

TEXTE

48/2026

Anhang

Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland

Methodikband

von:

Tobias Wagner, Dr. Klaus Hennenberg
Öko-Institut e.V., Darmstadt

Dr. Jens-Martin Gutsche
Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR, Hamburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 48/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 15 103 0

FB001994

Anhang

Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in Deutschland

Methodikband

von

Tobias Wagner, Dr. Klaus Hennenberg
Öko-Institut e.V., Darmstadt

Dr. Jens-Martin Gutsche
Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität
GbR, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR
Ruhrstraße 11
22761 Hamburg

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Nachhaltige Raumentwicklung, Umweltprüfungen
Detlef Grimski

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8237>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Vorbemerkung

Zwei neuere Publikationen aus dem Jahr 2025 enthalten projektrelevante Datenaktualisierungen, die zum Zeitpunkt der inhaltlichen Projektbearbeitung (Frühjahr 2022 – Sommer 2024) noch nicht vorlagen:

1. Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar aus dem Jahr 2025

Zentrale Parameter und Ansätze dieses Projekts basieren auf dem jährlich vom Umweltbundesamt herausgegebenen Nationalen Inventardokument / Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar. Grundlage für die Forschungsarbeiten war der zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung aktuelle Inventarbericht aus dem Jahr 2023 zum Treibhausgasinventar 1990 – 2021. Das aktuelle Nationale Inventardokument aus dem Jahr 2025 zum Treibhausgasinventar 1990 – 2023 berücksichtigt zusätzlich Daten aus der im Herbst 2024 veröffentlichten Bundeswaldinventur. Weiterhin ist eine Methodenänderung zur Modellierung des Kohlenstoffvorrats in mineralischen Böden in die Berechnung eingeflossen. Anders als in dem Nationalen Inventarbericht aus dem Jahr 2023, werden jetzt sowohl Wälder als auch Acker- und Grünlandflächen auf mineralischen Böden als kontinuierliche Kohlenstoffquellen modelliert. Wie sich diese veränderten Ansätze auf die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes auswirken, konnte nicht mehr betrachtet werden. Die weiteren Entwicklungen in der nationalen LULUCF-Modellierung gilt es daher genau zu beobachten.

2. Revision der Indikatorwerte 2020 bis 2022 für den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche durch das Statistische Bundesamt

Dieser Forschungsbericht bezieht sich an mehreren Stellen auf die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Indikatorwerte für den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Die Angaben zur Siedlungs- und Verkehrsfläche entstammen der amtlichen Flächenstatistik, die jährlich veröffentlicht wird. Für die Jahre 2020 bis 2022 hat das Statistische Bundesamt mit Pressemitteilung vom 5. August 2025 die Indikatorwerte außerplanmäßig revidiert. Das Statistische Bundesamt führt hierzu aus:

„Durch die Nacherfassung von Waldwegen durch die Vermessungsbehörden kam es zu großflächigen Umklassifizierungen von Vegetationsflächen zu Wegen (Bestandteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche), die erst 2023 berechnet werden konnten. Im Gegensatz zu neu erschlossenen bzw. angelegten Siedlungs- und Verkehrsflächen gehen Nacherfassungen bereits existierender Flächen nicht als Erhöhung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in die Indikatorberechnung ein. Aus diesem Grund wurden die Indikatorwerte neu berechnet: Für den Indikator „Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ wurde der gleitende Vierjahresdurchschnitt im Jahr 2020 (2017 bis 2020) um 1 Hektar pro Tag nach unten revidiert (bisher veröffentlichter Wert: +54 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +53 Hektar pro Tag). Für das Jahr 2021 (2018 bis 2021) sinkt der revidierte Indikatorwert um 2 Hektar pro Tag (bisher veröffentlichter Wert: +55 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +53 Hektar pro Tag). Die größte Revisionsdifferenz zeigt sich für das Jahr 2022 (2019 bis 2022) mit 3 Hektar pro Tag (bisher veröffentlichter Wert: +52 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +49 Hektar pro Tag).“

Alle Berechnungen des vorliegenden Projekts basieren auf den nicht revidierten Werten und sind im Forschungsbericht so dokumentiert. Auf die Größenordnung der Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen hat die Revision jedoch keine Auswirkungen.

Kurzbeschreibung: Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in Deutschland: Anhang: Methodikband.

Der vorliegende Bericht enthält detaillierte Beschreibungen und Erklärungen zu der Methodik, die den in Wagner et al. 2025 veröffentlichten Projektergebnissen (Ergebnisband) zu den Treibhausgaseinsparpotenzialen einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme zugrunde liegen. Der Bericht versteht sich als ergänzendes Material zum Ergebnisband. Leserinnen und Leser vom Ergebnisband sollen mithilfe des vorliegenden Berichts genauer nachvollziehen können, wie die Ergebnisse in Wagner et al. 2025 zustande kommen.

Abstract: Potential greenhouse gas savings from a reduced land take in Germany: Methodology volume.

This report contains detailed descriptions and explanations of the methodology underlying the project results published in Wagner et al. 2025 (results volume) on the potential greenhouse gas savings of reduced land take. The report is intended as supplementary material to the results volume. With the help of this report, readers of the results volume shall be able to understand more precisely how the results in Wagner et al. 2025 are obtained.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis.....	16
1 Hintergrund und Ziel	17
2 Modellierung der Flächenkulisse der Außenentwicklung	18
2.1 Flächenkulisse „vor“ und „nach“ der Flächenneuanspruchnahme pro Hektar Außenentwicklung	18
2.2 Differenzierung von zwei Bereichen der Flächenneuanspruchnahme	18
2.3 Flächenkulisse „vor der Flächenneuanspruchnahme“	19
2.3.1 Analyse der Umringe um die Siedlungsbereiche	19
2.3.2 Berücksichtigung von Inanspruchnahme-Wahrscheinlichkeiten anhand der realen Flächenneuanspruchnahme 2015-2020	22
2.3.2.1 Nutzungswahrscheinlichkeiten nach Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ (in zwei Szenarien).....	22
2.3.2.2 Nutzungswahrscheinlichkeiten nach mineralischem bzw. organischem Boden.....	25
2.3.2.3 Ergebnis für jede Gemeinde: Zusammensetzung des durchschnittlichen für eine Außenentwicklung (ohne außerörtliche Verkehrsflächen) neu in Anspruch genommenen Hektars Freiraumfläche	25
2.4 Flächenkulisse „nach der Flächenneuanspruchnahme“	26
2.4.1 Zuordnung jeder Gemeinde zu zwei Gemeindetypen.....	26
2.4.1.1 Gemeindetyp „Nutzungen“	27
2.4.1.2 Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	29
2.4.2 Durchschnittlicher Anteil der Gebäudeüberdeckung in Abhängigkeit von der Nutzung und vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	31
2.4.3 Durchschnittlicher Anteil der restlichen Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ in Abhängigkeit der Gebäudeüberdeckung und der Nutzung.....	33
2.4.4 Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich in Abhängigkeit der Gebäudeüberdeckung und der Nutzung	42
2.5 Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich: Gemeindespezifische Nutzungsänderungsmatrizen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme.....	44
2.5.1 Durchschnittliche Nutzungsänderungen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich nach Gemeinde.....	44
2.5.2 Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich nach Gemeinde.....	46

2.6	Außerörtliche Verkehrsflächen	47
2.6.1	Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	47
2.6.2	Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“	48
2.6.3	Durchschnittliche Nutzungsänderungen pro Hektar bundesweit neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche für außerörtliche Verkehrsflächen	49
2.6.4	Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar bundesweit neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche für außerörtliche Verkehrsflächen	52
3	Modellierung der Flächenkulisse der Innenentwicklung	53
3.1	Gesuchte Größe: Flächennutzungsänderungen durch eine Innenentwicklung, die einen Hektar Außenentwicklung ersetzt	53
3.2	Umfang der durch Innenentwicklung zu ersetzenden Bauvolumina pro Hektar Außenentwicklung	53
3.2.1	Nutzungen mit Gebäuden (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe)	53
3.2.2	Nutzungen ohne Gebäude (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, sonstige Siedlungsfreiflächen)	56
3.2.3	Gemeindespezifisches Volumen der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung	57
3.3	Gemeindespezifische Struktur der Innenentwicklung	57
3.3.1	Formen der Innenentwicklung	57
3.3.2	Zusätzliche Bauvolumina pro Hektar Innenentwicklung	58
3.3.3	Gemeindespezifische Anteile der Innenentwicklungsformen	61
3.3.3.1	Vorgehen bei der Schätzung der Anteile der Innenentwicklungsformen am Gesamtvolumen der Innenentwicklung	62
3.3.3.2	Zwei Szenarien zur Struktur der Innenentwicklung	63
3.3.3.3	Schätzwerte zum Anteil der Innenentwicklungsformen am Gesamtvolumen der Innenentwicklung	63
3.4	Treibhausgasrelevante Eingriffe der Innenentwicklung in Boden und Vegetation	67
3.4.1	Flächennutzungsänderungen	67
3.4.2	Verlust an Bestandsbäumen	72
4	Treibhausgaswirkungen aus der Nutzungsänderung von einem Hektar einer Vorhernutzung in einen Hektar einer Nachhernutzung (LULUCF)	74
4.1	Systemgrenze und Effekte	74
4.2	Angesetzte Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungen	76
4.3	Effekt 1: Verlust der vorherigen Vegetation	78
4.4	Effekt 2: Abschieben und Auskoffern des Bodens	80

