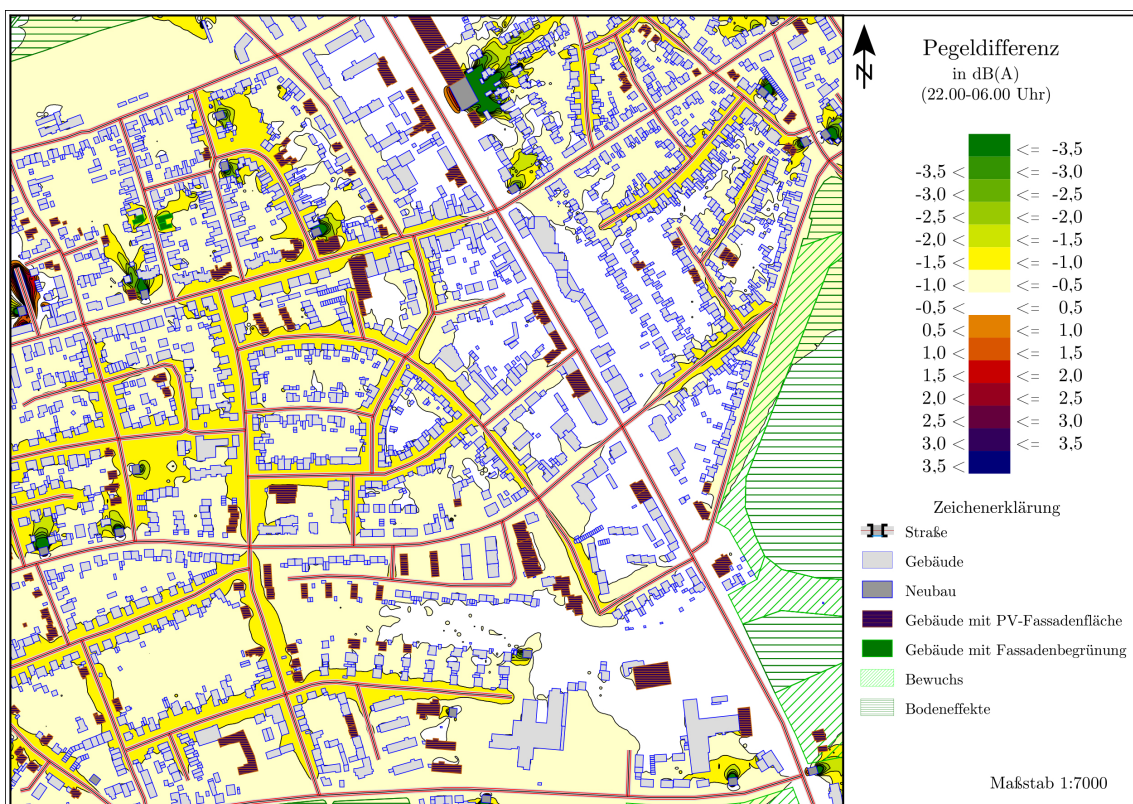


Abbildung 5.21: Vergleich der Schallimmissionspläne einer kreisfreien Großstadt mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)

5.2.2 Städtische Kreise

Referenzszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines städtischen Kreises für den Tageszeitraum in Abbildung 5.22 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.23 dargestellt.

Im Referenzszenario kommt es, wie in kreisfreien Großstädten, aufgrund der erhöhten Verkehrsbelastung zu einem Anstieg der Beurteilungspegel. Entlang der Gemeindestraßen erhöht sich der Beurteilungspegel sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum um 0,5 dB bis 1,0 dB. Diese Pegelerhöhung wird durch die Zunahme des elektrifizierten Fahrzeugbestandes gedämpft, sodass bis zu einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h keine Pegelunterschiede zu erwarten sind. Entlang der Bundesstraße erhöht sich der Beurteilungspegel im Tageszeitraum um 0,5 dB bis 1,0 dB, bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 70 km/h sogar um bis zu 1,5 dB. Im Nachtzeitraum hingegen erhöht sich der Pegel um weitere 0,5 dB, wobei die Schallausbreitung bei 70 km/h größer ist als im Tageszeitraum (vgl. Abschnitt 5.2 „Entwicklung der Verkehrsstärken mit zunehmendem elektrifizierten Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050“ und Kapitel 4.1.4).

Die DTV auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen nimmt um 11,10 % zu. Tagsüber nehmen die Lkw-1- und Lkw-2-Anteile um ca. 77 % zu, nachts um 59 % bzw. 55 %. Der Pkw-Anteil nimmt dabei um 6 % zu (vgl. Tabellen 4.16 und 4.17). Dies führt ebenfalls zu Pegelerhöhungen von 0,5 dB bis 1,0 dB.

Die DTV auf Autobahnen nimmt um 15,90 % zu. Während der Pkw-Anteil um 6 % steigt, nimmt der Lkw-1-Anteil tagsüber um 69 % und nachts um 73 % zu. Der Lkw-2-Anteil nimmt um etwa 63 % zu (vgl. Tabellen 4.24 und 4.25). Dies führt im Tageszeitraum zu einer Erhöhung des Beurteilungspegels um 0,5 bis 1,0 dB, obwohl sich der Pegel durch die Einführung eines Tempolimits um 0,6 dB reduziert. Im Nachtzeitraum führt die um 12 %-Punkte höhere stündliche Verkehrsstärke (M) im Vergleich zum Tageszeitraum zu einer zusätzlichen Erhöhung des Beurteilungspegels um 0,5 dB, wobei auch hier ein Tempolimit eingeführt wird. Anschlussstellen verursachen zusätzliche Pegelerhöhungen.

Auch hierbei verändert die Bebauungsdichte die Schallausbreitungsbedingungen, die neuen Erschließungsstraßen führen zu zusätzlichen Quelllinien und die neue Bebauung trägt zur Abschirmung bei. Die veränderten Reflexionsverluste von Gebädefassaden mit Begrünung oder PV-Modulen zeigen insgesamt keinen Einfluss auf die Beurteilungspegel.

Stabilitätsszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines städtischen Kreises für den Tageszeitraum in Abbildung 5.24 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.25 dargestellt.

Im Stabilitätsszenario hingegen führt die reduzierte Verkehrsbelastung, wie in kreisfreien Großstädten, zu einer Minderung der Beurteilungspegel. Entlang der Gemeindestraßen verringert sich der Pegel sowohl tagsüber als auch nachts um 0,5 bis 1,0 dB. Diese Pegelminderung wird auf Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h nochmals um bis zu 1,5 dB verstärkt. Entlang der Bundesstraße ergeben sich weder bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h noch bei 70 km/h Pegeldifferenzen im Tages- und Nachtzeitraum.

Die DTV auf innerörtlichen Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen nimmt um 24,29 % ab. Der Pkw-Anteil sinkt um 30 %, während der Lkw-1-Anteil um 54 % und der Lkw-2-Anteil tagsüber um 24 % bzw. nachts um 20 % zunimmt. Dies führt sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum zu Pegelminderungen von bis zu 1,0 dB.

Die DTV auf Autobahnen nimmt geringfügig um 2,36 % zu. Der Pkw-Anteil nimmt lediglich um 5 % ab, während der Lkw-1-Anteil um ca. 48 % und der Lkw-2-Anteil um ca. 36 % zunimmt (vgl. Tabelle 4.26 und 4.27). Dies führt grundsätzlich zu einer Pegelerhöhung, die jedoch durch die Einführung des Tempolimits gedämpft wird. Im Nachtzeitraum führt die um 9 %-Punkte höhere stündliche

Verkehrsstärke (M) im Vergleich zum Tageszeitraum zu einer zusätzlichen Erhöhung des Beurteilungspegels um 0,5 dB. Anschlussstellen verursachen ebenfalls zusätzliche Pegelerhöhungen.

Die Schallausbreitungsbedingungen werden ebenso durch Siedlungs- und Verkehrsflächen verändert, jedoch in geringerem Umfang. Auch die Entwicklungen der Gebäudefassaden haben keinen Einfluss auf die Beurteilungspegel.

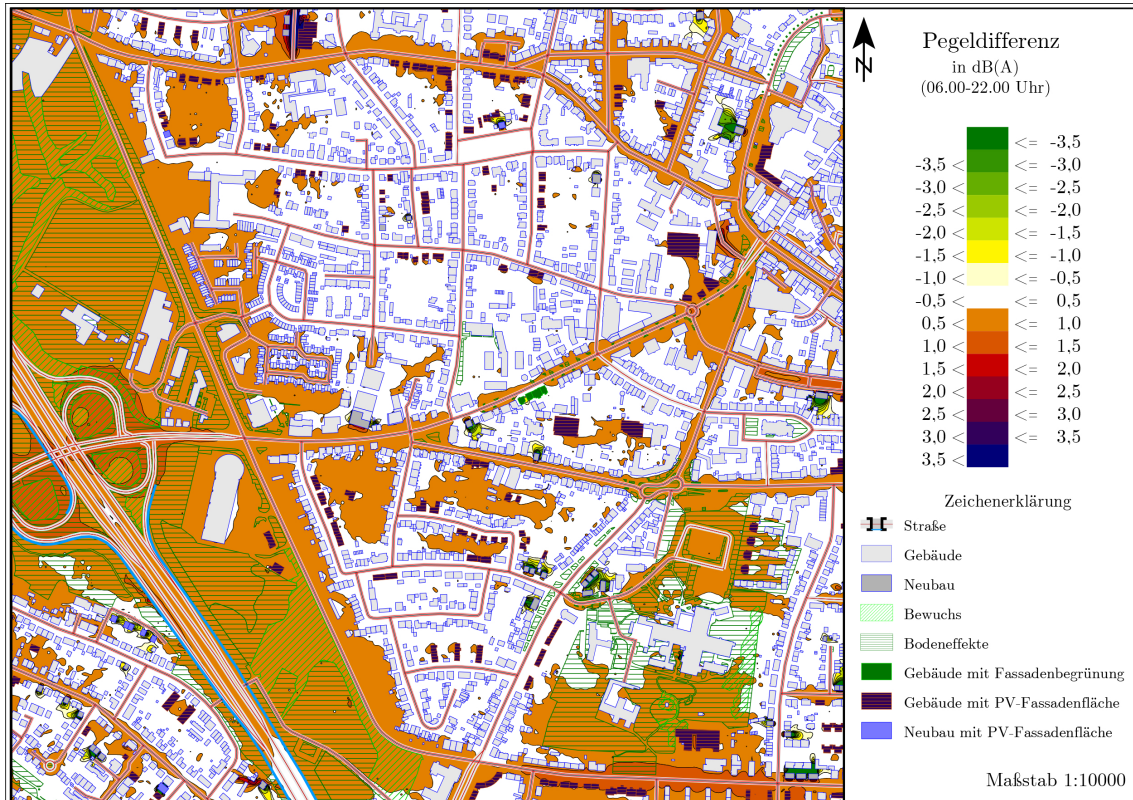


Abbildung 5.22: Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)

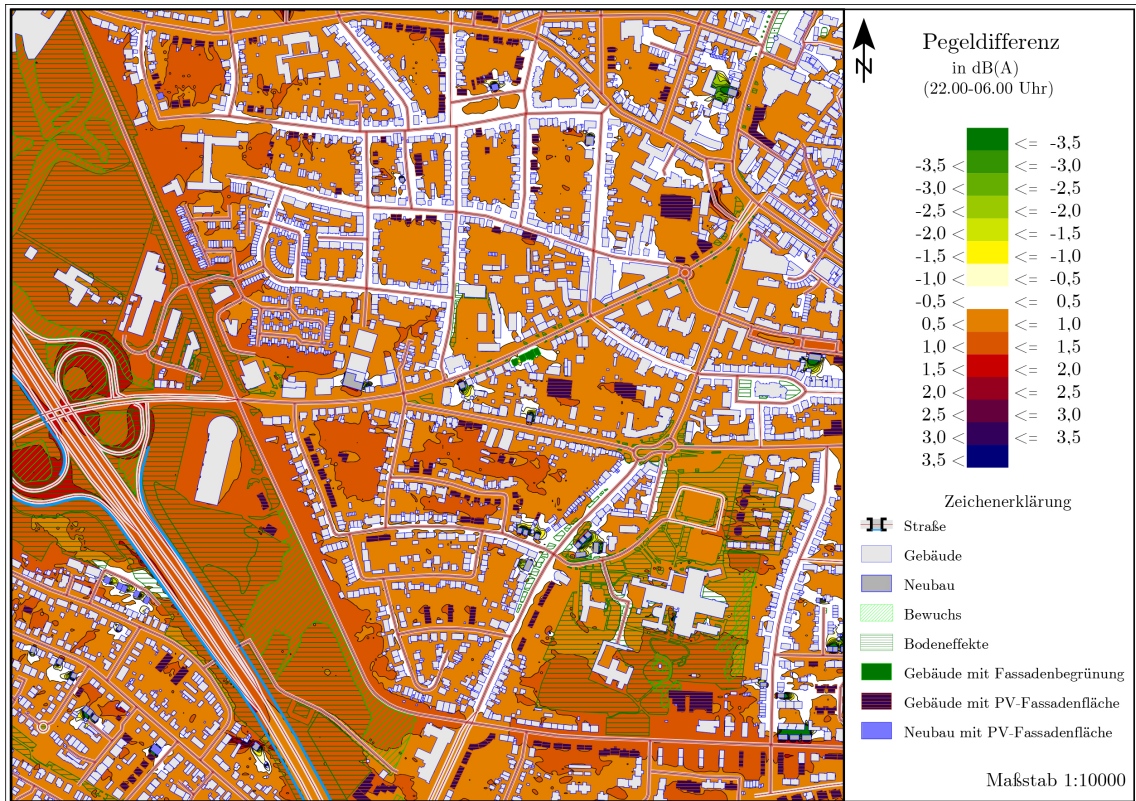


Abbildung 5.23: Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)