4.5	Effekt 3: Entgangene Einbindung im Wald	81
4.6	Effekt 4: Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation	82
4.7	Effekt 5: Naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen	82
4.8	Effekt 6: Veränderung der kontinuierlichen Treibhausgasemissionen aus trockengelegten organischen Böden	84
4.9	Zusammenfassung	86
5	Treibhausgaswirkungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (LULUCF).....	87
5.1	Treibhausgaswirkung pro durchschnittlichem Hektar Außenentwicklung.....	87
5.1.1	Gemeindespezifische Treibhausgaswirkung.....	87
5.1.2	Gewichtete Mittelwerte für Landkreise, Länder und Deutschland insgesamt.....	88
5.2	Treibhausgaswirkung einer zusätzlichen Innenentwicklung pro durchschnittlichem vermiedenem Hektar Außenentwicklung.....	89
5.2.1	Gemeindespezifische Treibhausgaswirkung.....	89
5.2.2	Gewichtete Mittelwerte für Landkreise, Länder und Deutschland insgesamt.....	90
5.3	Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen	91
5.4	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche und pro Kubikmeter Baumasse	92
6	Bundesweiter Vergleich der Treibhausgaswirkung von Szenarien der Siedlungsentwicklung (LULUCF).....	98
6.1	Szenarien der Siedlungsentwicklung	98
6.2	Absolute Treibhausgaswirkungen der Siedlungsentwicklung in den drei Szenarien.....	99
7	Treibhausgaswirkungen aus der Errichtung und Nutzung von technischer Infrastruktur und Gebäuden	100
7.1	Errichtung von technischer Infrastruktur.....	100
7.1.1	Systemgrenze.....	100
7.1.2	Bestimmung des Umfangs der technischen Infrastruktur.....	100
7.1.3	Bestimmung der Treibhausgasemissionen pro Infrastruktureinheit.....	103
7.2	Errichtung von Gebäuden	104
7.2.1	Systemgrenze.....	104
7.2.2	Bestimmung der errichteten Gebäudegeschossfläche.....	104
7.2.3	Bestimmung der Treibhausgasemissionen pro m ² Gebäudegeschossfläche	105
7.3	Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden.....	106
7.3.1	Nutzung von Infrastruktur	107
7.3.2	Nutzung von Gebäuden	108

8	Quellenverzeichnis	110
---	--------------------------	-----

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zusammenfassung der bestehenden Gebäude *) zu Gebäudeclustern **)19
Abbildung 2:	Ringe um bestehende Gebäudecluster, Radius je nach Größe des Gebäudeclusters *)20
Abbildung 3:	Verschnitt mit Gemeindegrenzen *)20
Abbildung 4:	Verschnitt mit räumlichen Daten des Bundesamtes für Naturschutz zur Lage von Schutzgebieten *)21
Abbildung 5:	Verschnitt mit räumlichen Daten des Greifswald Moor Centrum zur Lage organischer Böden *)21
Abbildung 6:	Bilanzierung der gemeindespezifischen Flächenanteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“22
Abbildung 7:	Beispielhafte Anwendung der Nutzungswahrscheinlichkeit auf die Gemeinde Ebstorf24
Abbildung 8:	Zuweisung von zwei Gemeindetypen („Nutzungen“ und „Städtebauliche Dichte“) zu jeder Gemeinde in Deutschland27
Abbildung 9:	Herleitung des Gemeindetyps „Nutzungen“28
Abbildung 10:	Flächenanteile der Nutzungen an der realen Flächenneuanspruchnahme 2015-2020 des Gemeindetyps „Nutzungen“29
Abbildung 11:	Zuordnung der Gemeinden zu acht Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“30
Abbildung 12:	Steigende Geschossflächenzahl *) in Abhängigkeit des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“30
Abbildung 13:	Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Wohnbauflächen31
Abbildung 14:	Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Mischflächen.....31
Abbildung 15:	Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Flächen besonderer funktionaler Prägung32
Abbildung 16:	Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Industrie- und Gewerbeflächen32
Abbildung 17:	Exemplarische Illustration der Oberflächenklassifizierung von über 2.000 ha ATKIS-Siedlungsbereichen anhand von Luftbildern durch die Firma mundialis35
Abbildung 18:	Wohnbauflächen: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils36
Abbildung 19:	Flächen gemischter Nutzung: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils37
Abbildung 20:	Flächen besonderer funktionaler Prägung: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils38
Abbildung 21:	Industrie- und Gewerbeflächen: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils39

Abbildung 22:	Durchschnittliche Flächenanteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ pro Hektar Außenentwicklung nach Gemeindetyp „Nutzungen“ (Spalten) und „Städtebauliche Dichte“ (exemplarischer Gemeindetyp 1 oben und Gemeindetyp 8 unten)	41
Abbildung 23:	Bundesschnitt der Flächenanteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ pro Hektar Außenentwicklung	41
Abbildung 24:	Differenzierung der hohen Vegetation in Bäume und Hecken/Gehölze sowie Identifizierung der Anzahl von Einzelbäumen im Rahmen der Luftbildauswertung (gleicher Luftbildausschnitt wie in Abbildung 17)	42
Abbildung 25:	Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Bäume pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich (d. h. exklusive außerörtlicher Verkehrsflächen) nach Gemeindetyp „Nutzungen“ (Spalten) und „Städtebauliche Dichte“ (exemplarisch Gemeindetyp 1 oben und Gemeindetyp 8 unten).....	44
Abbildung 26:	Außerörtliche Verkehrsflächen: Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ (Luftbildauswertung).....	49
Abbildung 27:	Durchschnittliche Geschossflächenzahl (oben) bzw. Baumassenzahl (unten) unterschiedlicher Nutzungen, jeweils bezogen auf die Bruttofläche (Bruttobauland inklusive Erschließungs- und andere Nicht-Nettobauland-Flächen)	54
Abbildung 28:	Pro Hektar ersetzte Außenentwicklung im Innenbereich zu schaffende Geschossflächen bzw. Baumassen	56
Abbildung 29:	Pro Hektar ersetzte Außenentwicklung im Innenbereich zu schaffende Bodenflächen für Nutzungen (fast) ohne Gebäude	57
Abbildung 30:	Unterscheidung von acht Formen der Innenentwicklung.....	58
Abbildung 31:	Bezugsfläche = Bruttofläche: Was meint jeweils „ein Hektar Innenentwicklungsfläche“?	59
Abbildung 32:	Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Wohnen	60
Abbildung 33:	Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Mischnutzung	60
Abbildung 34:	Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Besondere funktionale Prägung	61
Abbildung 35:	Zuwachs der Baumassenzahl *) durch Innenentwicklung: Industrie und Gewerbe	61
Abbildung 36:	Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Geschossfläche: Wohnen und Mischnutzung.....	64
Abbildung 37:	Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Geschossfläche: Besondere funktionale Prägung.....	64
Abbildung 38:	Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Baumasse: Industrie und Gewerbe.....	65
Abbildung 39:	Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Bodenfläche: Plätze	66
Abbildung 40:	Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Bodenfläche: Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen	66

Abbildung 41:	Veränderung der Flächenüberdeckungsanteile durch die Innenentwicklungsformen: Wohnen.....	68
Abbildung 42:	Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Wohnen	69
Abbildung 43:	Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Mischnutzung	70
Abbildung 44:	Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Besondere funktionale Prägung.....	70
Abbildung 45:	Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Industrie und Gewerbe	71
Abbildung 46:	Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen.....	71
Abbildung 47:	Zusammensetzung der angesetzten durchschnittlichen Ausgleichsmaßnahme nach Zielbiotopen.....	84
Abbildung 48:	Screenshot aus dem Excel-basierten LULUCF Wirkungsrechner: Vergleich einer exemplarischen Planung mit den in diesem Kapitel hergeleiteten bundesweiten Durchschnittswerten, links: für Nutzungen „Wohnen“, „Mischfläche“ oder „besondere funktionale Prägung“ (Bezug: qm Geschossfläche), rechts: für Nutzung „Industrie und Gewerbe“ (Bezug: Kubikmeter Baumasse)	92
Abbildung 49:	Szenarien der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland in Hektar pro Tag	98
Abbildung 50:	Zusammenhang zwischen dem Bodenpreis und der Anzahl an Wohnungen in Neubauten.....	105
Abbildung 51:	Täglicher MIV-Aufwand in Personenkilometern von Bewohnerinnen und Bewohnern neu gebauter Wohnungen und Wohngebiete im Großraum Hamburg	107
Abbildung 52:	Reduktion der Verkehrsleistung durch unterschiedliche Siedlungsentwicklungen, Beispiel Hannover.....	108
Abbildung 53:	Vergleich der Energieeffizienz unterschiedlicher Gebäudetypen.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Herleitung von Nutzungswahrscheinlichkeiten der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	23
Tabelle 2:	Nutzungswahrscheinlichkeiten der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in zwei alternativen Szenarien	24
Tabelle 3:	Definition des Gemeindetyps „Nutzungen“ und Anzahl der jeweils zugeordneten Gemeinden in Deutschland	28
Tabelle 4:	Wohnbauflächen: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile	36
Tabelle 5:	Flächen gemischter Nutzung: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile	37
Tabelle 6:	Flächen besonderer funktionaler Prägung: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile	38
Tabelle 7:	Industrie- und Gewerbeflächen: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile	39

Tabelle 8:	In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile für Nutzungen ohne Differenzierung nach dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	40
Tabelle 9:	Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Bäume pro Hektar Außenentwicklung (Modellannahme auf Basis der vorstehenden Luftbildauswertung)	43
Tabelle 10:	Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Status Quo“).....	45
Tabelle 11:	Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Waldschutz).....	46
Tabelle 12:	Außerörtliche Verkehrsflächen: Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in zwei alternativen Szenarien der Vorhernutzung	47
Tabelle 13:	Nutzungsänderungsmatrix pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen (Vornutzungsszenario „Status Quo“)	50
Tabelle 14:	Nutzungsänderungsmatrix pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen (Vornutzungsszenario „Waldschutz“)	51
Tabelle 15:	Ersatzfaktoren „Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung“ für die Nutzungen mit Gebäuden	55
Tabelle 16:	Ersatzfaktoren „Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung“ für die Nutzungen ohne Gebäude.....	57
Tabelle 17:	Annahme zur Anzahl der pro Hektar Innenentwicklung gefälltten Bestandsbäume	72
Tabelle 18:	Überblick über die sechs Einzeleffekte (LULUCF).....	75
Tabelle 19:	Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungsraten für Flächenelemente auf mineralischem Boden und für Einzelbäume auf SuV-Flächen	77
Tabelle 20:	Wertpunkte zur Bestimmung des Ausgleichsbedarfs	83
Tabelle 21:	Kontinuierliche Veränderungsdaten an Bodenkohlenstoffvorrat, Methan bzw. Lachgas auf trockengelegten organischen Böden in Abhängigkeit von der Nutzung	85
Tabelle 22:	Aus Kapitel 2.5.1 übernommen: Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Status Quo“).....	87
Tabelle 23:	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung eines Hektars Flächenneuanspruchnahme in exemplarischen Städten und Gemeinden, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Vornutzung: Status Quo	88
Tabelle 24:	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung eines Hektars Flächenneuanspruchnahme in exemplarischen Kreisen und Bundesländern sowie für Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Jahr der Nutzungsänderung: 2025, Szenario Vornutzung: Status Quo.....	89