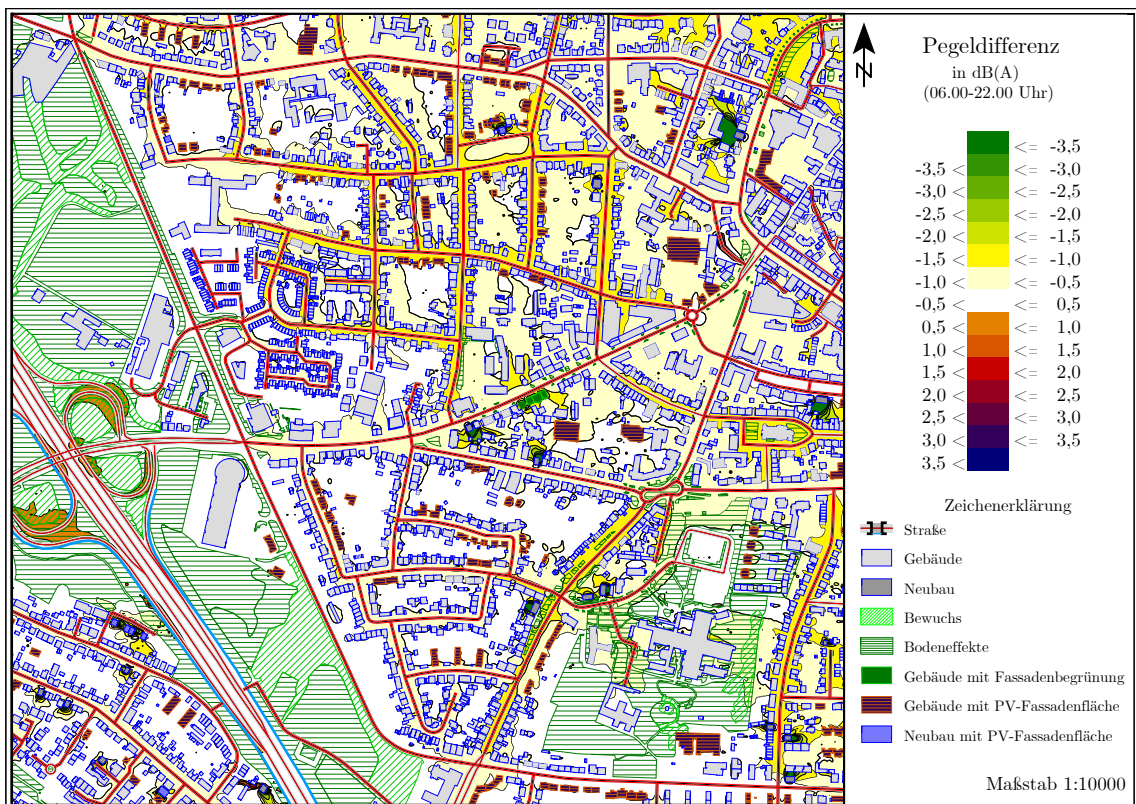


Abbildung 5.24: Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)

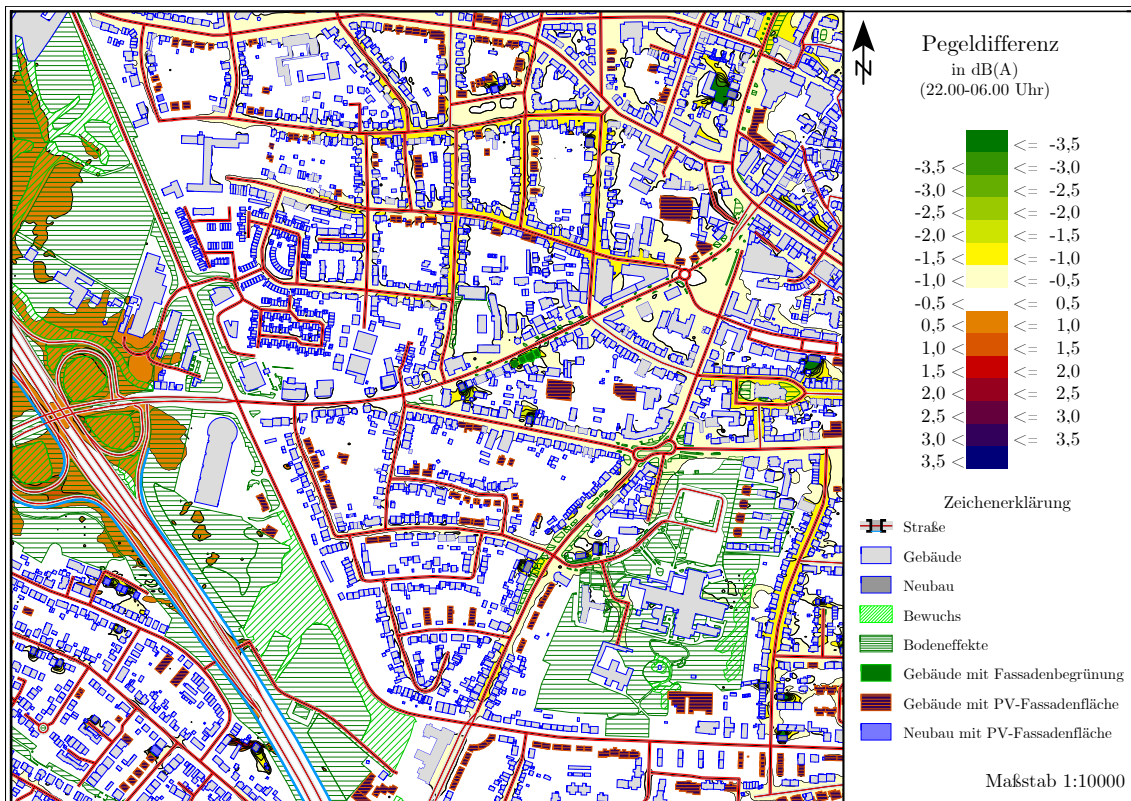


Abbildung 5.25: Vergleich der Schallimmissionspläne eines städtischen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)

5.2.3 Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen

Referenzszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen für den Tageszeitraum in Abbildung 5.26 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.27 dargestellt.

Im Referenzszenario zeigen sich entlang der Gemeindestraßen sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h bzw. 50 km/h ähnliche Pegeländerungen wie in den zuvor beschriebenen siedlungsstrukturellen Kreistypen. Darüber hinaus kommt es entlang von Spielstraßen zu einer Erhöhung der Beurteilungspegel um bis zu 1,5 dB. Dies ist auf das akustische AVAS-Warnsystem elektrisch betriebener Fahrzeuge zurückzuführen, das unterhalb von 20 km/h künstliche, verbrennungsmotorähnliche Fahrgeräusche erzeugt (vgl. Kapitel 3.2.2). Das längenbezogene Lärminderungspotenzial des zunehmenden Bestandes an Elektrofahrzeugen entfaltet sich daher in diesen Spielstraßen nicht.

Die gestiegene Verkehrsstärke auf den Landes-, Kreis-, und Gemeindeverbindungsstraßen erhöht leicht den Beurteilungspegel, wobei bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h aufgrund des zunehmenden Anteils elektrifizierter Fahrzeuge keine Pegeländerung zu erwarten ist. Bei 50 km/h ergeben sich Pegelerhöhungen zwischen 0,5 und 1,0 dB, bei 70 km/h bis zu 1,5 dB. Im Nachtzeitraum sind die Pegeldifferenzen ähnlich, jedoch ist die Schallausbreitung bei 70 km/h größer als im Tageszeitraum.

Stabilitätsszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen für den Tageszeitraum in Abbildung 5.28 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.29 dargestellt.

Im Stabilitätsszenario zeigen sich entlang der Gemeindestraßen sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum ähnliche Pegelveränderungen wie in den zuvor beschriebenen siedlungsstrukturellen Kreistypen. Entlang von Spielstraßen sind hingegen keine Pegeldifferenzen zu erwarten, da das AVAS-Warnsystem an diesen Straßen zu keiner zusätzlichen Lärminderung führt.

Die DTV nimmt auf außerörtlichen Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen um 1,19 % ab. Während der Pkw-Anteil um 5 % abnimmt, nimmt der Lkw-1-Anteil um ca. 50 % und der Lkw-2-Anteil um ca. 32 % zu (vgl. Tabellen 4.18 und 4.20). Durch diese geringere Abnahme der Verkehrsstärke sind im Tageszeitraum keine Pegelunterschiede zu erwarten. Darüber hinaus kommt es im Nachtzeitraum bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h zu einer leichten Pegelerhöhung zwischen 0,5 und 1,0 dB. Der Grund dafür ist, dass die Verkehrsstärke (M) insbesondere durch den Lkw-1-Anteil im Vergleich zum Tageszeitraum höher ist (vgl. Kapitel 4.1.4).

Sowohl im Referenzszenario als auch im Stabilitätsszenario hat die Veränderung der Bebauungsdichte auch hier einen Einfluss auf die Schallausbreitung, wenn auch in geringerem Maße als in dicht besiedelten Strukturen (wie den oben beschriebenen kreisfreien Großstädten und städtischen Kreisen). Auch hier hat die Entwicklung der Gebäudefassaden keinen Einfluss.

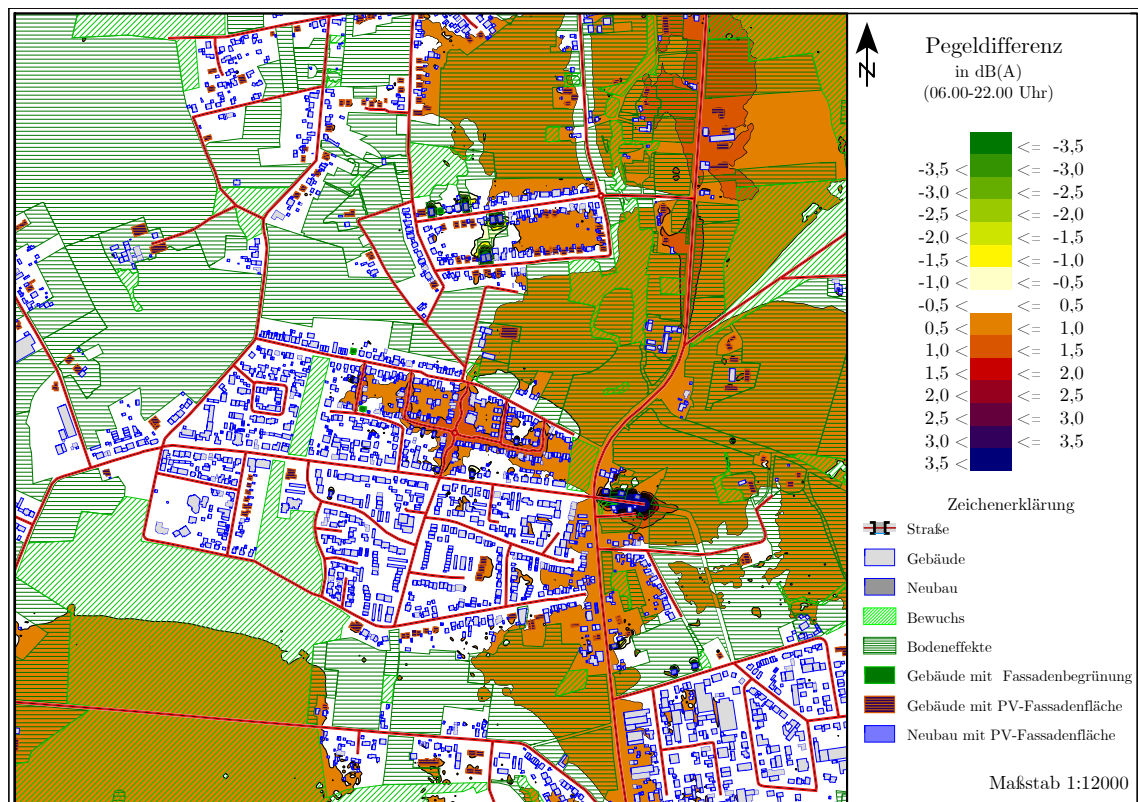


Abbildung 5.26: Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)

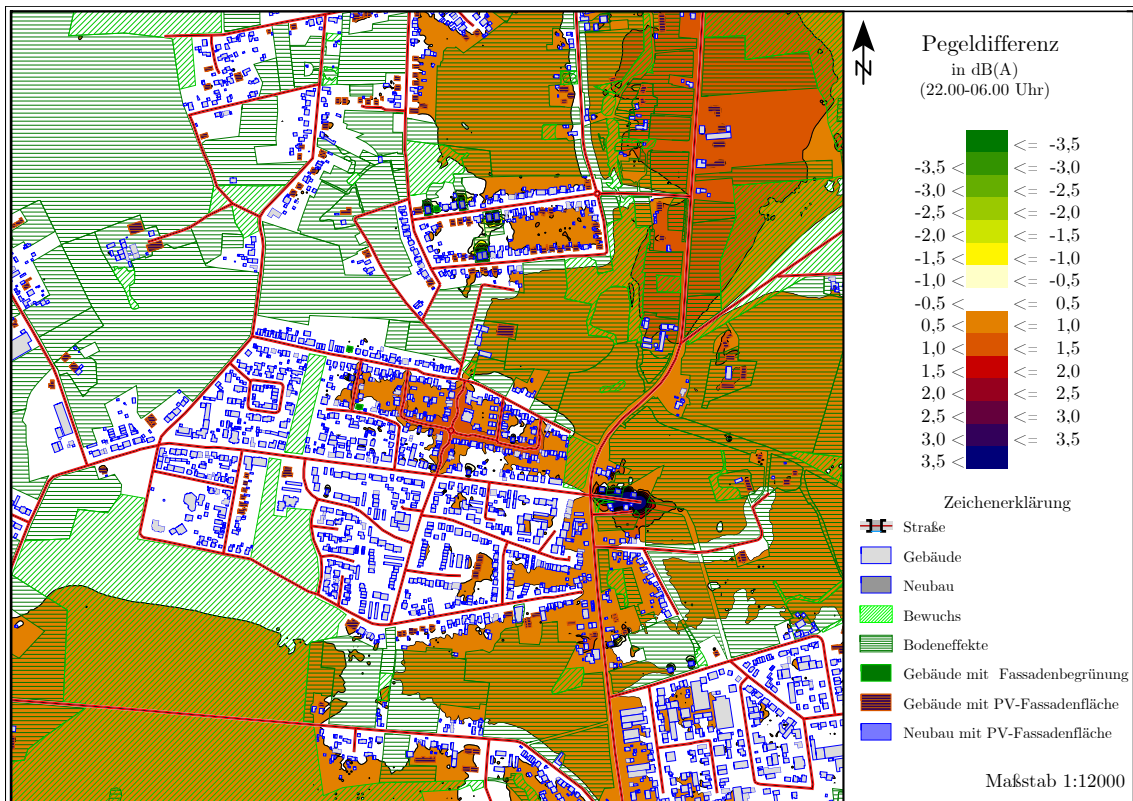


Abbildung 5.27: Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)

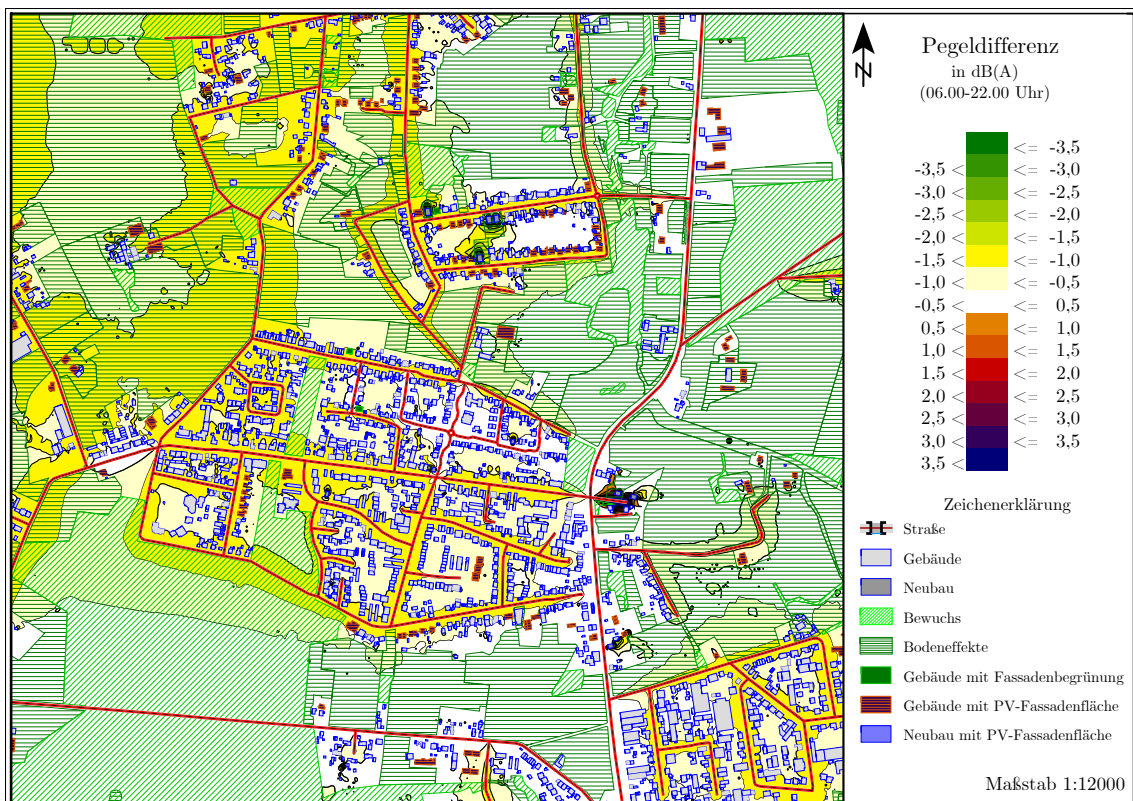


Abbildung 5.28: Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)

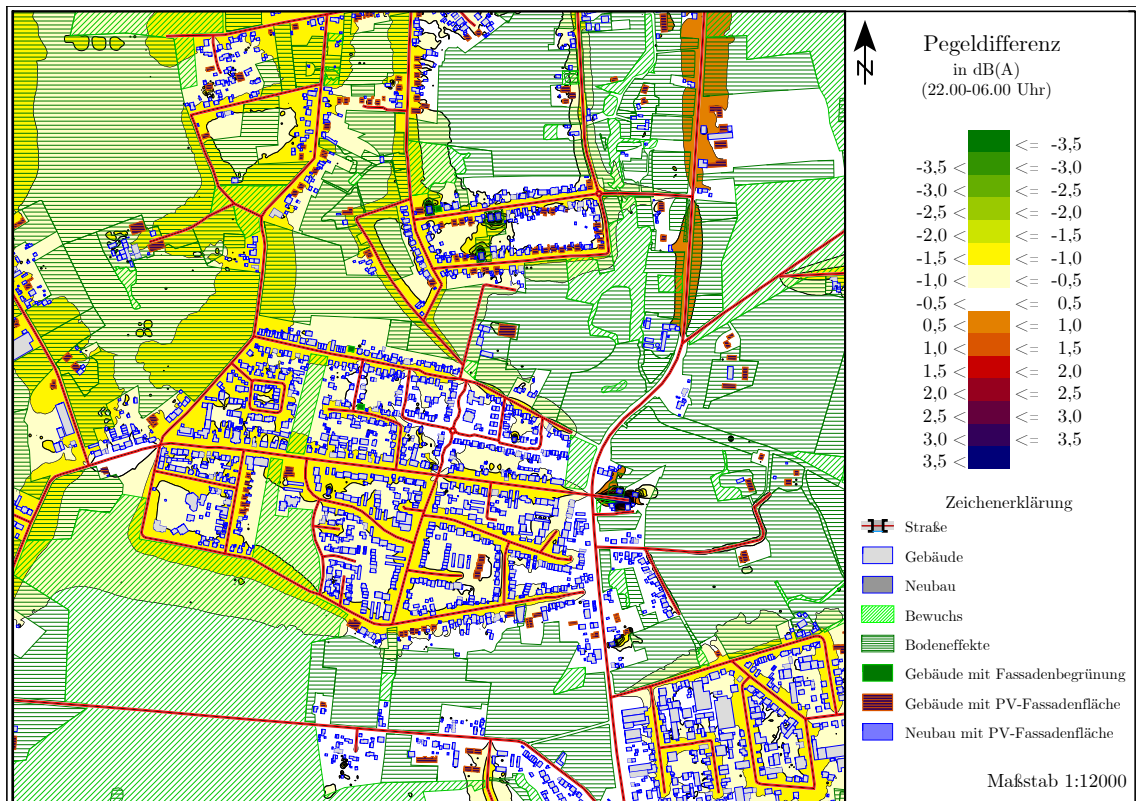


Abbildung 5.29: Vergleich der Schallimmissionspläne eines ländlichen Kreises mit Verdichtungsansätzen mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)

5.2.4 Dünn besiedelte ländliche Kreise

Referenzszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Referenzszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines dünn besiedelten ländlichen Kreises für den Tageszeitraum in Abbildung 5.30 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.31 dargestellt.

Im Referenzszenario zeigen sich entlang der Gemeindestraßen sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum ähnliche Pegeländerungen wie in den zuvor beschriebenen siedlungsstrukturellen Kreistypen. Darüber hinaus kommt es entlang der Gemeindeverbindungsstraßen bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h zu einer Erhöhung des Beurteilungspegels um 0,5 bis 1,0 dB, während bei 30 km/h kein Unterschied zu erwarten ist.

Trotz der geringeren Zunahme der Bebauung verändern sich die Schallausbreitungsbedingungen durch die neue Bebauung und die Erschließungsstraßen. Gebäude mit Fassadenbegrünung werden in diesem Abschnitt aufgrund des geringen Zuwachses nicht erfasst. Die Gebäude mit PV-Fassadenflächen haben keinen Einfluss auf den Beurteilungspegel.

Stabilitätsszenario

Der Vergleich der Schallimmissionspläne der aktuellen Planungssituation und der prognostizierten Situationen in Folge der Entwicklungen laut Stabilitätsszenario für den Zeithorizont 2050 ist am Beispiel eines dünn besiedelten ländlichen Kreises für den Tageszeitraum in Abbildung 5.32 und für den Nachtzeitraum in Abbildung 5.33 dargestellt.

Im Stabilitätsszenario zeigen sich entlang der Gemeindestraßen sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum ähnliche Pegeländerungen wie in den zuvor beschriebenen siedlungsstrukturellen Kreistypen, wobei sich die Beurteilungspegel um bis zu 1,5 dB reduzieren. Entlang der Gemeindeverbindungsstraßen sind bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h sowie 50 km/h keine Pegeländerungen zu erwarten.

Die Schallausbreitungsbedingungen werden durch die neue Bebauung und die Erschließungsstraßen sowie durch Gebäudefassaden mit PV-Modulen in vergleichbarer Hinsicht wie im Referenzszenario beeinflusst.

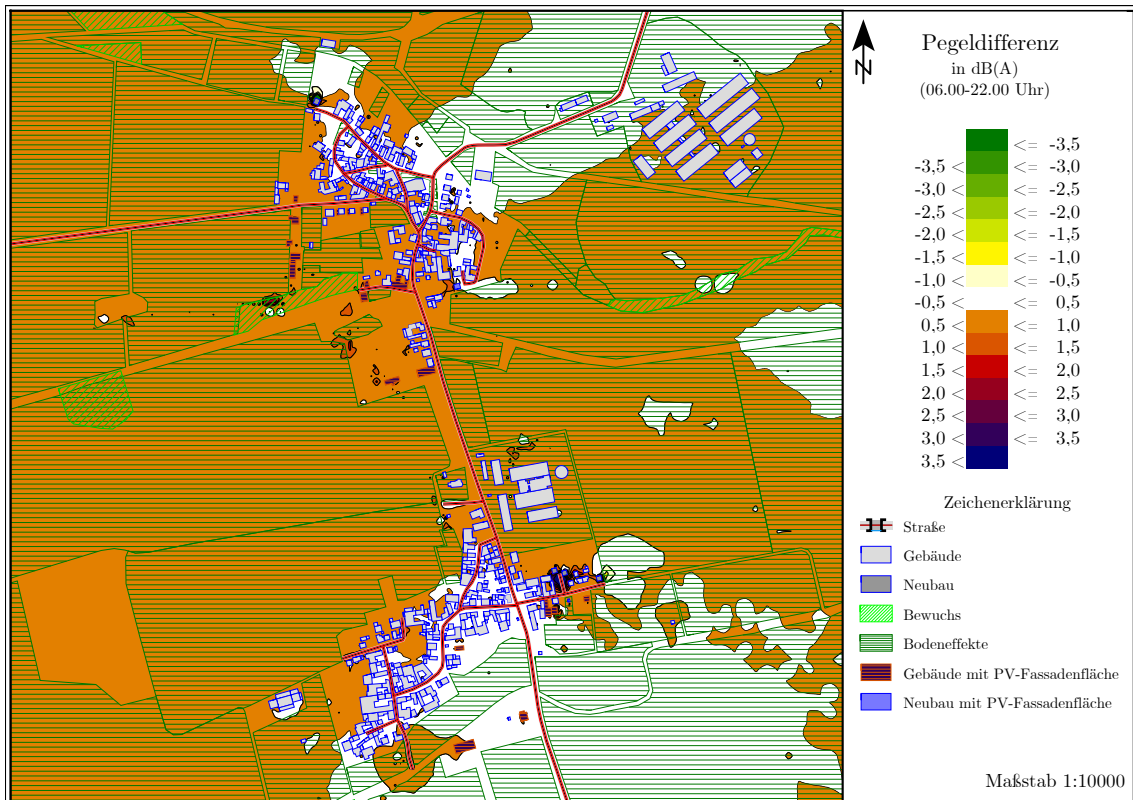


Abbildung 5.30: Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Tageszeitraum)