Tabelle 25:	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung der zusätzlichen Innenentwicklung zur Kompensation eines vermiedenen Hektars Außenentwicklung in exemplarischen Städten und Gemeinden, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Innenentwicklung: Alle Innenentwicklungsformen.....	90
Tabelle 26:	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung der zusätzlichen Innenentwicklung zur Kompensation eines vermiedenen Hektars Außenentwicklung in exemplarischen Kreisen und Bundesländern sowie für Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Innenentwicklung: Alle Innenentwicklungsformen	90
Tabelle 27:	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro Hektar Flächenneuinanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen; Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Vornutzung: Status Quo	91
Tabelle 28:	Herleitung der Treibhausgaswirkung der Außenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m ³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden	94
Tabelle 29:	Herleitung der Treibhausgaswirkung der Innenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m ³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden	95
Tabelle 30:	Am Innenentwicklungsanteil gewichtete durchschnittliche Treibhausgaswirkung der Außen- und Innenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m ³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden.....	96
Tabelle 31:	Treibhausgaswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse im Bundesschnitt in Abhängigkeit der Nutzung.....	97
Tabelle 32:	Ansätze zur Bestimmung des Umfangs technischer Infrastruktur	101
Tabelle 33:	Emissionsfaktoren für die Errichtung technischer Infrastruktur	103
Tabelle 34:	EFH- und MFH-Anteile bei Außen- bzw. Innenentwicklungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Bodenpreisniveau der Gemeinden.....	104
Tabelle 35:	Methodische Randbedingungen und Treibhausgasemissionen für die Errichtung von Gebäuden ausgewählter Literaturstudien.....	105

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
Äq.	Äquivalente
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
BM	Baumasse
BMZ	Baumassenzahl ()
CO ₂ -Äq.	Neben CO ₂ sind teilweise auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas für die Berechnung der LULUCF-Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme relevant. Nicht-CO ₂ -Emissionen werden mithilfe der IPCC-Umrechnungsfaktoren aus dem AR 5 in die Einheit „CO ₂ -Äquivalente“ („CO ₂ -Äq.“) umgerechnet.
Ergebnisband	Damit ist die Studie Wagner et al. 2025 gemeint, die den zum vorliegenden Methodikband zugehörigen Schlussbericht darstellt, der auf die Ergebnisse des Forschungsvorhabens fokussiert.
GFZ	Geschossflächenzahl
GGR	Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR, Hamburg
ha	Hektar
iLUC	Indirect land use changes, indirekte Landnutzungsänderungen
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
LULUCF	Land use, land use change and forestry
Mio.	Millionen
qm	Quadratmeter
SuV	Siedlung und Verkehr
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt, Dessau

1 Hintergrund und Ziel

Der vorliegende Bericht enthält detaillierte Beschreibungen und Erklärungen zu der Methodik, die den in Wagner et al. 2025 veröffentlichten Projektergebnissen zu den Treibhausgaseinsparpotenzialen einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme (Ergebnisband) zugrunde liegen. Die Inhalte des vorliegenden Berichts wurden nicht in den Ergebnisband aufgenommen, um den Umfang des Ergebnisbands möglichst gering zu halten und die dargestellten Inhalte möglichst prägnant darzulegen.

Der vorliegende Bericht (Methodikband) versteht sich als ergänzendes Material zum Ergebnisband. Der Anwendungsfall besteht insbesondere darin, dass Leserinnen und Leser des Ergebnisbands genauer nachvollziehen möchten, wie die Ergebnisse zustande kommen. Vor diesem Hintergrund enthält der vorliegende Bericht als Ganzes weder einen eigenständigen Duktus noch Ergebnisse, Zwischenergebnisse oder ein Fazit.

Essenzielle methodische Grundlagen sind im Ergebnisband in Kapitel 2 zusammengefasst, insbesondere ist dort eine Auflistung der betrachteten Nutzungsarten aufgeführt (Kapitel 2.2), ein Überblick über das LULUCF-Modell gegeben (Kapitel 2.3) und eine Erklärung von zentralen Begriffen vorgenommen (Kapitel 2.4). Es wird davon ausgegangen, dass Lesende des vorliegenden Methodikbands mit den dort aufgeführten Grundlagen vertraut sind.

2 Modellierung der Flächenkulisse der Außenentwicklung

2.1 Flächenkulisse „vor“ und „nach“ der Flächenneuanspruchnahme pro Hektar Außenentwicklung

Die Zielsetzung der in diesem Kapitel vorgestellten Modellierung ist es zunächst, zu ermitteln, wie sich ein durchschnittlicher Hektar Außenentwicklung hinsichtlich der Nutzungsarten „vor“ und „nach der Flächenneuanspruchnahme“ zusammensetzt.

Eine Nutzungsänderung findet statt, wenn eine bestimmte Nutzungsart „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in eine Nutzungsart „nach der Flächenneuanspruchnahme“ übergeht (siehe Tabelle 2 im Ergebnisband). Die Summe der Nutzungsänderungen, die pro Hektar Außenentwicklung entstehen, beträgt definitionsgemäß ebenfalls einen Hektar.

Zusätzlich erfolgt eine Abschätzung zur durchschnittlichen Anzahl an neu gepflanzten Bäumen (siehe Kapitel 2.2 im Ergebnisband) pro Hektar Außenentwicklung.

Die so ermittelten Nutzungsänderungen (Einheit: Hektar) werden später mit den Treibhausgaswirkungen der Nutzungsänderungen (Einheit: CO₂-Äquivalente pro Hektar) multipliziert. Die Herleitung der Treibhausgaswirkungen der Nutzungsänderungen wird in Kapitel 4 detailliert beschrieben. Ergebnis ist eine Abschätzung der Treibhausgaswirkung pro Hektar Außenentwicklung (in einer im Folgenden noch genauer beschriebenen räumlichen Differenzierung) (siehe Kapitel 5). Diese Abschätzung wird im Weiteren verwendet, um die Treibhausgas-Minderungspotenziale einer verstärkten Innenentwicklung abzuschätzen. Details hierzu finden sich in Kapitel 6.

2.2 Differenzierung von zwei Bereichen der Flächenneuanspruchnahme

Im Rahmen der Modellierung der Außenentwicklung wird zwischen den folgenden beiden Bereichen der Flächenneuanspruchnahme unterschieden:

- ▶ Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich, bei denen auch die dabei neu geschaffenen Verkehrsflächen im neu geschaffenen Siedlungsbereich liegen: Kapitel 2.3 bis 2.5
- ▶ Außerörtliche Verkehrsflächen: Kapitel 2.6

Die Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich umfasst innerörtliche Verkehrsflächen. Außerörtliche Verkehrsflächen beinhalten auch Flächen für Straßenbegleitgrün.

Während die Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich ganz oder teilweise durch eine Innenentwicklung (Kapitel 3) ersetzt werden kann, lassen sich außerörtliche Verkehrsflächen nicht durch eine Innenentwicklung ersetzen. Eine Reduktion der jährlichen Flächenneuanspruchnahme durch außerörtliche Verkehrsflächen muss daher durch eine Verminderung deren Ausbaus erfolgen, z. B. eine Konzentration auf die Erhaltung der bestehenden Straßen- und Schienenwege anstelle eines weiteren Aus- und Neubaus.

Wie in den nachfolgenden Kapiteln noch genauer erläutert, erfolgt die Abschätzung der beiden genannten Bereiche der Flächenneuanspruchnahme auf unterschiedlichem Weg:

- ▶ Für die „Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich“ wird in den Kapiteln 2.3 bis 2.5 eine gemeindespezifische Abschätzung der Nutzungsänderungen und Baumpflanzungen pro Hektar Außenentwicklung vorgenommen. Dabei wird mit Gemeindetypen gearbeitet.

- Im Gegensatz dazu erfolgt für die außerörtlichen Verkehrsflächen eine bundesweite Abschätzung der Nutzungsänderungen und Baumpflanzungen pro Hektar Außenentwicklung (Kapitel 2.6).

2.3 Flächenkulisse „vor der Flächenneuanspruchnahme“

2.3.1 Analyse der Umringe um die Siedlungsbereiche

Eine Flächenneuanspruchnahme der Art „Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich“ findet nahezu ausschließlich im unmittelbaren Umfeld der bestehenden Siedlungen und ihrer Erschließungsflächen statt. Vor diesem Hintergrund wurden zur Ermittlung der Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ Umringe um die bestehenden Siedlungsbereiche gebildet.

Analytischen Ausgangspunkt bilden ca. 42,5 Millionen Gebäudeobjekte aus dem OpenStreetMap-Datensatz (OSM 2023, Stand 3/2023). Durch Pufferung aller Gebäude um 50 Meter wurden diese zu Gebäudeclustern zusammengefasst (schwarze Flächen in Abbildung 1).