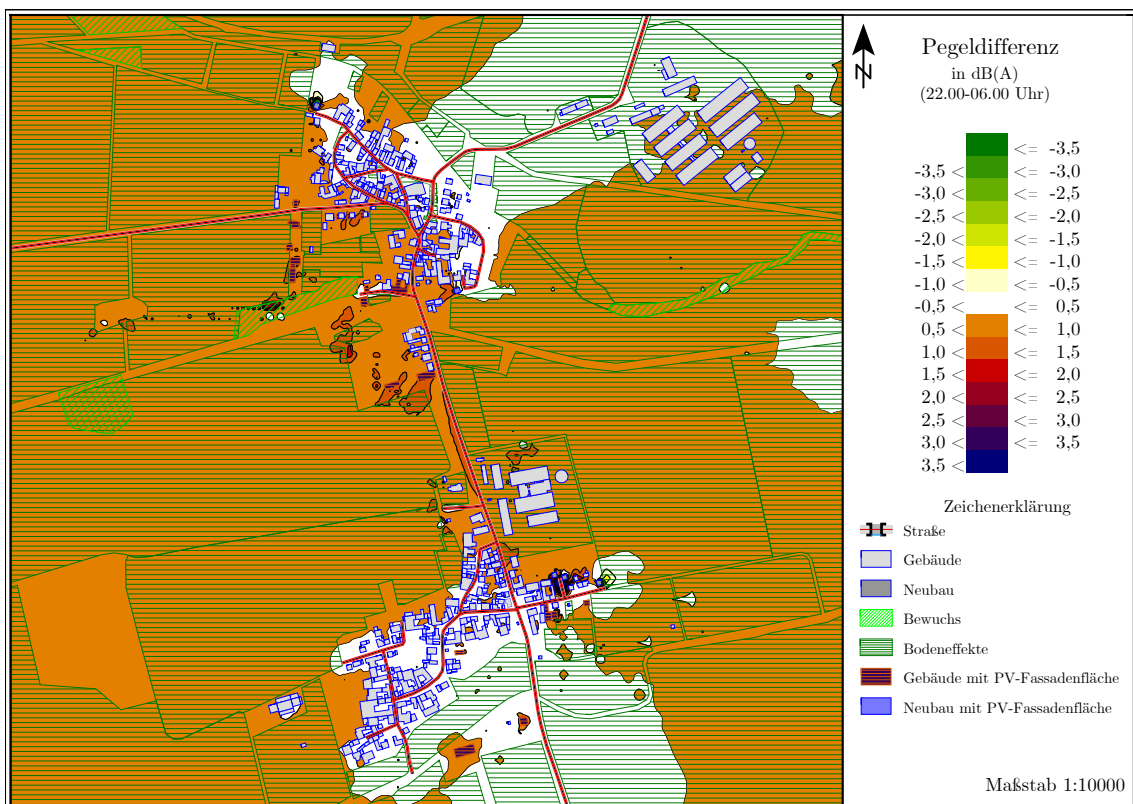


Abbildung 5.31: Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Referenzszenario 2050 (Nachtzeitraum)

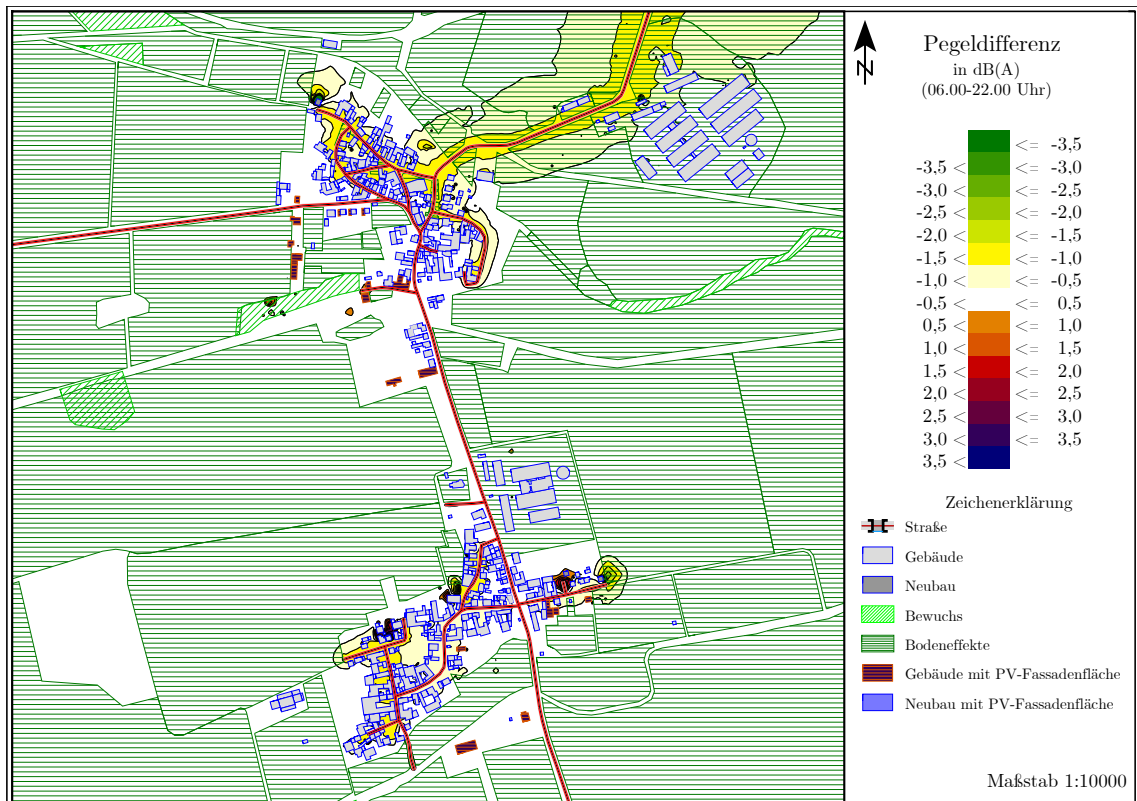


Abbildung 5.32: Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Tageszeitraum)

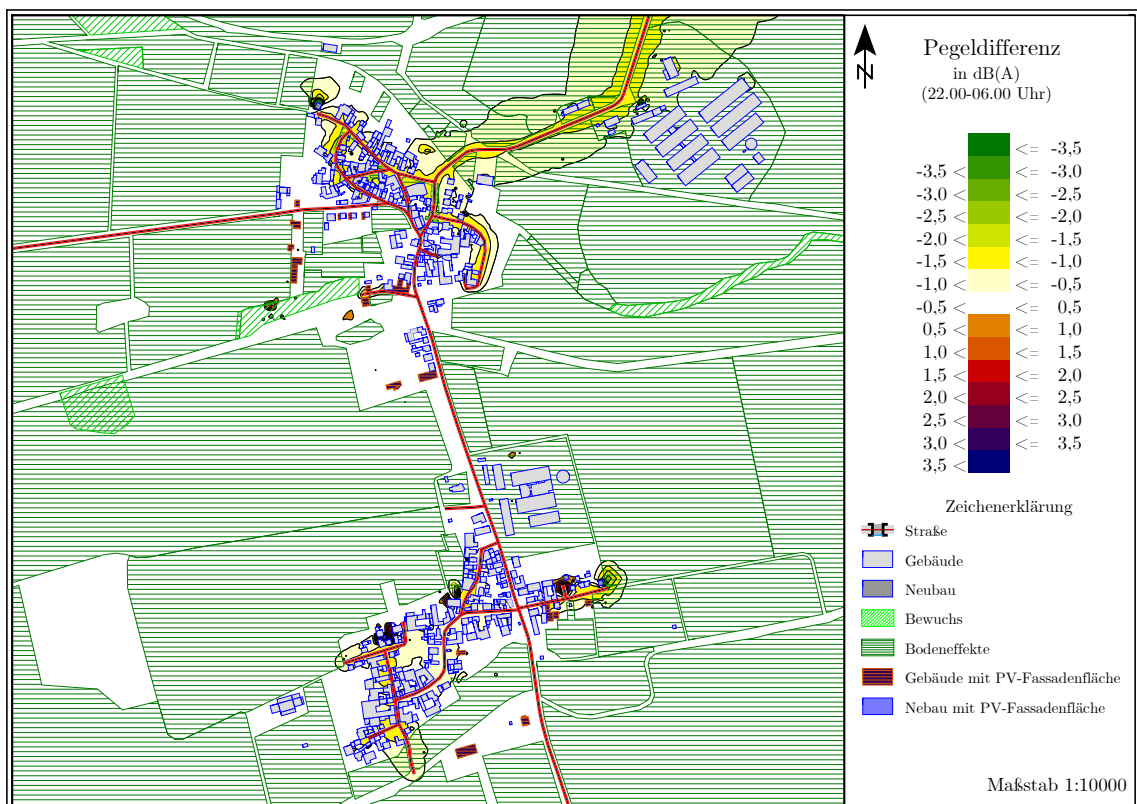


Abbildung 5.33: Vergleich der Schallimmissionspläne eines dünn besiedelten ländlichen Kreises mit der aktuellen Planungssituation und dem Prognosemodell Stabilitätsszenario 2050 (Nachtzeitraum)

5.3 Verkehrslärmentwicklung bis 2050 und Lärmwahrnehmung

Eine Veränderung der Lautstärke der Umgebungsgeräusche kann vom menschlichen Gehör erst ab einer Pegeldifferenz von 1 dB wahrgenommen werden. Ein Unterschied von 3 dB hingegen wird als deutlich hörbar wahrgenommen.

Unter Berücksichtigung dessen, zeigen die mit der Ausgangssituation verglichenen Prognosemodelle für das Jahr 2050 allenfalls noch gerade wahrnehmbare Pegeldifferenzen:

Im Referenzszenario kommt es insbesondere infolge erhöhter Verkehrsstärken im Tageszeitraum bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 70 km/h auf Bundes- und Verbindungsstraßen sowie auf Spielstraßen zu Pegelanstiegen von bis zu 1,5 dB. Ähnliche Anstiege zeigen sich auch im Nachtzeitraum auf Autobahnen, Bundesstraßen, bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 70 km/h auf Verbindungsstraßen sowie auf Spielstraßen. Diese Veränderungen liegen an der Schwelle zur Wahrnehmbarkeit und führen noch nicht zu einer deutlich spürbaren Erhöhung der Lärmbelastung.

Im Stabilitätsszenario führt die verringerte Verkehrsstärke insgesamt zu einer leichten Reduzierung der Beurteilungspegel. Eine Verringerung des Lärms, die gerade noch wahrnehmbar ist, ist jedoch nur auf Gemeindestraßen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h festzustellen.

In beiden Szenarien führen die veränderten Reflexionsverluste von Gebäudefassaden mit Begrünung und PV-Modulen zu keinen hörbaren Veränderungen. Zwar kann durch begrünte Fassaden eine Minderung von bis zu 1,0 dB erreicht werden, jedoch bleibt diese unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

Hinsichtlich der Entwicklung der Bebauungsdichte ist festzustellen, dass weitere Verkehrsflächen sowohl im Referenz- als auch im Stabilitätsszenario zu zusätzlichen Schallquellen führen. Dadurch nimmt der Straßenverkehrslärm zu, was deutlich wahrnehmbar ist. Neue Bebauung wirkt als Abschirmung, sodass auf der straßenabgewandten Seite eine stellenweise deutliche Lärminderung wahrgenommen wird.

Die Prognosemodelle zeigen, dass die Anwohner lärmkritischer Straßen, bei denen der Immissionsgrenzwert der Lärmvorsorge oder der Auslösewert für die Lärmsanierung an den Gebäuden überschritten werden, auch in Zukunft von Lärm betroffen sein werden. Die Lärmsituation wird sich bis zum Jahr 2050 weder durch die erhöhte Verkehrsstärke im Referenzszenario wahrnehmbar verschlechtern noch durch die vorgesehenen Maßnahmen im Verkehrs- und Gebäudebereich im Stabilitätsszenario wahrnehmbar verbessern.

Die in Tabelle 5.2 dargestellten Ergebnisse fassen die Pegeldifferenzen für den Zeithorizont 2050 zusammen und verdeutlichen die Auswirkungen der vorgestellten Szenarien auf den Straßenverkehrslärm.

„(a)“ steht für Fahrten außerorts, „(i)“ für Fahrten innerorts.

Die Verbesserung der Lärmsituation wird mit der Farbe „(Grün)“ und die Verschlechterung der Lärmsituation mit der Farbe „(Rot)“ dargestellt.

Die wahrnehmbaren Pegeldifferenzen sind durch Fettdruck hervorgehoben.

Kategorie	Straßenart	Referenzszenario 2050		Stabilitätsszenario 2050	
		tags (06.00 - 22.00 Uhr)	nachts (22.00 - 06.00 Uhr)	tags (06.00 - 22.00 Uhr)	nachts (22.00 - 06.00 Uhr)
Verkehr	Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen (Tempolimit 120)	120 km/h (Pkw), 80 km/h (Lkw1/2): 0,5–1,0 dB	120 km/h (Pkw), 80 km/h (Lkw1/2): 1,0–1,5 dB	120 km/h (Pkw), 80 km/h (Lkw1/2): kein Unterschied	120 km/h (Pkw), 80 km/h (Lkw1/2): 0,5–1,0 dB
	Bundesstraßen	50 km/h: 0,5–1,0 dB 70 km/h: 1,0–1,5 dB	50 / 70 km/h: 1,0–1,5 dB	50 km/h / 70 km/h: kein Unterschied (i/a)	50 / 70 km/h: kein Unterschied (i) 0,5–1,0 dB (a)
	Landes-, Kreis- & Gemeindeverbindungsstr.	30 km/h: kein U. 50 km/h: 0,5–1,0 dB 70 km/h: 1,0–1,5 dB	30 km/h: kein U. 50 km/h: 0,5–1,0 dB 70 km/h: 1,0–1,5 dB	30 / 50 / 70 km/h: kein Unterschied (a) (–) 0,5 - 1,0 dB (i)	30 / 50 km/h: kein U. 70 km/h: 0,5–1,0 dB (a) (–) 0,5 - 1,0 dB (i)
	Gemeindestraße	30 km/h: kein U. 50 km/h: 0,5–1,0 dB 7 km/h: 1,0–1,5 dB	30 km/h: kein U. 50 km/h: 0,5–1,0 dB 7 km/h: 1,0–1,5 dB	30 km/h: (–) 1,0–1,5 dB 50 km/h: (–)0,5 - 1,0 dB 7 km/h: kein U.	30 km/h: (–) 1,0–1,5 dB 50 km/h: (–)0,5 - 1,0 dB 7 km/h: kein U.
Bodendichte	Verkehrsflächen	zusätzliche Quelllinien		zusätzliche Quelllinien (in geringerem Umfang)	
	Siedlungsflächen	stellenweise Abschirmung		stellenweise Abschirmung (in geringerem Umfang)	
Gebäudefassaden	Begrünung	0,5–1,0 dB Reduktion (geringerer flächenmäßiger Anteil)			
	PV-Modul	kein Einfluss (hoher flächenmäßiger Anteil)			

Tabelle 5.2: Zusammenfassende Darstellung der Pegeldifferenzen und Einflussfaktoren für den Zeithorizont 2050

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wurde die Entwicklung des Straßenverkehrslärms in Deutschland bis zum Jahr 2050 unter Berücksichtigung der aktuell diskutierten politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Planungs- und Entscheidungsprozesse untersucht.