Abbildung 1: Zusammenfassung der bestehenden Gebäude *) zu Gebäudeclustern **)

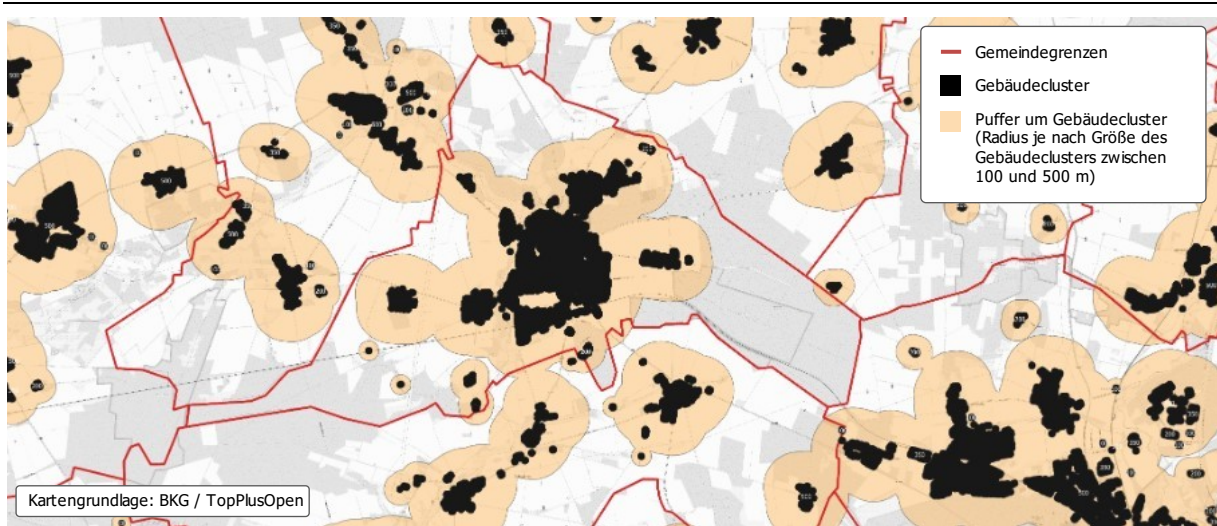


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) auf Basis von OpenStreetMap, ca. 42,5 Mill. Gebäudeobjekte | **) Clusterbildung durch Pufferung der Gebäudeumrisse um 50 Meter

Um diese Gebäudecluster wurden in einem nächsten Schritt Ringe gebildet. Der Radius der entsprechenden Pufferung liegt zwischen 100 und 500 Meter und richtet sich nach der Größe des Gebäudeclusters (Abbildung 2). Größere Gebäudecluster werden mit einem größeren Radius gepuffert als kleine Gebäudecluster bzw. Einzelgebäude.

Abbildung 2: Ringe um bestehende Gebäudecluster, Radius je nach Größe des Gebäudeclusters *)

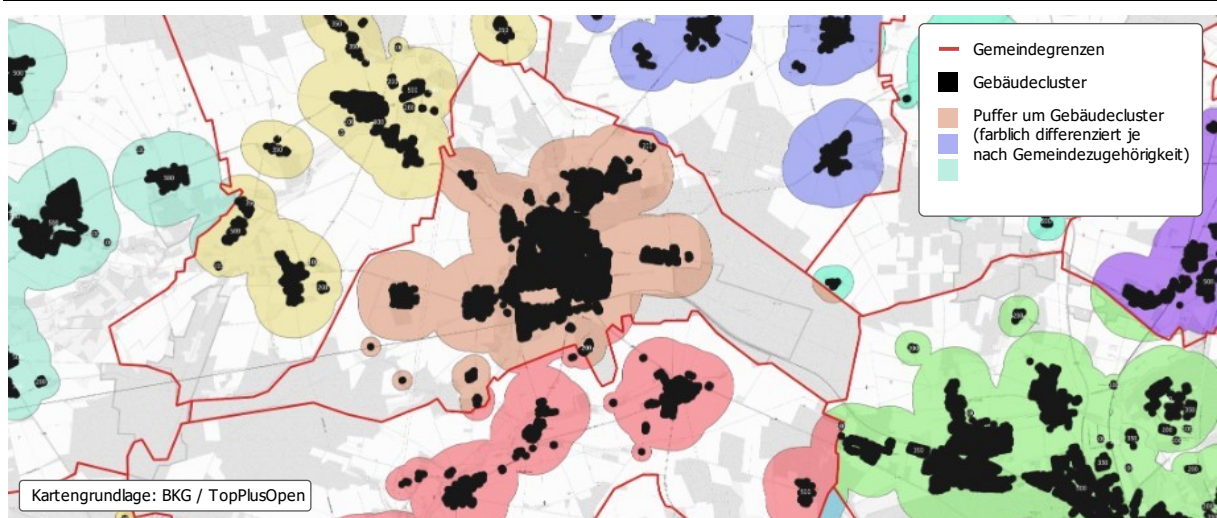


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) Minimum: 100 Meter, Maximum: 500 Meter

Die so erzeugten Umringe werden in weiteren Schritten mit den Gemeindegrenzen (Abbildung 3) sowie mit räumlichen Daten des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) zur Lage von Schutzgebieten in Deutschland (BfN 2023) verschnitten (Abbildung 4). Bei der Verschneidung mit den Schutzgebieten wurden Überschneidungen mit Gebieten mit einem hohem Schutzstatus (Naturschutzgebiet, FFH-Gebiet, Ramsar-Gebiet, SPA-Gebiet, Naturmonument und Kernzonen von Biosphärenreservaten) ermittelt. Für diese Gebiete wurde unterstellt, dass hier voraussichtlich so gut wie keine Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen (ohne außerörtliche Verkehrsflächen) stattfindet.

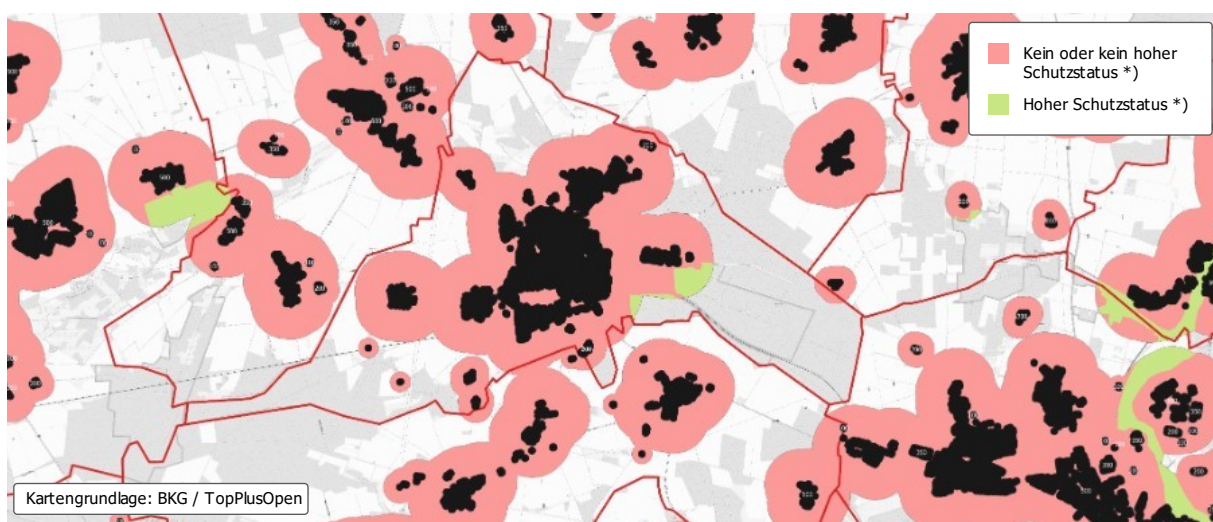
Abbildung 3: Verschnitt mit Gemeindegrenzen *)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) mithilfe von BKG (2022)

Abbildung 4: Verschnitt mit räumlichen Daten des Bundesamtes für Naturschutz zur Lage von Schutzgebieten *)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) Hoher Schutzstatus = Naturschutzgebiet, FFH-Gebiet, Ramsar-Gebiet, SPA-Gebiet, Naturmonument oder Kernzonen von Biosphärenreservaten; Datenquelle für räumliche Abgrenzung: BfN (2023)

Anschließend wurden die Flächen mit der räumlichen Lage der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ gemäß IÖR-Monitor¹ (IÖR 2023) sowie mit räumlichen Daten des Greifswald Moor Centrums (Tegetmeyer et al. 2021) zur Lage der organischen Böden in Deutschland (Abbildung 5) verschnitten.

Abbildung 5: Verschnitt mit räumlichen Daten des Greifswald Moor Centrums zur Lage organischer Böden *)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

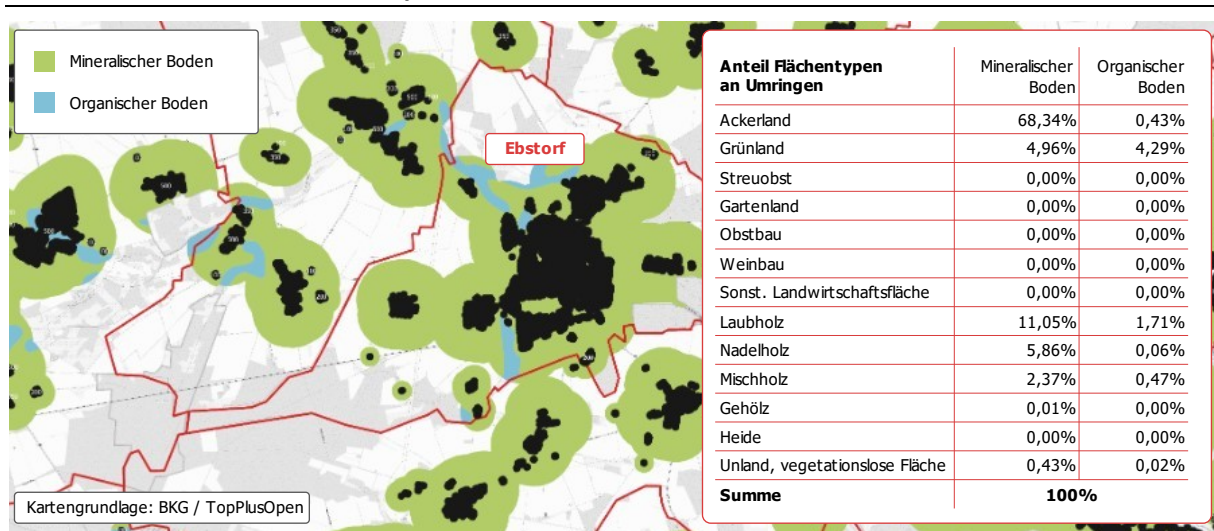
*) Quelle: Tegetmeyer et al. (2021)

Abschließend wurden die um die Naturschutzflächen mit hohem Schutzstatus bereinigten und wie beschrieben verschnittenen Flächen der Umringe hinsichtlich ihrer Fläche für jede Gemeinde in Deutschland aufsummiert und – differenziert nach mineralischem und

¹ Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden, für die Durchführung dieser Verschnidung (M. Schorcht).

organischem Boden – zu Anteilswerten bilanziert. Abbildung 6 zeigt dies beispielhaft für die Gemeinde Ebstorf in Niedersachsen.

Abbildung 6: Bilanzierung der gemeindespezifischen Flächenanteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die rechts tabellarisch dargestellten Werte stimmen nicht mit denen in Tabelle 3 im Ergebnisband überein, da noch nicht mit den Nutzungswahrscheinlichkeiten multipliziert wurde (siehe nachfolgendes Kapitel und Abbildung 7).

2.3.2 Berücksichtigung von Inanspruchnahme-Wahrscheinlichkeiten anhand der realen Flächenneuanspruchnahme 2015-2020

Die vorstehend für jede Gemeinde ermittelten Flächenanteile an den Siedlungsumringen beschreiben zunächst nur die Zusammensetzung dieser Umringe ohne Bezug zur realen Inanspruchnahme. Zur Überführung dieser Flächenanteile der Umringe in realitätsnahe Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ an der zukünftigen Flächenneuanspruchnahme werden Nutzungswahrscheinlichkeiten hergeleitet, einerseits nach Nutzungsarten (s. nachfolgendes Kapitel 2.3.2.1) und andererseits nach mineralischem bzw. organischem Boden (Kapitel 0).

2.3.2.1 Nutzungswahrscheinlichkeiten nach Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ (in zwei Szenarien)

Tabelle 1 stellt die bundesweit aufsummierten Flächenanteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ an den Umringen (Abbildung 6) den Anteilen der gleichen Nutzungsarten an der Vorhernutzung der realen Flächenneuanspruchnahme 2013-2020 gegenüber. Die Gegenüberstellung macht zum einen deutlich, dass sich die Grundstruktur der Flächenanteile zwischen den Umringen und der realen Inanspruchnahme nur wenig unterscheidet.

Im Detail zeigen sich jedoch Unterschiede, die in der letzten Spalte als Verhältniszahl dargestellt sind. Die Verhältniszahl teilt den jeweiligen Flächenanteil an der realen Flächenneuanspruchnahme durch den Flächenanteil an allen Siedlungsumringen aus Kapitel 2.3.1. Werte über 1 bedeuten, dass die entsprechende Nutzungsart in der realen Flächenneuanspruchnahme 2013-2020 anteilig häufiger zu Siedlungs- und Verkehrszwecken (ohne außerörtliche Verkehrsflächen) umgenutzt wurde als sein Anteil an den Siedlungsumringen ist. Entsprechende Flächen werden pro ha im Umfeld der bestehenden

Siedlung verfügbarer Flächen somit tendenziell häufiger in Anspruch genommen als Nutzungsarten, bei denen die Verhältniszahl unter 1 liegt.

Anschaulich wird dies bei einem Vergleich von Ackerland und Grünland: Grünland wird anteilig deutlich häufiger in Anspruch genommen als es anteilig in den Umringen vorkommt. Im Gegensatz dazu wird Ackerland anteilig etwas seltener in Anspruch genommen als es im Umfeld der bestehenden Siedlung vorkommt.

Tabelle 1: Herleitung von Nutzungswahrscheinlichkeiten der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“

Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	Flächenanteil in allen Siedlungsumringen *)	Anteil an realer Flächenneuanspruchnahme **)	Verhältniszahl (= relative Nutzungswahrscheinlichkeit)
Ackerland	49,1%	42,0%	0,86
Grünland	25,1%	36,0%	1,43
Streuobst	0,9%	1,0%	1,19
Gartenland	0,2%	1,3%	8,77
Obstbau	0,4%	0,3%	0,89
Weinbau	0,5%	0,3%	0,50
Sonstige Landwirtschaftsfläche	0,4%	0,6%	1,44
Laubholz	5,7%	2,6%	0,46
Nadelholz	8,8%	2,8%	0,32
Mischholz	6,3%	2,4%	0,38
Gehölz	1,8%	3,6%	1,96
Heide	0,1%	0,3%	4,67
Unland, vegetationslose Fläche	0,7%	6,7%	8,98

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis einer Auswertung räumlicher Detaildaten aus dem IÖR-Flächenmonitor.

*) Gemäß Herleitung in Kapitel 2.3.1 **) Mittelwert aus vier Auswertungen: 1) 2013-2018, alle Nutzungsänderungen von Freiraumfläche zu SuV, 2) 2013-2018, nur Nutzungsänderungen mit Zunahme der Überbauung, 3) wie Nr. 1 für 2015-2020; 4) wie Nr. 2 für 2015-2020 jeweils anhand von IÖR (2023)

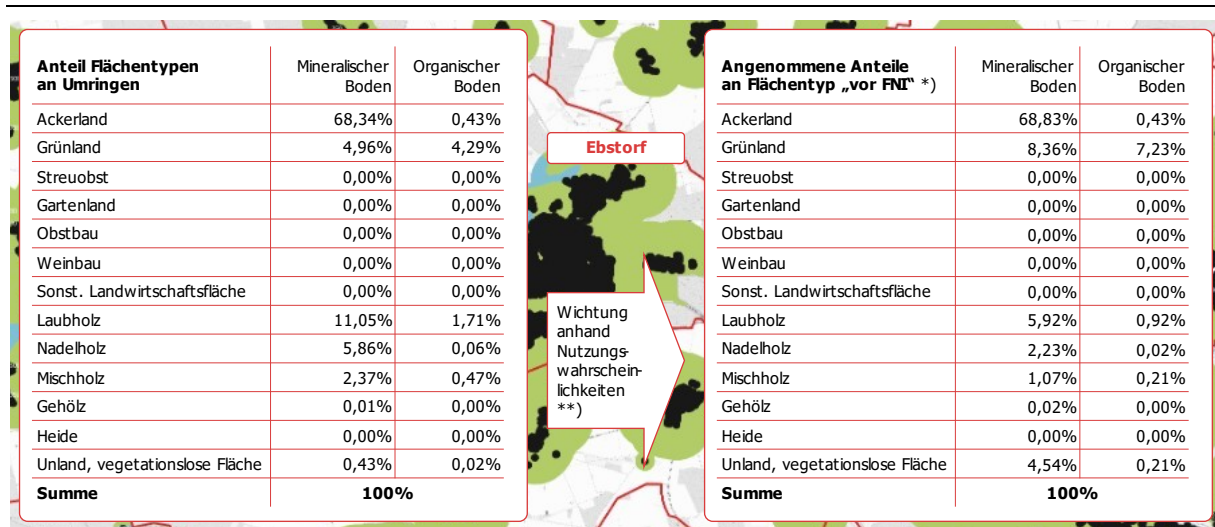
Die mittlere Spalte „Anteil an der realen Flächenneuanspruchnahme“ stimmt nicht mit Tabelle 3 im Ergebnisband (Spalte „Deutschland“) überein, da organische Böden hier in den Nutzungsarten mit dargestellt sind, wohingegen sie in Tabelle 3 im Ergebnisband unten in einer eigenen Zeile separat ausgewiesen sind.

Die Verhältniszahl der letzten Spalte wird daher im Folgenden als Nutzungswahrscheinlichkeit interpretiert. Die höchste Nutzungswahrscheinlichkeit haben demnach Unland und Gartenland, die niedrigsten Nutzungswahrscheinlichkeiten finden sich bei den Wald-Nutzungsarten.

Die Anwendung der Nutzungswahrscheinlichkeiten zeigt Abbildung 6 beispielhaft für die Gemeinde Ebstorf, an deren räumlicher Situation im vorigen Kapitel bereits die Herleitung und Auswertung der Umringe erläutert wurde. Dabei wird sichtbar, dass Nutzungsarten, die in den

Umringen einer Gemeinde nicht vorkommen, auch nach der Wichtung anhand der Nutzungswahrscheinlichkeiten einen Anteilswert von 0 % an den angenommenen Vornutzungen haben.

Abbildung 7: Beispielhafte Anwendung der Nutzungswahrscheinlichkeit auf die Gemeinde Ebstorf



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

**) mit anschließender Normierung auf 100 % Gesamtsumme

Wie das Beispiel der Gemeinde Ebstorf (Abbildung 7) zeigt, ergibt die vorgenommene Modellierung, dass auf Waldflächen trotz der geringen Nutzungswahrscheinlichkeit aus Tabelle 1 Flächenneuanspruchnahme stattfindet. Waldflächen speichern jedoch sehr viel Kohlenstoff, so dass ihr Verlust entsprechende Treibhausgaswirkungen hat (Kapitel 4). Aus diesem Grund wird neben dem Status Quo ein Alternativszenario „Waldschutz“ definiert, bei dem die Nutzungswahrscheinlichkeit der Waldflächen auf 0 gesetzt wird. Als Kompensation werden die Nutzungswahrscheinlichkeiten aller anderen Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ linear angehoben. Tabelle 2 zeigt die entsprechenden Werte.

Tabelle 2: Nutzungswahrscheinlichkeiten der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in zwei alternativen Szenarien

Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	Nutzungswahrscheinlichkeit	
	Vornutzungsszenario „Status Quo“	Vornutzungsszenario „Waldschutz“
Ackerland	0,86	0,93
Grünland	1,43	1,56
Streuobst	1,19	1,30
Gartenland	8,77	9,58
Obstbau	0,89	0,96
Weinbau	0,50	0,54
Sonst. Landwirtschaftsfläche	1,44	1,57

Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	Nutzungswahrscheinlichkeit	
Laubholz	0,46	0
Nadelholz	0,32	0
Mischholz	0,38	0
Gehölz	1,96	2,14
Heide	4,67	5,11
Unland, vegetationslose Fläche	8,98	9,77

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

2.3.2.2 Nutzungswahrscheinlichkeiten nach mineralischem bzw. organischem Boden

Die im vorigen Kapitel erläuterte Korrektur der Nutzungswahrscheinlichkeiten bezieht sich nur auf die Gewichtung der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“, d. h. nur auf die Zeilen in den Tabellen der Abbildung 6.