Mithilfe der Szenariotechnik wurden Megatrends analysiert, um zwei unterschiedliche Zukunftsszenarien – ein Referenz- und ein Stabilitätsszenario – zu entwickeln. Während die Megatrends „Demografischer Wandel“, „Wirtschaftliche Entwicklung“, „Globalisierung“ und „Technologische Entwicklung“ in beiden Szenarien bis zum Jahr 2050 ähnlich verlaufen, zeigen sich bei den Entwicklungen von „Urbanisierung“ und „Mobilisierung“ Unterschiede. Diese hängen in beiden Szenarien von den Klimaschutzmaßnahmen hinsichtlich der Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs sowie der zukünftigen Entwicklung der Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr ab.

Laut der vorhandenen Zukunftsszenarien wird bis zum Jahr 2050 die Bevölkerung in Deutschland auf rund 77 Millionen Menschen zurückgehen. Der demografische Wandel ist dabei durch Alterung und Geburtenrückgang einerseits und durch steigende Lebenserwartung und Nettozuwanderung andererseits gekennzeichnet. Die Wirtschaft entwickelt sich mit moderatem, aber stabilem Wachstum weiter, wobei technologische Entwicklungen gleichzeitig zu Effizienzsteigerungen in vielen Bereichen führen. Dazu zählen insbesondere die elektrifizierten Fahrzeuge, deren Bestand kontinuierlich wächst. Auch im Bereich der Materialtechnologie werden Innovationen vorangetrieben: So gewinnen Begrünungen und Photovoltaikanlagen an Gebäuden zunehmend an Bedeutung. Zudem wird die Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen politisch umgesetzt.

Im Referenzszenario wurde die zukünftige Entwicklung beschrieben, wenn keine weitergehenden Entscheidungen getroffen und Maßnahmen ergriffen werden. Dabei werden die Klimaschutzziele im Jahr 2050 verfehlt und deren Erreichung deutlich verzögert. Aufgrund der demografischen Entwicklung und der verstärkten Nutzung von Homeoffice beispielsweise wird der Personenverkehr abnehmen. Der Güterverkehr wird dagegen vor allem durch die Globalisierung und den wachsenden Online-Handel zunehmen, wobei eine Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene jedoch nur in geringem Umfang möglich sein wird. Die zunehmende Urbanisierung verändert die räumliche Verteilung der siedlungsstrukturellen Kreistypen und das Ziel, die Flächeninanspruchnahme zu reduzieren, kann nicht erreicht werden.

Im Stabilitätsszenario werden ambitionierte Maßnahmen umgesetzt, um das Klimaschutzziel im Jahr 2050 zu erreichen. Mit u.a. diesen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie zur Effizienzsteigerung im Transportwesen werden die Ziele erreicht. Im Personenverkehr stehen vor allem die Förderung und der Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs sowie des nichtmotorisierten Verkehrs im Vordergrund. Dabei nimmt der Rad- und Fußgängerverkehr an Bedeutung zu. Das Bewusstsein der Bevölkerung für die Vorteile der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und für den Umweltschutz wird stärker. Der Modal-Split verlagert sich vom motorisierten Individualverkehr hin zum öffentlichen Verkehr. Die zentralen Strategien im Güterverkehr sind die Verlagerung von Transporten von der Straße auf die Schiene sowie die Optimierung des

verbleibenden Straßengüterverkehrs. Hierzu zählen beispielsweise der Marktzugang und die Marktregulierung, ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik, finanzielle Förderungen und Subventionen sowie die Infrastrukturpolitik. Um das Ziel der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme bis 2050 zu erreichen, werden brachliegende Siedlungsflächen einer neuen Nutzung zugeführt.

Abschließend wurden die Daten dieser Szenarien durch statistische Analysen in Prognosemodelle überführt. Die Verkehrsstärken wurden mithilfe von Regressionsanalysen prognostiziert und nach Fahrzeuggruppen, Tages- und Nachtzeiten sowie Straßentypen unterteilt. Die Entwicklungen der siedlungsstrukturellen Kreistypen wurden durch Trendlinien bestimmt. Dabei wurden der Anteil elektrifizierter Kraftfahrzeuge abhängig von inner- und außerörtlichen Fahrten sowie die Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen in die Berechnung des längenbezogenen Schallleistungspegels einbezogen, um das jeweilige Schallminderungspotenzial zu ermitteln. Zusätzlich wurden die Anteile der Gebäudeflächen mit Begrünung und PV-Modulen bis zum Jahr 2050 prognostiziert und deren Schallabsorptionseigenschaften berücksichtigt.

Als Grundlage für die Prognosemodelle wurden städtebauliche Entwicklungen anhand von Übersichtsplänen simuliert. Diese befassen sich mit den aktuellen Planungssituationen in der Bestandsentwicklung allgemeiner Wohngebiete unterschiedlicher siedlungsstruktureller Kreistypen, die mit verschiedenen Schallquellen des Straßenverkehrslärms zusammengeführt wurde. Aufbauend darauf wurden die Prognosemodelle für das Referenz- und das Stabilitätsszenario unter Anwendung der quantifizierten Prognosedaten simuliert und für jede Situation Schallimmissionspläne für den Tages- und den Nachtzeitraum gemäß RLS-19 berechnet. Die Pegeldifferenzen zwischen den aktuellen und den zukünftigen Planungssituationen wurden miteinander verglichen.

Die Ergebnisse der Prognosemodelle im Referenz- und Stabilitätsszenario 2050

Im Vergleich zur aktuellen Planungssituation haben die Prognosemodelle für den Zeithorizont 2050 insgesamt nur geringfügige – zum Teil gerade noch wahrnehmbare – Pegeldifferenzen gezeigt:

Entwicklung der Verkehrsstärke

Im Referenzszenario kommt es aufgrund der zunehmenden Verkehrsstärke, insbesondere durch die Anteile von Lkw-1 und Lkw-2 (gemäß RLS-19), zu einer Erhöhung der Beurteilungspegel:

Gemeindestraßen: Im Tages- und Nachtzeitraum steigt der Beurteilungspegel kaum wahrnehmbar um 0,5 bis 1,0 dB(A). Allerdings wird diese Pegelerhöhung durch die geringeren Vorbeifahrpegel der elektrifizierten Fahrzeuge bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h gedämpft, sodass an diesen Straßen keine Pegelunterschiede zu erwarten sind. Entlang der Spielstraßen erhöht sich der Beurteilungspegel hingegen gerade noch wahrnehmbar um bis zu 1,5 dB(A). Dies ist auf das akustische AVAS-Warnsystem elektrisch betriebener Fahrzeuge zurückzuführen.

Bundesstraßen: Im Tageszeitraum beträgt die Pegelerhöhung bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h 0,5 bis 1,0 dB(A) und bei 70 km/h eine gerade noch wahrnehmbare Erhöhung von bis zu 1,5 dB(A). Im Nachtzeitraum hingegen erhöht sich der Pegel sowohl bei 50 km/h als auch bei 70 km/h bis auf eine gerade noch wahrnehmbare Differenz von bis zu 1,5 dB(A).

Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen: Bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h ist kein Pegelunterschied zu erwarten, bei 50 km/h eine Erhöhung von 0,5 bis 1,0 dB(A) und bei 70 km/h eine gerade noch wahrnehmbare Erhöhung bis zu 1,5 dB(A).

Bundesautobahnen: Trotz einer Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h führt die zunehmende Verkehrsstärke zu einer Pegelerhöhung von 0,5 bis 1,0 dB(A).

Im Stabilitätsszenario führt die verringerte Verkehrsstärke insgesamt zu einer Reduzierung der Beurteilungspegel:

Gemeindestraßen: Die Beurteilungspegel reduzieren sich tagsüber sowie nachts um 0,5 bis 1,0 dB(A). Wie im Referenzszenario führt der geringere Vorbeifahrpegel der elektrifizierten Fahrzeuge bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h zu einer zusätzlichen, gerade noch wahrnehmbaren Verbesserung von bis zu 1,5 dB(A). Entlang der Spielstraßen sind hingegen keine Pegeldifferenzen zu erwarten, da das AVAS-Warnsystem an diesen Straßen nicht zu einer zusätzlichen Lärminderung führt.

Bundesstraßen: Die Verkehrsstärke sinkt auf außerörtlichen Straßen weniger stark als auf innerörtlichen Straßen, außerdem bleiben in beiden Fällen die Lkw-Anteile hoch. Daher sind weder innerorts noch außerorts Pegelunterschiede zu erwarten. Außerorts erhöht sich der Pegel im Nachtzeitraum jedoch um 0,5 dB(A).

Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen: Innerorts wird eine Pegelminderung von 0,5 bis 1,0 dB(A) erreicht. Außerorts ist allgemein keine Pegelminderung zu erwarten, wobei im Nachtzeitraum bei zulässigen Geschwindigkeiten von 70 km/h sogar eine Pegelerhöhung von bis zu 1,0 dB(A) zu erwarten ist.

Bundesautobahnen: Die Verkehrsstärke nimmt geringfügig ab, während die Lkw-Anteile hoch bleiben. Eine Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h führt zu keiner Veränderung und daher weder zu einer Verschlechterung noch zu einer Verbesserung des Pegels.

Entwicklung der Bebauungsdichte

Im Referenzszenario erhöht sich der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche bis zum Jahr 2050 bundesweit von 14,5 % auf 15,8 %. Im Stabilitätsszenario steigt sie hingegen auf 15,2 %.

Diese Entwicklungen beeinflussen die Bebauungsdichte, die wiederum die Schallausbreitung verändert: Während neue Verkehrsflächen zusätzliche Schallquellen darstellen, bieten neue Bebauungen auf der straßenabgewandten Seite stellenweise wirksame Abschirmungen. Diese führen an einzelnen Stellen zu deutlich wahrnehmbaren Pegelveränderungen, verändern die Gesamtsituation jedoch nur begrenzt.

Je nach siedlungsstrukturellem Kreistyp unterscheiden sich jedoch die Auswirkungen auf die Schallausbreitungsbedingungen: Am stärksten verändern sich die Bedingungen in den kreisfreien Großstädten, gefolgt von den städtischen Kreisen und den ländlichen Kreisen mit Verdichtungsansätzen. In den dünn besiedelten ländlichen Kreisen sind die Veränderungen am geringsten. Zudem werden im Stabilitätsszenario brachliegende Siedlungsflächen neuen Nutzung zugeführt, wodurch sich die Unterschiede gegenüber dem Referenzszenario weiter abschwächen.

Entwicklung der Gebäudeflächen von Begrünung und PV-Modulen

In beiden Szenarien führen die Gebäudefassaden mit Begrünungen und Photovoltaikmodulen zu keiner Veränderung, weder zu einer wahrnehmbaren Verbesserung noch zu einer wahrnehmbaren Verschlechterung:

Begrünte Fassadenflächen führen bei einem Reflexionsverlust von 5,3 dB zu einer Lärminderung von bis zu 1,0 dB(A) in einem Abstand von etwa einem Meter zur Fassade. Aufgrund der prognostizierten Flächenentwicklung von lediglich 0,12 % Gesamtanteil bis zum Jahr 2050 sind die potenziellen Vorteile bis dahin sehr begrenzt.

PV-Module führen bei einem Reflexionsverlust von 0,5 dB zu keiner wahrnehmbaren Veränderung durch Schallreflektionen. Die flächenmäßige Entwicklung zeigt mit einem prognostizierten Gesamtanteil von ca. 7,9 % dagegen einen deutlichen Anstieg bis zum Jahr 2050.

Die Prognosemodelle haben gezeigt, dass die Anwohner von lärmkritischen Straßen auch in Zukunft von Verkehrslärm betroffen sein werden. Bis zum Jahr 2050 wird sich der Straßenverkehrslärm weder durch die zukünftigen Entwicklungen (wie im Referenzszenario) wahrnehmbar verstärken, noch wird er sich durch die zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen im Bereich Gebäude und insbesondere Verkehr (wie im Stabilitätsszenario) wahrnehmbar reduzieren. Die Lärmbelastung bleibt somit ein städtebauliches aber vor allem gesundheitliches Problem.

6.2 Ausblick

Die Entwicklungen bis zum Jahr 2050 werden sich in Deutschland nicht entscheidend auf den Straßenverkehrslärm auswirken. Die Hoffnung, dass die Klimaschutzmaßnahmen als Nebeneffekt auch zu einer wahrnehmbaren Verbesserung der Lärmsituation führen werden, ist daher unbegründet. Zwar können einzelne Klimaschutzmaßnahmen in den Bereichen Verkehr und Gebäude zu Verbesserungen führen, diese sind allerdings vernachlässigbar.

Werden die Maßnahmen jedoch bewusst in umfassende Lärminderungsstrategien integriert, können mittel- bis langfristig wirksame Reduktionen erreicht werden. Eine wahrnehmbare Verbesserung lässt sich insbesondere dann erzielen, wenn gezielte und ganzheitliche Lärmschutzmaßnahmen frühzeitig und fachübergreifend in die Verkehrs-, Raum- und Stadtplanung integriert werden. Nur dann können Städte klimafreundlicher und lärmfreier gestaltet werden.

Die in dieser Dissertation entwickelte Methodik stellt ein Instrument für die langfristige Planung der Lärmbekämpfung dar. Sie ermöglicht es, relevante Prognosedaten zu ermitteln und somit neue Prognosemodelle für den Straßenverkehrslärm zu erstellen. Darüber hinaus kann sie unter Berücksichtigung neuer politischer, wirtschaftlicher und technischer Zielsetzungen weiterentwickelt werden.