Nach einem ähnlichen Vorgehen erfolgt in einem zweiten Schritt die Berücksichtigung der Nutzungswahrscheinlichkeiten von Flächen auf mineralischen bzw. organischen Böden. Der Anteil der organischen Böden an Siedlungsumringen beträgt 4,52 % (im Vornutzungsszenario „Waldschutz“ 4,59 %). Der Anteil der organischen Böden an der realen Flächenneuanspruchnahme lag bundesweit jedoch nur bei 3,61 % (IÖR 2023 verschnitten mit Tegetmeyer et al. 2021). Hieraus werden Nutzungswahrscheinlichkeiten für organischen bzw. mineralischen Boden abgeleitet. Im Szenario „Status Quo“ liegt dieser Korrekturfaktor bei 0,81, im Szenario „Waldschutz“ bei 0,79. Spiegelbildlich dazu erhöht sich die Nutzungswahrscheinlichkeit aller Flächen auf mineralischem Boden (Korrekturfaktor jeweils etwa 1,01).

Da der Anteil organischer Böden in den verschiedenen Regionen Deutschlands sehr unterschiedlich ist, wurde bei der Herleitung der vorstehenden Korrekturfaktoren eine Gewichtung der Gemeinden anhand ihres Anteils an der bundesweiten Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021 berücksichtigt.

2.3.2.3 Ergebnis für jede Gemeinde: Zusammensetzung des durchschnittlichen für eine Außenentwicklung (ohne außerörtliche Verkehrsflächen) neu in Anspruch genommenen Hektars Freiraumfläche

Nach Anwendung der vorstehenden Korrekturfaktoren (Nutzungswahrscheinlichkeiten) auf die Flächenanteile der Umringe aus Kapitel 2.3.1 liegt für jede Gemeinde eine detaillierte Annahme vor, zu welchen Anteilen sich der durchschnittliche, für eine Außenentwicklung ²neu in Anspruch genommene Hektar Freiraumfläche aus den Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ zusammensetzt.

Diese Zusammensetzung wird gemeindespezifisch nach mineralischen bzw. organischen Böden differenziert. In 5.927 Gemeinden ³beinhalten die so ermittelten potenziellen Flächen für Flächenneuansprüche (ohne außerörtliche Verkehrsflächen) keine Flächen auf organischen Böden.

² Ohne Flächenneuansprüche für außerörtliche Verkehrsflächen.

³ Gebietsstand 31.12.2021

2.4 Flächenkulisse „nach der Flächenneuanspruchnahme“

Nachdem mit den vorstehend beschriebenen Modellierungen eine detaillierte Annahme zur Zusammensetzung des durchschnittlichen Hektars vor der Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich vorliegt, geht es im nächsten Schritt um eine entsprechende Beschreibung der Zusammensetzung „nach der Flächenneuanspruchnahme“. Dabei werden die folgenden Nutzungsarten differenziert (siehe Tabelle 2 im Ergebnisband):

- ▶ Durch Gebäude bedeckte Fläche
- ▶ Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen
- ▶ Private versiegelte Fläche ohne Gebäude
- ▶ Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)
- ▶ Fläche mit Gehölz, Hecken, Gebüsch

Kapitel 2.4.1 beschreibt zunächst die zugrundeliegende Gemeindetypisierung. Kapitel 2.4.2 beschreibt, wie der durch Gebäude bedeckte Flächenanteil (erster Punkt in obestehender Liste der differenzierten „Nachher“-Nutzungsarten) bestimmt wird. Kapitel 2.4.3 beschreibt wie die weiteren „Nachher“-Nutzungsarten (öffentliche und private versiegelte Fläche, Fläche mit niedriger Vegetation und Fläche mit Gehölz/Hecken/Gebüsch) bestimmt wird. Kapitel 2.4.4 beschreibt, wie die Anzahl der gepflanzten Einzelbäume bestimmt wird.

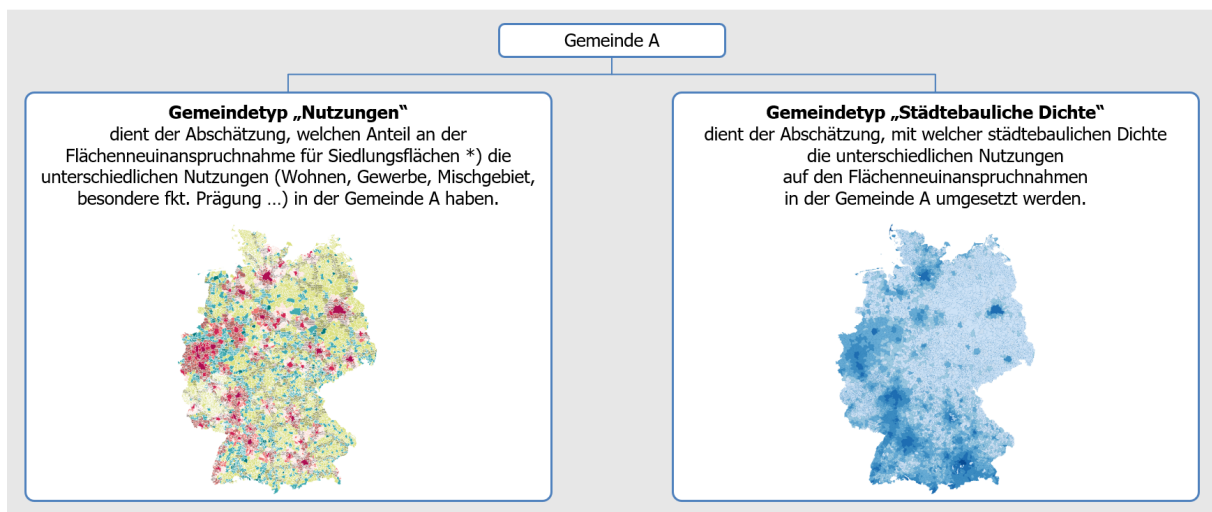
2.4.1 Zuordnung jeder Gemeinde zu zwei Gemeindetypen

Im Gegensatz zum Vorgehen zum Zustand „vorher“ (Kapitel 2.3), bei dem jeder Gemeinde individuelle Werte zugeschrieben werden, basiert die nun dargestellte Methodik zur Abschätzung der Flächenzusammensetzung nach der Flächenneuanspruchnahme auf einer zweifachen Gemeindetypisierung.

Dazu werden jeder Gemeinde in Deutschland zwei Gemeindetypen zugewiesen (Abbildung 8), ein Gemeindetyp „Nutzungstypisierung“ (im folgenden Gemeindetyp Nutzung genannt) und ein Gemeindetyp „Typisierung nach städtebaulicher Dichte“ (im folgenden Gemeindetyp Städtebauliche Dichte genannt).

- ▶ Der Gemeindetyp „Nutzungen“, dessen Herleitung und Zuweisung im nachfolgenden Kapitel 2.4.1.1 genauer erläutert wird, beschreibt, welchen Flächenanteil welche Nutzungen (z. B. Wohnen, Gewerbe, Mischnutzung, ...) an den Flächenneuanspruchnahmen der Gemeinden des entsprechenden Gemeindetyps haben.
- ▶ Ergänzend beschreibt der Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ mit welcher städtebaulichen Dichte diese Nutzungen jeweils realisiert werden. Wie in Kapitel 2.4.1.2 noch genauer erläutert spielt dabei der Bodenpreis eine wichtige Rolle.

Abbildung 8: Zuweisung von zwei Gemeindetypen („Nutzungen“ und „Städtebauliche Dichte“) zu jeder Gemeinde in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) ohne außerörtliche Verkehrsflächen

2.4.1.1 Gemeindetyp „Nutzungen“

Es wird zwischen den folgenden sieben Nutzungen unterschieden, die aus den ATKIS-Flächennutzungskategorien abgeleitet sind. Die gleiche Differenzierung der Nutzungen wird in Kapitel 3 auch für die Innenentwicklung verwendet.

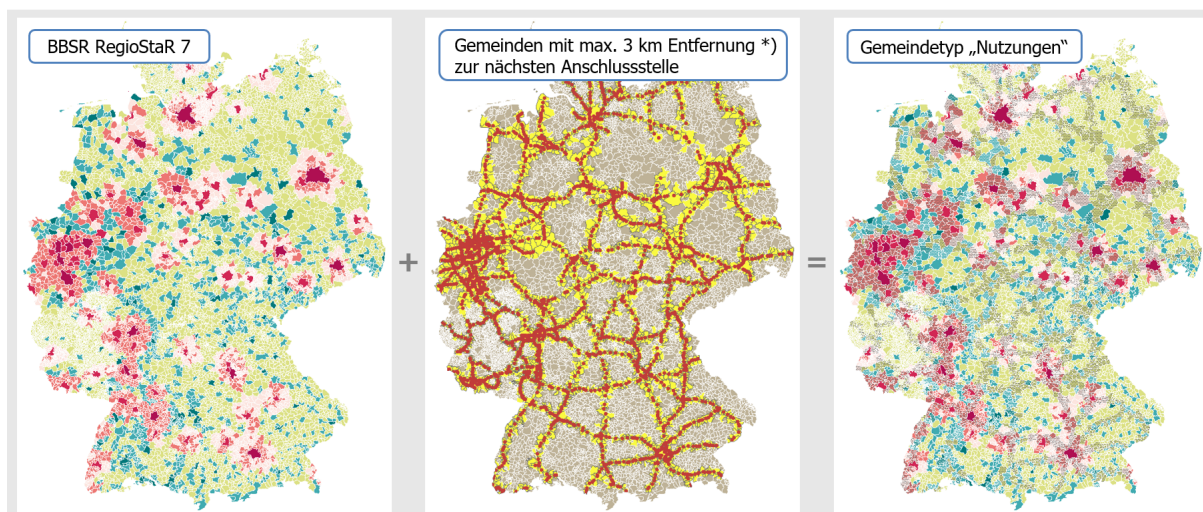
- ▶ Wohnen
- ▶ Mischnutzung
- ▶ Besondere funktionale Prägung
- ▶ Industrie und Gewerbe
- ▶ Plätze
- ▶ Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen
- ▶ Sonstige Siedlungsfreiflächen

Um zu beschreiben, welchen Flächenanteil diese sieben Nutzungen am durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung haben, wird zwischen zwölf Gemeindetypen „Nutzungen“ unterschieden. Diese zwölf Gemeindetypen ergeben sich aus einer Überlagerung der regionalstatistischen Raumtypologie „RegioStar 7“ des BBSR (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2021) und einem Lagekriterium „Autobahnanschluss“ (Abbildung 9).

Die BBSR-Raumtypologie „RegioStar 7“ unterscheidet zwischen ländlichen und städtischen Regionen und differenziert die Gemeinden zusätzlich nach ihrer Größe, zentralörtlichen Funktion und Lage innerhalb der Region.

Das Lagekriterium „Autobahnanschluss“ beschreibt für jede Gemeinde, ob sich mindestens eine Autobahnanschlussstelle innerhalb des Gemeindegebiets bzw. maximal 3 km davon entfernt befindet. Allen anderen Gemeinden wird die Ausprägung „Autobahnanschluss über 3 km entfernt“ zugewiesen.

Abbildung 9: Herleitung des Gemeindetyps „Nutzungen“



Öko-Institut e.V.

*) Bezogen auf das gesamte Gemeindegebiet

GERTZ GUTSCHE RÜMENAPP
Stadtentwicklung und Mobilität
Planung Beratung Forschung GbR

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) Bezogen auf das gesamte Gemeindegebiet

Aus der Überlagerung dieser beiden Kriterien ergeben sich die zwölf in Tabelle 3 aufgelisteten Gemeindetypen „Nutzungen“.











Tabelle 3: Definition des Gemeindetyps „Nutzungen“ und Anzahl der jeweils zugeordneten Gemeinden in Deutschland

RegioStaR 7	Autobahnanschluss	Anzahl Gemeinden
Stadtregion - Metropole	keine Unterscheidung	16
Stadtregion - Regiopole und Großstadt	keine Unterscheidung	66
Stadtregion – Mittelstadt, städtischer Raum	über 3 km entfernt	492
	max. 3 km entfernt	902
Stadtregion – Kleinstädtischer, dörflicher Raum	über 3 km entfernt	1.025
	max. 3 km entfernt	873
Ländliche Region - Zentrale Stadt	über 3 km entfernt	36
	max. 3 km entfernt	71
Ländliche Region - Städtischer Raum	über 3 km entfernt	710
	max. 3 km entfernt	441
Ländliche Region – Kleinstädtischer, dörflicher Raum	über 3 km entfernt	4.763
	max. 3 km entfernt	1.599
insgesamt (Gebietsstand: 31.12.2021)		10.994

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die vorstehende Gemeindetypisierung nach „Nutzungen“ wird unter der Annahme vorgenommen, dass die in der BBSR-Raumtypologie „RegioStaR 7“ enthaltenen bzw. mit dem Aspekt „Autobahnanschluss“ noch hinzugefügten Kriterien einen sichtbaren Einfluss auf die Anteile der oben genannten Nutzungen an den realen Flächenneuanspruchnahmen haben. Dass dem wirklich so ist, zeigt die nachstehende Abbildung 10. Diese listet in jeder Spalte auf, welchen Anteil die sieben Nutzungen an den realen Flächenneuanspruchnahmen 2015-2020⁴ in den jeweiligen Gemeindetypen deutschlandweit hatten. Dabei wird zum einen eine über alle Gemeindetypen hinweg sichtbare Grundstruktur erkennbar, bei der die Nutzungen „Wohnen“, „Mischnutzung“ und „Industrie und Gewerbe“ den größten Anteil haben. Zum anderen werden aber auch Unterschiede in den Gewichtungen der einzelnen Nutzungen zwischen den Gemeindetypen erkennbar. So machen z. B. Industrie- und Gewerbeflächen in Kleinstädten und Dörfern des ländlichen Raums mit Autobahnanschluss 36 % der Flächenneuanspruchnahme aus, in Kleinstädten und Dörfern des ländlichen Raums ohne Autobahnanschluss hingegen nur 27 %.

Abbildung 10: Flächenanteile der Nutzungen an der realen Flächenneuanspruchnahme 2015-2020 des Gemeindetyps „Nutzungen“

Anteil der Flächennutzungen an der gesamten Flächenneuanspruchnahme 2015-2020 der Art „Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich“	Gemeindetypen „Nutzungen“											
	Stadtregion						Ländliche Region					
	Metro- pole	Regio- pole, Groß- stadt	Mittelstadt, städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum		Zentrale Stadt		Städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum	
												
Wohnen	26%	24%	28%	29%	24%	24%	25%	18%	24%	23%	20%	20%
Mischnutzung	9%	13%	23%	19%	38%	30%	23%	18%	30%	24%	41%	32%
Besondere funktionale Prägung	5%	5%	3%	3%	2%	2%	4%	4%	3%	2%	2%	2%
Industrie und Gewerbe	36%	37%	32%	34%	26%	32%	33%	43%	32%	37%	27%	36%
Plätze	2%	3%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	1%
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	7%	8%	6%	7%	6%	5%	4%	6%	6%	6%	5%	5%
Sonstige Siedlungsfreiflächen	15%	11%	7%	7%	3%	6%	8%	9%	5%	6%	4%	4%
Summe	Spaltensumme jeweils 100%											

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR anhand von eigenen Auswertungen auf Basis von IÖR (2023)

In Zuge der weiteren Modellierung werden jeder Gemeinde in Abhängigkeit ihrer Zuordnung zum Gemeindetyp „Nutzungen“ (Abbildung 9, rechte Karte bzw. Tabelle 3) die in Abbildung 10 genannten Anteile an den sieben unterschiedenen Nutzungen zugewiesen.

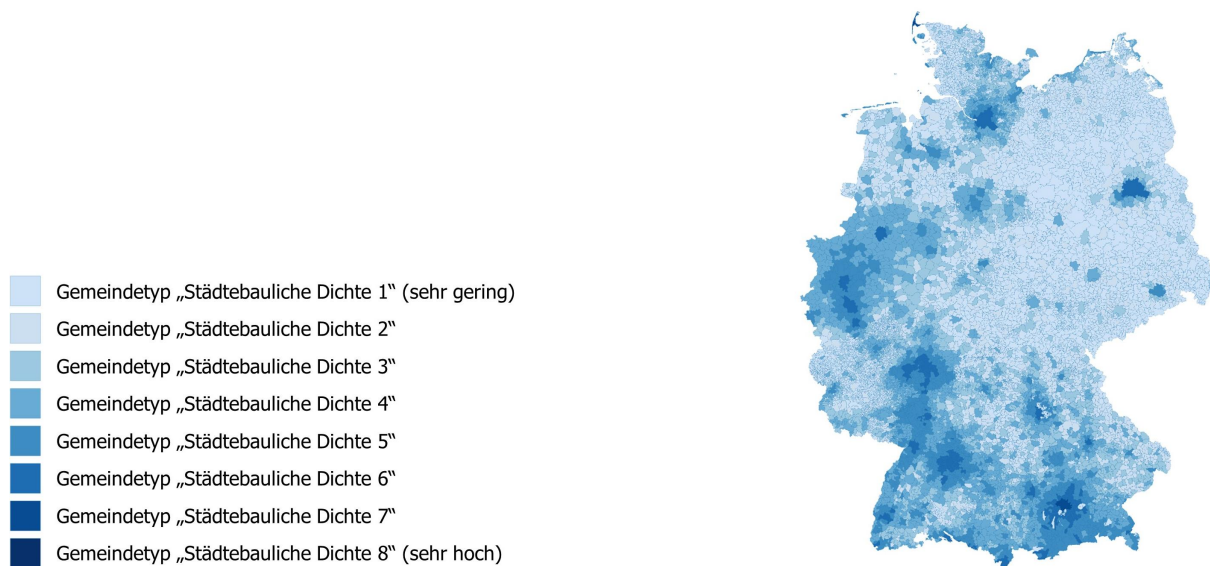
2.4.1.2 Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“

In der zweiten Gemeindetyp-Differenzierung geht es um die Frage, mit welcher städtebaulichen Dichte die vorstehend genannten Nutzungen realisiert werden. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Nutzungen „Wohnen“, „Mischnutzung“, „Besondere funktionale Prägung“ sowie „Industrie und Gewerbe“, bei denen Gebäude entstehen.

Die durchschnittliche städtebauliche Dichte in einer Gemeinde steigt mit ihrem durchschnittlichen Bodenpreis. Aus diesem Grund wird die Gemeindetypisierung „Städtebauliche Dichte“ aus dem durchschnittlichen Bodenpreisniveau der Gemeinden abgeleitet. Abbildung 11 zeigt die entsprechende Zuordnung.

⁴ Sonderauswertung des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023).

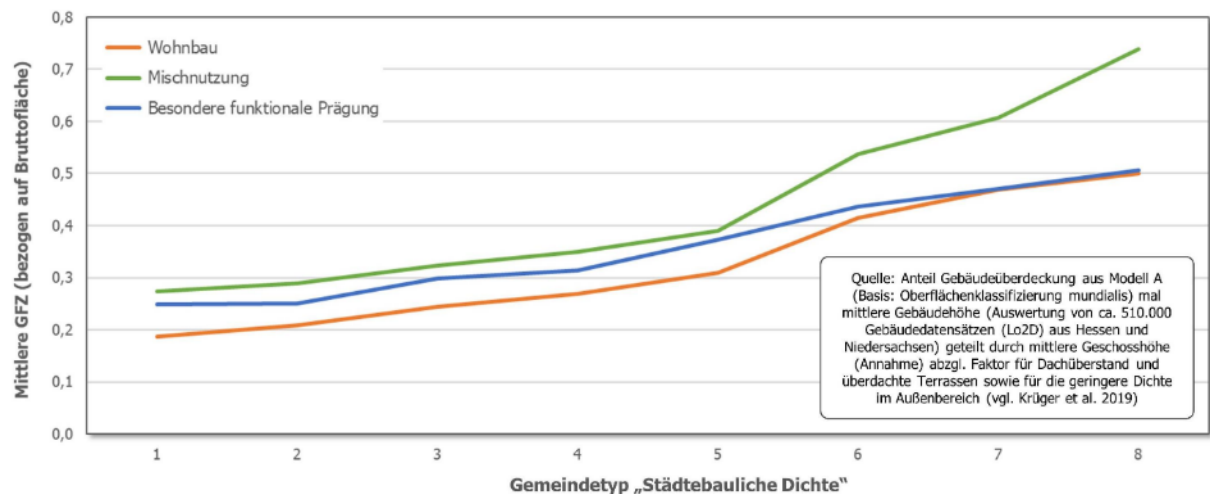
Abbildung 11: Zuordnung der Gemeinden zu acht Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Dass zwischen dem so definierten Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ und der realen städtebaulichen Dichte ein enger Zusammenhang besteht, zeigt Abbildung 12. Dargestellt ist die durchschnittliche Geschossflächenzahl (GFZ)⁵ unterschiedlicher Nutzungen in Abhängigkeit des eben gebildeten Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“. Gemeindetyp 1 steht für – im deutschen Vergleich – sehr geringe Bodenpreise und städtebauliche Dichten, Gemeindetyp 8 für sehr hohe Bodenpreise und städtebauliche Dichten.