Bei langfristigen Planungen sind zudem gesellschaftliche Entwicklungen zu berücksichtigen, die zwar nicht direkt messbar sind, jedoch langfristig für die Lärmpolitik von Bedeutung sein können. So wird es beispielsweise aufgrund des demografischen Wandels in Zukunft immer mehr ältere Menschen geben, die in politischen Entscheidungsprozessen an Bedeutung gewinnen werden. Auch bei den jüngeren Altersgruppen lässt sich eine Tendenz zu einem veränderten Umweltbewusstsein erkennen. Hinzu kommt, dass internationale Zuwanderung kulturelle Vielfalt mit sich bringt, die sich in unterschiedlichen Ruhe- und Erholungsbedürfnissen sowie in unterschiedlichen Lärmempfindlichkeiten widerspiegeln kann.

Neben den bereits bestehenden Maßnahmen birgt auch die technologische Entwicklung weiteres Potenzial zur Lärminderung, wobei jedoch noch Forschungsbedarf besteht. Dazu zählen beispielsweise Fortschritte in der Entwicklung neuer Mobilitätslösungen sowie innovativer Materialien im Infrastrukturbereich. Digitale Verkehrsmanagementsysteme können eine optimierte Verkehrssteuerung und -planung ermöglichen. Autonomes und vernetztes Fahren kann beispielsweise abrupte Brems- und Beschleunigungsvorgänge vermeiden. Außerdem können neue Baumaterialien für lärmarme Fahrbahnbeläge die Reifen-Fahrbahngeräusche reduzieren.

Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen zur städtebaulichen Lärmwirkung von Gebäudeflächen mit Begrünungen oder Photovoltaiksystemen erforderlich. Die in dieser Arbeit zugrunde gelegten Annahmen zu den Reflexionsverlusten von Gebäudefassaden basieren auf dem aktuell noch begrenzten Forschungsstand. Insbesondere sind geeignete Begrünungssysteme für das Klima in Deutschland und ihre Schallabsorptionseigenschaften weiter zu untersuchen. Darüber hinaus könnten PV-Module an Gebäudefassaden – ähnlich wie bei Lärmschutzwänden – durch eine gezielte Anordnung zur Schallenkung und -senkung beitragen. Auch die Auswirkungen von Dächern mit Begrünungen und PV-Modulen sind weiterhin zu erforschen.

Gleichzeitig ist die Fahrweise der Verkehrsteilnehmer bei der Umsetzung von Lärmschutzmaßnahmen von Bedeutung. Beispielsweise wird derzeit diskutiert, ob die Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in geschlossenen Ortschaften von 50 km/h auf 30 km/h auch den Straßenverkehrslärm reduziert. Zwar ergeben sich aus Tempolimits rechnerisch wahrnehmbare Pegelreduktionen – gemäß RLS-19 beispielsweise bis zu 2,7 dB bei einer Senkung von 50 auf 30 km/h auf Gemeindestraßen –, doch die tatsächliche Wirkung hängt maßgeblich vom Fahrverhalten ab. Erfahrungsgemäß wird im Alltag bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h oft schneller und bei 50 km/h langsamer gefahren, wodurch sich die rechnerisch erwartete Lärmreduktion verringert.

Im Rahmen der Zukunftsforschung zum Thema Umgebungslärm ist insbesondere die frequenzabhängige Wahrnehmung zu berücksichtigen. Zwar zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit nur geringe, teils gerade noch wahrnehmbare Pegeldifferenzen auf, doch da das menschliche Gehör eine frequenzabhängige Empfindlichkeit aufweist, kann es trotz der geringen Pegeldifferenzen zu einer veränderten Wahrnehmung kommen.

Literaturverzeichnis

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Mitteilung der Kommission - Der europäische Grüne Deal*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>, 2019. – COM(2019) 640 final, Brüssel, 11.12.2019
- [2] FREY, Kilian ; BURGER, Andreas ; DZIEKAN, Katrin ; BUNGE, Christiane ; LÜNENBÜRGER, Benjamin: *Verkehrswende für ALLE, So erreichen wir eine sozial gerechtere und umweltverträglichere Mobilität*. Umweltbundesamt, 2020
- [3] WOTHGE, Jödis: Die körperlichen und psychischen Wirkungen von Lärm. In: *Umweltbundesamt UMID* (2016), Nr. 1, S. 38–43
- [4] BELZ, Janina ; FOLLMER, Robert ; HÖLSCHER, Jana ; STIESS, Dr. I. ; SUNDERER, Georg ; BIRZLE-HARDER, Barbara: *Umweltbewusstsein in Deutschland 2020 Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Umweltbundesamt, 2022
- [5] SCHRECKENBERG, Dirk ; KROH, Michael ; POPP, Christian: Meinungen zum Umgebungslärm in der ALD-Lärmumfrage 2023. In: *DAGA 2024, Tagungsband* (2024)
- [6] MIETZNER, Dana ; REGER, Guido ; WAGNER, Dieter: *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen - Methodenevaluation und neue Ansätze*. Gabler Verlag Wiesbaden, 2009
- [7] SIEGFRIED, Ullrich: Geräuschbelastung an klassifizierten Straßen - vergangene und zukünftige Entwicklung. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* (1994). – ISSN 0174–1098
- [8] WALKER, Dr. Andreas M. ; STEINER, Thomas ; CACHELIN, Dr. J. ; HÖIN, Reto ; KELLER, Peter: *Die Zukunft der akustischen Landschaft Schweiz – eine Analyse von langfristigen Megatrends*. 2012
- [9] ÖGREN, Mikael ; MOLNÁR, Peter ; BARREGARD, Lars: Road traffic noise abatement scenarios in Gothenburg 2015 – 2035. In: *Environmental Research* 164 (2018), 516-521. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117313245>. – ISSN 0013–9351
- [10] BLANES, Núria ; MARÍN, Anna ; RAMOS, Maria J.: ETC/ATNI Report 2019/3: Noise exposure scenarios in 2020 and 2030 outlooks for EU 28. In: *Zenodo* (2019). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3938980>
- [11] EGGERS, Sebastian ; HEIDEBRUNN, Frank ; KLATT, Imke I. ; BACHMEIER, Mirco: Lärminderungspotenziale in Deutschland im Rahmen des 'Zero pollution action plan'. In: *DAGA 2024, Tagungsband* (2024)
- [12] ROHS, Maximilian ; FLORE, Gabriel: *Mobilitätskonzepte für einen nachhaltigen Stadtverkehr 2050: Metaanalyse, Maßnahmen und Strategien (AP 2)*. Umweltbundesamt, 2022
- [13] WILLEMS, Wolfgang M. ; WAGNER, Alexandra ; STRICKER, Diana: *Schallschutz: Bauakustik*. Springer Vieweg, 2020
- [14] Umweltbundesamt: *Lärmbelästigung*, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/laerm/laermwirkungen/laermbelaestigung>, Erreicht am 07.01.2024
- [15] GIGLA, Birger: *Schallschutz Immissionschutz, Bau- und Raumakustik verstehen- planen- nachweisen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2018

- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-19 : Richtlinien zum Ersatz der RLS-90 mit der Verabschiedung der Änderung der 16. BImSchV*. Ausgabe 2019
- [17] Bundesrepublik Deutschland: *Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge*. 1974. – zuletzt geändert am 03.07.2024
- [18] Bundesrepublik Deutschland: *Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (34.BImSchV) - Verordnung über die Lärmkartierung*. 2006. – zuletzt geändert am 28.5.2021
- [19] Bundesrepublik Deutschland: *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (16.BImSchV)*. 1990. – zuletzt geändert am 04.11.2020
- [20] Bundesrepublik Deutschland: *Richtlinien für den Verkehrslärmschutz an Bundesfernstraßen in der Baulast des Bundes (VLärmSchR 97)*. 1997. – zuletzt geändert am 25.06.2010
- [21] FÜRST, Dr. P. ; KÜHNE, Rainer: *Straßenverkehrslärm – Eine Hilfestellung für Betroffene*. In: *ALD-Schriftenreihe, Band 1, 2. Auflage, Berlin* (2021)
- [22] PÖTZSCH, Olga ; RÖSSGER, Dr. F.: *13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*. www.destatis.de. Version: 2015
- [23] Statistisches Bundesamt - Was ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP)?, www.destatis.de, Erreicht am 24.10.2024
- [24] LUTZ, Christian ; BECKER, Lisa ; ULRICH, Philip ; DISTELKAMP, Martin: *Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland*. Umweltbundesamt, 2019
- [25] BERGK, Fabian ; BIEMANN, Kirsten ; HEIDT, Christoph ; KNÖRR, Wolfram ; LAMBRECHT, Udo ; SCHMIDT, Tobias ; ICKERT, Lutz ; SCHMIED, Martin ; SCHMIDT, Patrick ; WEINDORF, Werner: *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050*. Umweltbundesamt, 2016
- [26] MARTEN, Bosselmann: *KEP-Studie: Kurier, Express Paketdienste – Analyse des Marktes in Deutschland*. In: *BIEK Bundesverband Paket Express Logistik* (2022)
- [27] LAIB, Felix: *Lärminderung durch Elektrofahrzeuge im städtischen Straßenverkehr Akustische Potenziale und Konsequenzen für die Stadt*, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften der Universität Duisburg-Essen, Diss., 2021
- [28] Vestenamer - Evonik Resource Efficiency GMBH: *Innovation für elastomermodifizierte Asphalte*. 2023
- [29] MARYNIAK, Alexander: *Städtebaulicher Lärmschutz durch Gebäudebegrünung: Analyse, Simulation und Prognose bis 2050*. Fakultät für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Bauphysik, Ruhr-Universität Bochum, Masterarbeit (betreut von Rumeysa Evli-Fründt), 2025
- [30] KELDENICH, Selin S.: *Photovoltaik als Instrument des städtebaulichen Lärmschutzes: Analyse und Prognose bis 2050*. Fakultät für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Bauphysik, Ruhr-Universität Bochum, Masterarbeit (betreut von Rumeysa Evli-Fründt), 2025
- [31] HERRMANN, Harald: *Wachsen oder Schrumpfen?* In: *BBSR-Analysen KOMPAKT 12/2015*, Bundesinstitut für Bau-,Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2015)
- [32] JAKOB, Michael ; KLÖCKNER, Philipp: *Klimaschutzinstrumente im Verkehr Tempolimit auf Autobahnen*. In: *Für Mensch und Umwelt*, Umweltbundesamt (2021)
- [33] ROMEIKE, Frank ; HAGER, Peter: *Risiko-Management in der Produktion - Erfolgsfaktor Risiko-Management 4.0: Methoden, Beispiele, Checklisten Praxishandbuch für Industrie und Handel*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020 https://doi.org/10.1007/978-3-658-29446-5_6. – ISBN 978-3-658-29446-5

- [34] KOSOW, Hannah ; GASSNER, Robert: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien / IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. 2008. – Forschungsbericht. – Werkstatt Bericht Nr.103 S. – ISBN 978-3-941374-03-4
- [35] DERBYSHIRE, James ; WRIGHT, George: Augmenting the intuitive logics scenario planning method for a more comprehensive analysis of causation. In: *International Journal of Forecasting* (2017). – ISSN 0169-2070
- [36] EVLI, Sabire ; BROUGHEL, Anna ; ANSARI, Dr. D.: Evaluation of Net-Zero Carbon and 100% Renewable Energy Scenarios for 2050 and Beyond. In: *Research Gate* (2024)
- [37] HEIDT, Christoph ; HELMS, Hinrich ; KÄMPER, Claudia ; KRÄCK, Jan: Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) Berichtsteil „TREMOD-MM / Umweltbundesamt. 2020. – Forschungsbericht
- [38] LINK, Heike ; GAUS, Dennis ; EISENMANN, Christine ; KOEHLER, Katja ; SCHULZ, Angelika ; SEIFFERT, Isabel: *Verkehr in Zahlen 2022/2023 - 51. Jahrgang*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Verkehrsforschung - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e.V. (DIW), Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022
- [39] KLUTH, Tobias ; RUDOLF, Alexandra: *Verkehrsprognose 2040 Teil 2: Wirtschafts- und Verkehrsentwicklungsprognose 2040*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2022
- [40] Statistisches Bundesamt: *Demografischer Wandel, Mitten im demografischen Wandel*, https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/_inhalt.html#, Erreicht am 24.10.2024
- [41] MANN, Dr. G. ; GOHLKE, Rebecca ; HAASE, Daniel ; ET.AL.: BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2023 - Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. In: *BuGG - Bundesverband Gebäude Grün e.V.* (2023)
- [42] Zahl der Woche Nr. 11 vom 12. März 2024, Flächennutzung, Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst jeden Tag durchschnittlich um 52 Hektar https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2024/PD24_11_p002.html, Erreicht am 28.08.2024
- [43] HELFER, Martin: Aerodynamische Außengeräusche von Automobilen. In: *Ingenieurspiegel* (2013)
- [44] Amtsblatt der Europäischen Union: *Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates - Über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG/ L158/163*. Ausgabe 2014
- [45] VERHEIJEN, Edwin ; JABBEN, Jan: Effect of electric cars on traffic noise and safety / National Institute for Public Health and the Environment. 2010. – Forschungsbericht
- [46] Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen (FZ-13) Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*. 2024
- [47] GESELLSCHAFT FÜR INTEGRIERTE KOMMUNIKATIONSFORSCHUNG: *Shopping Report - Handels-Werbung in Zeiten des „new normal“ Aktuelle Erkenntnisse aus den Studien b4p, b4p trends und b4t*. 2021. – Forschungsbericht
- [48] Transport - Die Zeitung für den Güterverkehr: *KEP: DHL und Ford beschleunigen Elektrifizierung der Transporter-Flotte*, <https://transport-online.de/news/kep-dhl-und-ford-beschleunigen-elektrifizierung-der-transporter-flotte-78701.html>, Erreicht am 6.10.2024
- [49] FALTENBACHER, Dr. M. ; BOPP, Julian ; KUPFERSCHMID, Stefan: *Projektübersicht 2020/2021 Zero Emission Busse in Deutschland. Im Rahmen der Programmbegleitforschung Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2021

- [50] DOUGLAS, Martyn: *Klimaschutzinstrumente im Verkehr - Hebel zur Gestaltung eines treibhausgasneutralen und umweltschonenden Güterverkehrs*. Für Mensch und Umwelt - Umweltbundesamt, 2022
- [51] GÖCKELER, Dr. K. ; STEINBACH, Inia ; GÖRZ, Wolf K. ; HACKER, Florian ; BLANCK, Ruth ; MOTTSCHALL, Moritz: *StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs*. Öko-Insitut e.V., 2023
- [52] Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen (FZ-13) Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*. 2020
- [53] WOLTER, Sebastian ; OTTELÉ, Mark: Betrachtungen zum ökologischen Nutzen moderner Fassadenbegrünungen. In: *3. FBB-Symposium Fassadenbegrünung 2010, Vortragsreihe zu Themen der Fassadenbegrünung*, 2010
- [54] MANN, Dr. G. ; LANDWEHR, Rebecca: BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2024 Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. In: *BuGG - Bundesverband Gebäude Grün e. V.* (2024)
- [55] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2714 VDI-Richtlinien, Schallausbreitung im Freien*. 1988
- [56] YANG, Wonyoung ; JEON, Jin Y.: Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. In: *Building and Environment* 182 (2020), 107121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121>. – ISSN 0360–1323
- [57] CONNELLY, Maureen ; HODGSON, Murray: Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs. In: *Building and Environment* Volume 92 (2015), S. 335–346. – ISSN 0360–1323
- [58] WONG, Nyuk H. ; TAN, Alex Yong K. ; TAN, Puay Y. ; CHIANG, Kelly ; WONG, Ngian C.: Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. In: *Building and Environment* 45 (2010), Nr. 2, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>
- [59] THOMAZELLI, Rodolfo ; CAETANO, Fernando D. N. ; BERTOLI, Stelamaris R.: Acoustic properties of green walls: Absorption and insulation. In: *Acoustical Society of America-Proceedings of Meetings on Acoustics* 28 (2017), 05, Nr. 1, 015017. <https://doi.org/10.1121/2.0000426>. – ISSN 1939–800X
- [60] CHANG, Lan-Ting ; CHANG, Feng-Cheng: Study of Living Wall Systems' (LWSs) Support system for improving LWSs Life cycle performance and noise reduction potential. In: *Building and Environment* 216 (2022), 109007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109007>. – ISSN 0360–1323
- [61] WIRTH, Dr. H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. In: *Fraunhofer ISE* (2025)
- [62] Bundesrepublik Deutschland: *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023) 2014*. – zuletzt geändert am 23. Oktober 2024
- [63] Kredit Nr.270, Erneuerbare Energien – Standard Der Förderkredit für Strom und Wärme , www.kfw.de, Erreicht am 24.02.2024
- [64] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ: Neue Langfristszenarien für die Energiewende, Schlagrichter der Wirtschaftspolitik S.14-S.18. 2024. – Forschungsbericht
- [65] PILLAT, Juliane: *Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen*, Universität Stuttgart, Diss., 2014
- [66] Umweltbundesamt: *Siedlungs- und Verkehrsfläche, Anhaltender Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke* <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke->, Erreicht am 6.10.2024
- [67] Deutscher Bundestag, 20.Wahlperiode, Drucksache 20/12650: *Unterrichtung durch die Bundesregierung - Transformationsbericht der Bundesregierung zum Bereich Nachhaltiges Bauen und Verkehrswende – Herausforderungen und Wege der Transformation mit Blick auf die*

Stadtentwicklung, den Bau- und Bauwerksbereich und die nachhaltige Gestaltung der Mobilität. 2024

- [68] Statistisches Bundesamt: *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung* <https://www.destatis.de/>. 2021
- [69] DISTELKAMP, Martin ; GROSSMANN, Anett ; HOHMANN, Frank ; LUTZ, Christian ; ULRICH, Philip ; WOLTER, Marc I.: *PANTA RHEI REGIO Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen.* Econstor, ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft, 2009
- [70] PULS, Thomas ; WENDT, Jan: Richtgeschwindigkeit dominiert: Ergebnisse einer IW-Analyse zu Verkehr und Geschwindigkeit auf Autobahnen in NRW. In: *IW-Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung* 51 (2025), Nr. 4, 115-136. <https://hdl.handle.net/10419/313853>. – ISSN 1864–810X
- [71] RENTERGHEM, Timothy V. ; HORNIKX, Maarten ; FORSSEN, Jens ; BOTTELDOOREN, Dick: The potential of building envelope greening to achieve quietness. In: *Building and Environment* Volume 61 (2013), 34-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.001>
- [72] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau): *DIN EN 1793-5, Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 5: Produktspezifische Merkmale – Schallabsorption in gerichteten Schallfeldern.* 2023
- [73] EGGERS, Jan-Bleicke ; BEHNISCH, Martin ; EISENLOHR, Johannes ; POGELTSCH, Hanna ; PHUNG, Windy-Fook ; MUENZINGER, Markus ; FERRARA, Claudio ; KUHN, Tilmann: PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. In: *Research Gate, 35.PV-Symposium* (2020)
- [74] KOEHLER, Mark ; BRAUN, Alassane ; CZIRWITZKY, Korbinian ; BRANDSTÄTT, Peter: Klimaneutraler Lärmschutz Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken. In: *Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP* (2022)
- [75] Umweltbundesamt: *Erneuerbare Energien - Photovoltaik-Freiflächenanlagen.* – <https://www.umweltbundesamt.de>, Erreicht am 24.02.2024

Anhang A

Einflussmatrix

Wirkung von ↓ auf →	Bevölkerungswachstum	Altersstruktur – Erwerbsfähigkeit	Immigration – Zuwanderung	Bruttoinlandsprodukt (BIP)	BIP/Kopf	Virtuelles Arbeiten	Online Handel	Multinationale Organisation	Umweltbewusstsein	Multimodalität	Effizienz und Elektrifizierung	Abbau klimaschädlicher Subventionen	Geschwindigkeitsreduzierung	Technische Innovationen	Cyberspace	Materialtechnologie	Gerechte Raumverteilung	Stadt der kurzen Wege	Smart City	Grüne Stadt	AS
Bevölkerungswachstum		3	1	3	3	2	3	2	2	3	2	0	0	2	2	2	1	1	1	1	34
Altersstruktur – Erwerbsfähigkeit	1		2	3	3	3	3	2	2	3	1	0	1	3	3	3	1	1	2	1	38
Immigration – Zuwanderung	3	3		3	3	2	3	3	2	3	1	0	1	2	2	2	1	1	1	1	37
Bruttoinlandsprodukt (BIP)	3	3	3		3	0	1	1	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	48
BIP/Kopf	3	2	3	3		0	2	1	3	3	3	2	1	3	3	3	3	3	3	3	47
Virtuelles Arbeiten	1	1	2	2	2		1	2	2	3	2	2	1	3	3	2	1	1	2	2	35
Online Handel	1	1	2	3	3	2		1	2	2	1	1	0	2	3	1	0	0	0	0	25
Multinationale Organisation	3	3	3	3	3	1	1		3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	52
Umweltbewusstsein	0	0	1	2	2	2	2	2		3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	42
Multimodalität	1	3	3	2	2	2	2	2	3		2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	37
Effizienz und Elektrifizierung	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1		3	0	2	0	2	2	3	3	2	32
Abbau klimaschädlicher Subventionen	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3	3		0	2	1	2	0	0	3	2	28
Geschwindigkeitsreduzierung	0	0	0	0	0	2	2	0	2	2	0	0		0	0	0	0	3	2	1	14
Technische Innovationen	2	2	2	3	3	3	3	2	1	3	3	3	2		3	3	0	1	3	1	43
Cyberspace	1	2	2	3	3	3	3	1	2	3	3	3	0	3		3	0	0	2	1	38
Materialtechnologie	1	2	2	3	3	2	2	1	1	3	3	3	2	3	1		1	3	2	2	38
Gerechte Raumverteilung	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	2	1	1	0	0	0	1	1	2	2	16
Stadt der kurzen Wege	0	0	1	0	0	2	2	1	1	2	2	1	1	0	0	0	2		2	1	18
Smart City	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2	2	1	2	3	3		3	35
Grüne Stadt	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2	2	1	2	2	1	2		31
PS	24	29	33	38	37	33	37	26	38	51	43	36	23	39	33	37	27	30	41	33	

Tabelle A.1: Einflussmatrix

0 = kein Einfluss, 1 = geringerer Einfluss, 2 = starker Einfluss, 3 = sehr starker Einfluss (www.exelricks.de, erreicht am 30.12.2023)

Anhang B

Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke 2050

B.1 Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen

Basisjahr 2020	Fahrleistung	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		57,5	1,73	2,88	52,9
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				3,44
Pkw	93,5 %				49,46
Bus	4,7 %		0,22		
Krafträder	20,3 %			0,93	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		1,51	1,94	

Tabelle B.1: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h

Basisjahr 2020	Fahrleistung	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		10,00	0,50	0,60	8,90
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				0,58
Pkw	93,5 %				8,32
Bus	4,7 %		0,05		
Krafträder	20,3 %			0,22	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		0,45	0,38	

Tabelle B.2: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				6,42	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		2,82	3,62		
Bus	+4,7 %		0,23			
Personenverkehr	+0,65 %			0,94	49,78	
Verkehrsstärke		63,81	3,05	4,56	56,20	1111,04
vgl. 2020-2050		+11 %	+76 %	+59 %	+6 %	+11,11 %

Tabelle B.3: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				1,08	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		0,84	0,70		
Bus	+4,7 %		0,05			
Personenverkehr	+0,65 %			0,23	8,38	
Verkehrsstärke		11,28	0,89	0,93	9,46	1111,04
vgl. 2020-2050		+13 %	+78 %	+55 %	+6 %	+11,11 %

Tabelle B.4: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,26	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		2,31	2,97		
Bus	+19,5 %		0,26			
Personenverkehr	-8,84 %			0,85	45,11	
Verkehrsstärke		56,76	2,57	3,82	50,37	988,15
vgl. 2020-2050		-1 %	+49 %	+33 %	-5 %	-1,19 %

Tabelle B.5: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,89	
Güterverkehr	+53,0 %		0,69	0,58		
Bus	+19,5 %		0,06			
Personenverkehr	-8,84 %			0,20	7,59	
Verkehrsstärke		10,00	0,75	0,78	8,47	988,15
vgl. 2020-2050		0 %	+50 %	+30 %	-5 %	-1,19 %

Tabelle B.6: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen außerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,26	
Güterverkehr	+53,0 %		2,31	2,97		
Bus	+61,0 %		0,35			
Personenverkehr	-35,38 %			0,60	31,95	
Verkehrsstärke		43,44	2,66	3,57	37,21	757,09
vgl. 2020-2050		-24 %	+54 %	+24 %	-30 %	-24,29 %

Tabelle B.7: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,89	
Güterverkehr	+53,0 %		0,69	0,58		
Bus	+61,0 %		0,08			
Personenverkehr	-35,38 %			0,14	5,38	
Verkehrsstärke		7,75	0,77	0,72	6,26	757,09
vgl. 2020-2050		-22 %	+54 %	+20 %	-30 %	-24,29 %

Tabelle B.8: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Landes-, Kreis- und Gemeindeverbindungsstraßen innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

B.2 Gemeindestraßen

Basisjahr 2020	Fahrleistung	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		28,75	0,86	1,15	26,74
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				1,74
Pkw	93,5 %				25,00
Bus	4,7 %		0,09		
Krafträder	20,3 %			0,41	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		0,77	0,74	

Tabelle B.9: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 500 Kfz/24h

Basisjahr 2020	Fahrleistung	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		5,00	0,15	0,20	4,65
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				0,30
Pkw	93,5 %				4,35
Bus	4,7 %		0,02		
Krafträder	20,3 %			0,07	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		0,13	0,13	

Tabelle B.10: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 500 Kfz/24h

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				3,24	
Güterverkehr	+86,6 %		1,43	1,38		
Bus	+4,7 %		0,10			
Personenverkehr	+0,65 %			0,41	25,16	
Verkehrsstärke		31,72	1,53	1,79	28,40	551,86
vgl. 2020-2050		+10 %	+78 %	+56 %	+6 %	+10,37 %

Tabelle B.11: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				0,56	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		0,25	0,24		
Bus	+4,7 %		0,02			
Personenverkehr	+0,65 %			0,07	4,38	
Verkehrsstärke		5,52	0,27	0,31	4,94	551,86
vgl. 2020-2050		+10 %	+78 %	+56 %	+6 %	+10,37 %

Tabelle B.12: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				2,66	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		1,18	1,14		
Bus	+61,0 %		0,15			
Personenverkehr	-35,38 %			0,26	16,15	
Verkehrsstärke		21,54	1,33	1,40	18,81	374,51
vgl. 2020-2050		-25 %	+54 %	+22%	-30 %	-25,10 %

Tabelle B.13: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,46	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		0,20	0,20		
Bus	+61,0 %		0,03			
Personenverkehr	-35,38 %			0,04	2,81	
Verkehrsstärke		3,74	0,23	0,24	3,27	374,51
vgl. 2020-2050		-25 %	+54 %	+22 %	-30 %	-25,10 %

Tabelle B.14: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Gemeindestraßen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 500 Kfz/24h)

B.3 Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen

Basisjahr 2020	Fahrleistung	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		555,00	16,65	61,05	477,30
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				31,02
Pkw	93,5 %				446,28
Bus	4,7 %		3,65		
Krafträder	20,3 %			15,77	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		13,00	45,28	

Tabelle B.15: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum mit einer DTV von 10000 Kfz/24h

Basisjahr 2020	Fahrleistung	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		140,00	14,00	35,00	91,00
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				5,92
Pkw	93,5 %				85,08
Bus	4,7 %		2,30		
Krafträder	20,3 %			9,95	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		11,70	25,05	

Tabelle B.16: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 10000 Kfz/24h

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				57,89	
Güterverkehr	+86,6 %		24,25	84,89		
Bus	+4,7 %		3,82			
Personenverkehr	+0,65%			15,88	449,18	
Verkehrsstärke		635,51	28,08	100,36	507,07	11589,52
vgl. 2020-2050		+15 %	+69 %	+64 %	+6 %	+15,90 %

Tabelle B.17: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				11,04	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		21,83	46,75		
Bus	+4,7 %		2,41			
Personenverkehr	+0,65 %			10,01	85,64	
Verkehrsstärke		177,67	24,24	56,76	96,68	11589,52
vgl. 2020-2050		+27 %	+73 %	+62 %	+6 %	+15,90 %

Tabelle B.18: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				47,47	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		19,89	69,27		
Bus	+19,5 %		4,36			
Personenverkehr	-8,84 %			14,39	407,00	
Verkehrsstärke		562,38	24,25	83,66	454,47	10235,68
vgl. 2020-2050		+1 %	+49 %	+37 %	-5 %	+2,36 %

Tabelle B.19: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				9,05	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+53,0 %		17,90	38,33		
Bus	+19,5 %		2,75			
Personenverkehr	-8,84 %			9,07	77,60	
Verkehrsstärke		154,70	20,65	47,40	86,65	10235,68
vgl. 2020-2050		+10 %	+47 %	+35 %	-5 %	+2,36 %

Tabelle B.20: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Autobahnen für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 10000 Kfz/24h)

B.4 Bundesstraßen

Basisjahr 2020	Fahrleistung	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		57,50	1,73	4,03	51,75
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				3,36
Pkw	93,5 %				48,39
Bus	4,7 %		0,28		
Krafträder	20,3 %			1,17	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		1,45	2,86	

Tabelle B.21: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Tageszeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h

Basisjahr 2020	Fahrleistung	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h			
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw
Standartwert (RLS-19)		10,00	0,70	1,30	8,00
Lkw bis 3,5 t zGM	6,5 %				0,52
Pkw	93,5 %				7,48
Bus	4,7 %		0,09		
Krafträder	20,3 %			0,41	
Lkw über 3,5 t zGM	75 %		0,61	0,89	

Tabelle B.22: Beispiel Basisjahr 2020: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Nachtzeitraum mit einer DTV von 1000 Kfz/24h

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				6,28	DTV in Kfz/24h
Güterverkehr	+86,6 %		2,72	5,34		
Bus	+4,7 %		0,28			
Personenverkehr	+0,65 %			1,17	48,70	
Verkehrsstärke		64,49	3,00	6,51	54,98	1126,16
vgl. 2020-2050		+12 %	+74 %	+62 %	+6 %	+12,62 %

Tabelle B.23: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Referenzszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+86,6 %				0,97	
Güterverkehr	+86,6 %		1,13	1,67		
Bus	+4,7 %		0,10			
Personenverkehr	+0,65 %			0,41	7,53	
Verkehrsstärke		11,81	1,23	2,08	8,50	1126,16
vgl. 2020-2050		+18 %	+76 %	+60 %	+6 %	+12,62 %

Tabelle B.24: Beispiel Referenzszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,15	
Güterverkehr	+53,0 %		2,23	4,37		
Bus	+19,5 %		0,32			
Personenverkehr	-8,84 %			1,06	44,13	
Verkehrsstärke		57,26	2,55	5,43	49,28	999,33
vgl. 2020-2050		0 %	+48 %	+35 %	-5 %	-0,07 %

Tabelle B.25: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße außerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,80	
Güterverkehr	+53,0 %		0,93	1,37		
Bus	+19,5 %		0,11			
Personenverkehr	-8,84 %			0,37	6,82	
Verkehrsstärke		10,40	1,04	1,74	7,62	999,33
vgl. 2020-2050		4 %	+49 %	+34 %	-5 %	-0,07 %

Tabelle B.26: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße außerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	tags (06.00-22.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				5,15	
Güterverkehr	+53,0 %		2,23	4,37		
Bus	+61,0 %		0,43			
Personenverkehr	-35,38 %			0,76	31,25	
Verkehrsstärke		44,19	2,66	5,13	36,40	773,75
vgl. 2020-2050		-23 %	+54 %	+27 %	-30 %	-22,62 %

Tabelle B.27: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße innerorts für den Tageszeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Stabilitätsszenario 2050	Prognose vgl. 2020-2050	nachts (22.00-06.00 Uhr) in Kfz/h				DTV in Kfz/24h
		M	Lkw-1	Lkw-2	Pkw	
Güterverkehr	+53,0 %				0,80	
Güterverkehr	+53,0 %		0,93	1,37		
Bus	+61,0 %		0,15			
Personenverkehr	-35,38 %			0,26	4,83	
Verkehrsstärke		8,34	1,08	1,63	5,63	773,75
vgl. 2020-2050		-17 %	+54 %	+25 %	-30 %	-22,62 %

Tabelle B.28: Beispiel Stabilitätsszenario 2050: Stündliche Verkehrsstärke auf Bundesstraße innerorts für den Nachtzeitraum und der Vergleich zu 2020 (mit einer DTV von 1000 Kfz/24h)

Anhang C

Verkehrsstärke auf Autobahnen 2050

Geschwindigkeit v_{FzG} der Pkw bzw. Lkw-1/ Lkw-2	Anteil (%) tags	Anteil (%) nachts	$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ in dB
$\geq 0km/h < 10km/h$	0,03	0,02	88,49
$\geq 10km/h < 20km/h$	0,13	0,09	91,01
$\geq 20km/h < 30km/h$	0,24	0,16	94,49
$\geq 30km/h < 40km/h$	0,33	0,23	97,70
$\geq 40km/h < 50km/h$	0,40	0,27	100,43
$\geq 50km/h < 60km/h$	0,42	0,28	102,75
$\geq 60km/h < 70km/h$	0,57	0,39	104,74
$\geq 70km/h < 80km/h$	1,32	0,90	106,49
$\geq 80km/h < 90km/h$	3,65	2,49	108,03
$\geq 90km/h < 100km/h$	8,41	5,73	109,42
$\geq 100km/h < 110km/h$	15,21	10,37	110,68
$\geq 110km/h < 120km/h$	49,07	33,47	111,83
Lkw – 1 (80km/h)	4,42	13,64	113,55
Lkw – 2 (80km/h)	15,79	31,95	115,78
Summe	100,0 %	100,0 %	-
L'_w (tags / nachts)	107,6 dB	100,4 dB	-

Tabelle C.1: Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum bei Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungsspiegel [70]

Geschwindigkeit v_{FzG} der Pkw bzw. Lkw-1/ Lkw-2	Anteil (%) tags	Anteil (%) nachts	$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ in dB
$\geq 0\text{km/h} < 10\text{km/h}$	0,03	0,02	88,49
$\geq 10\text{km/h} < 20\text{km/h}$	0,13	0,09	91,01
$\geq 20\text{km/h} < 30\text{km/h}$	0,24	0,16	94,49
$\geq 30\text{km/h} < 40\text{km/h}$	0,33	0,23	97,70
$\geq 40\text{km/h} < 50\text{km/h}$	0,40	0,27	100,43
$\geq 50\text{km/h} < 60\text{km/h}$	0,42	0,28	102,75
$\geq 60\text{km/h} < 70\text{km/h}$	0,57	0,39	104,74
$\geq 70\text{km/h} < 80\text{km/h}$	1,32	0,90	106,49
$\geq 80\text{km/h} < 90\text{km/h}$	3,65	2,49	108,03
$\geq 90\text{km/h} < 100\text{km/h}$	8,41	5,73	109,42
$\geq 100\text{km/h} < 110\text{km/h}$	15,21	10,37	110,68
$\geq 110\text{km/h} < 120\text{km/h}$	18,85	12,86	111,83
$\geq 120\text{km/h} < 130\text{km/h}$	15,41	10,51	112,89
$\geq 130\text{km/h} < 140\text{km/h}$	8,38	5,72	113,87
$\geq 140\text{km/h} < 150\text{km/h}$	3,81	2,60	114,79
$\geq 150\text{km/h} < 160\text{km/h}$	1,59	1,09	115,64
$\geq 160\text{km/h} < 170\text{km/h}$	0,60	0,41	116,45
$\geq 170\text{km/h} < 180\text{km/h}$	0,22	0,15	117,21
$\geq 180\text{km/h} < 190\text{km/h}$	0,10	0,07	117,92
$\geq 190\text{km/h} < 200\text{km/h}$	0,05	0,03	118,60
$\geq 200\text{km/h} < 210\text{km/h}$	0,03	0,02	119,25
$\geq 210\text{km/h} < 220\text{km/h}$	0,02	0,01	119,87
$\geq 220\text{km/h} < 230\text{km/h}$	0,01	0,01	120,46
$\geq 230\text{km/h} < 240\text{km/h}$	0,004	0,002	121,03
$\geq 240\text{km/h} < 250\text{km/h}$	0,001	0,001	121,57
Lkw – 1 (80km/h)	4,42	13,64	113,55
Lkw – 2 (80km/h)	15,79	31,95	115,78
Summe	100,0 %	100,0 %	-
L'_w (tags / nachts)	108,2 dB	101,0 dB	-

Tabelle C.2: Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum ohne Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen im Referenzszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]

Geschwindigkeit v_{FzG} der Pkw bzw. Lkw-1/ Lkw-2	Anteil (%) tags	Anteil (%) nachts	$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ in dB
$\geq 0km/h < 10km/h$	0,03	0,02	88,49
$\geq 10km/h < 20km/h$	0,13	0,09	91,01
$\geq 20km/h < 30km/h$	0,25	0,17	94,49
$\geq 30km/h < 40km/h$	0,34	0,23	97,70
$\geq 40km/h < 50km/h$	0,41	0,28	100,43
$\geq 50km/h < 60km/h$	0,42	0,29	102,75
$\geq 60km/h < 70km/h$	0,57	0,40	104,74
$\geq 70km/h < 80km/h$	1,33	0,92	106,49
$\geq 80km/h < 90km/h$	3,70	2,56	108,03
$\geq 90km/h < 100km/h$	8,51	5,90	109,42
$\geq 100km/h < 110km/h$	15,41	10,68	110,68
$\geq 110km/h < 120km/h$	49,70	34,45	111,83
<i>Lkw – 1 (80km/h)</i>	4,31	13,35	113,55
<i>Lkw – 2 (80km/h)</i>	14,88	30,64	115,78
Summe	100,0 %	100,0 %	-
L'_w (tags / nachts)	107,1 dB	99,9 dB	-

Tabelle C.3: Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum bei Einführung eines generellen Tempolimits von 120 km/h auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]

Geschwindigkeit v_{FzG} der Pkw bzw. Lkw-1/ Lkw-2	Anteil (%) tags	Anteil (%) nachts	$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ in dB
$\geq 0\text{km/h} < 10\text{km/h}$	0,03	0,02	88,49
$\geq 10\text{km/h} < 20\text{km/h}$	0,13	0,09	91,01
$\geq 20\text{km/h} < 30\text{km/h}$	0,25	0,17	94,49
$\geq 30\text{km/h} < 40\text{km/h}$	0,34	0,23	97,70
$\geq 40\text{km/h} < 50\text{km/h}$	0,41	0,28	100,43
$\geq 50\text{km/h} < 60\text{km/h}$	0,42	0,29	102,75
$\geq 60\text{km/h} < 70\text{km/h}$	0,57	0,40	104,74
$\geq 70\text{km/h} < 80\text{km/h}$	1,33	0,92	106,49
$\geq 80\text{km/h} < 90\text{km/h}$	3,70	2,56	108,03
$\geq 90\text{km/h} < 100\text{km/h}$	8,51	5,90	109,42
$\geq 100\text{km/h} < 110\text{km/h}$	15,41	10,68	110,68
$\geq 110\text{km/h} < 120\text{km/h}$	19,09	13,23	111,83
$\geq 120\text{km/h} < 130\text{km/h}$	15,61	10,82	112,89
$\geq 130\text{km/h} < 140\text{km/h}$	8,49	5,89	113,87
$\geq 140\text{km/h} < 150\text{km/h}$	3,85	2,67	114,79
$\geq 150\text{km/h} < 160\text{km/h}$	1,61	1,12	115,64
$\geq 160\text{km/h} < 170\text{km/h}$	0,61	0,42	116,45
$\geq 170\text{km/h} < 180\text{km/h}$	0,23	0,16	117,21
$\geq 180\text{km/h} < 190\text{km/h}$	0,10	0,07	117,92
$\geq 190\text{km/h} < 200\text{km/h}$	0,05	0,03	118,60
$\geq 200\text{km/h} < 210\text{km/h}$	0,03	0,02	119,25
$\geq 210\text{km/h} < 220\text{km/h}$	0,02	0,01	119,87
$\geq 220\text{km/h} < 230\text{km/h}$	0,01	0,01	120,46
$\geq 230\text{km/h} < 240\text{km/h}$	0,004	0,002	121,03
$\geq 240\text{km/h} < 250\text{km/h}$	0,001	0,001	121,57
Lkw – 1 (80km/h)	4,31	13,35	113,55
Lkw – 2 (80km/h)	14,88	30,64	115,78
Summe	100,0 %	100,0 %	-
L'_w (tags / nachts)	107,7 dB	100,5 dB	-

Tabelle C.4: Anteile der Pkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Anteile der Lkw-1 und Lkw-2 für den Tages- und Nachtzeitraum ohne Einführung eines generellen Tempolimits auf Autobahnen im Stabilitätsszenario 2050 sowie die längenbezogene Schalleistungspegel [70]