Abbildung 12: Steigende Geschossflächenzahl *) in Abhängigkeit des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) Geschossflächenzahl bezogen auf die Bruttobauandfläche. Schätzung.

⁵ Bezogen auf die Bruttobauandfläche.

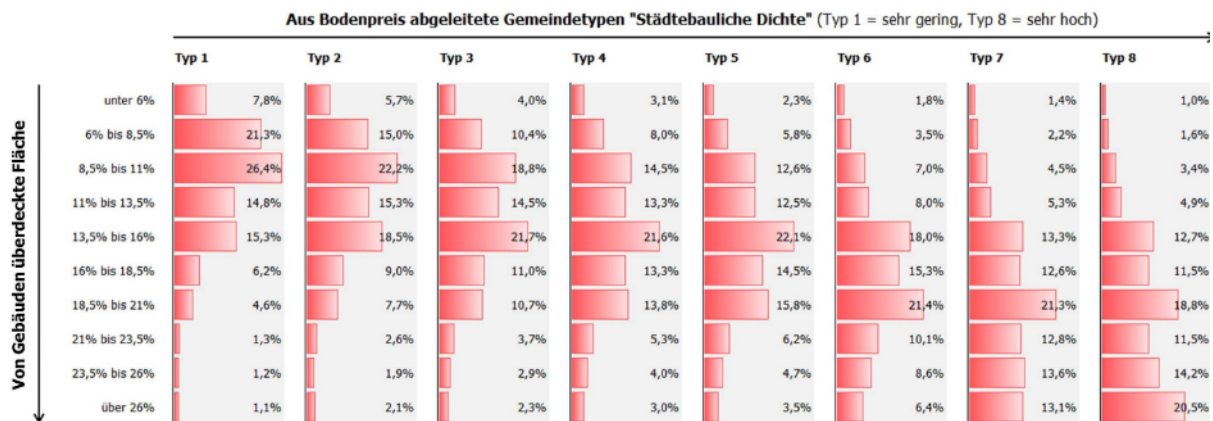
2.4.2 Durchschnittlicher Anteil der Gebäudeüberdeckung in Abhängigkeit von der Nutzung und vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“

In einem nächsten Schritt wird untersucht, welcher Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche unterschiedlicher Nutzungen in Gemeinden unterschiedlichen Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ von Gebäuden überdeckt ist. Dazu werden die bereits in Kapitel 2.3.1 verwendeten, ca. 43 Millionen Gebäudeumrisse aus OpenStreetMap mit den ATKIS-Siedlungsflächeneinheiten verschnitten. Dabei zeigen sich die in Abbildung 13 bis Abbildung 16 gezeigten Zusammenhänge.

Abbildung 13: Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Wohnbauflächen

Wohnbauflächen

Lesehilfe: In Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 4 sind 22,1% der Wohnbauflächen zwischen 13,5% und 16% von Gebäuden überdeckt

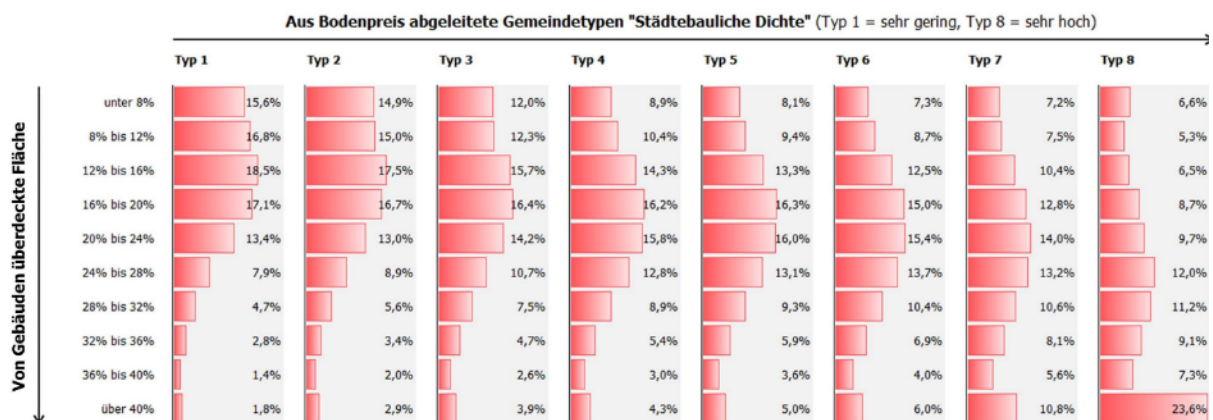


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis von ATKIS und OpenStreetMap

Abbildung 14: Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Mischflächen

Flächen gemischter Nutzung

Lesehilfe: In Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 4 sind 16,0% der Mischflächen zwischen 16,6% und 19,5% von Gebäuden überdeckt.

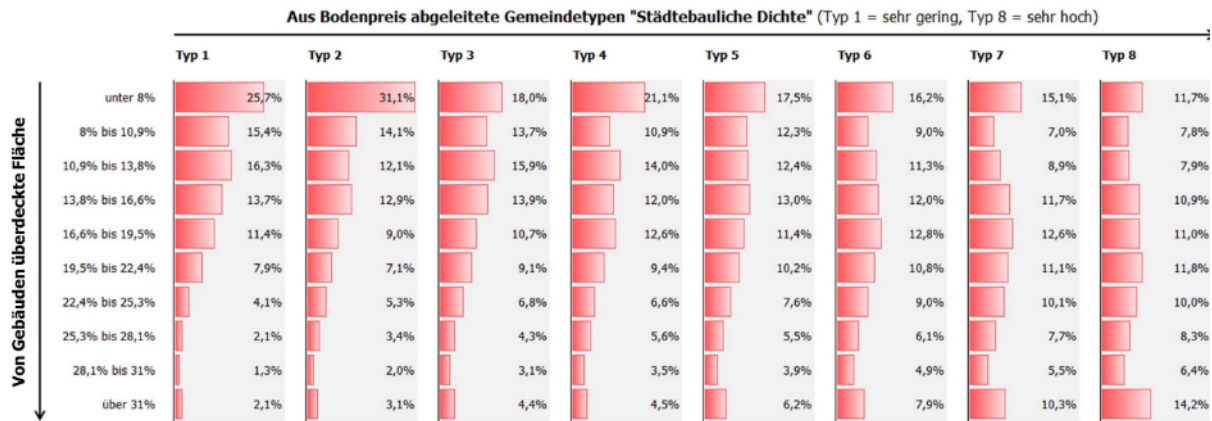


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis von ATKIS und OpenStreetMap

Abbildung 15: Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Flächen besonderer funktionaler Prägung

Flächen besonderer funktionaler Prägung

Lesehilfe: In Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 4 sind 11,4% der Flächen m. b. P. zwischen 16,6% u. 19,5% von Gebäuden überdeckt

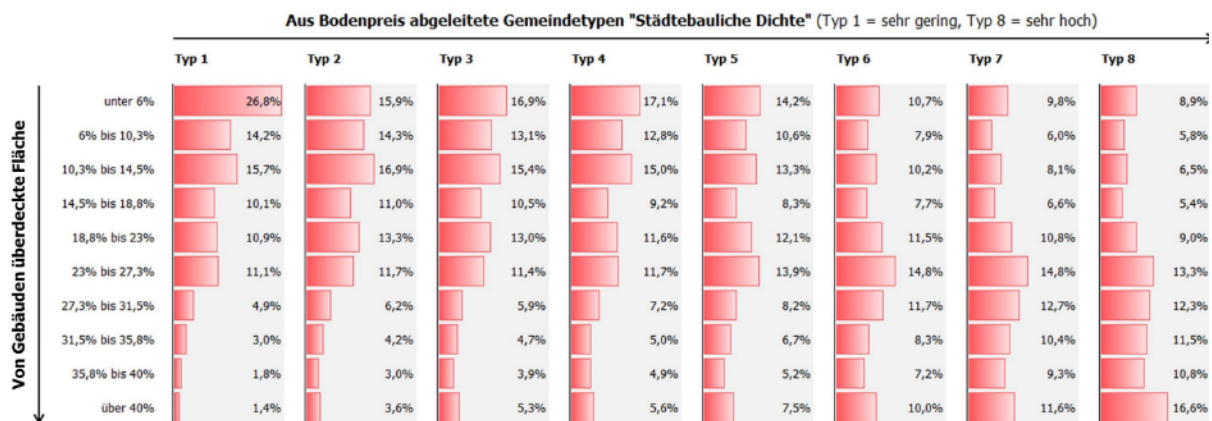


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis von ATKIS und OpenStreetMap

Abbildung 16: Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“: Industrie- und Gewerbeflächen

Industrie- und Gewerbeflächen

Lesehilfe: In Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 4 sind 12,1% der Ind.- u. Gewerbefl. zwischen 18,8% u. 23% von Gebäuden überdeckt



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis von ATKIS und OpenStreetMap

Die vier vorstehenden Abbildungen behandeln jeweils eine der vier Gebäude-orientierten Flächennutzungen aus der Liste der sieben Nutzungen aus Kapitel 2.4.1.1 (Wohnen, Mischnutzung, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe). Jede Spalte steht für einen Gemeindetyp, von Typ 1 (ganz links; geringer Bodenpreis bzw. geringe städtebauliche Dichte) bis Typ 8 (ganz rechts; hoher Bodenpreis mit entsprechend hoher städtebaulicher Dichte).

In den Zeilen der vier Abbildungen sind jeweils zehn Klassen mit von oben nach unten ansteigenden Anteilen der von Gebäuden überbedeckten Flächenanteile aufgetragen. Da jede Nutzung ein unterschiedliches Wertspektrum der Gebäudeüberdeckung aufweist, sind die Klasseneinteilungen für die verschiedenen Nutzungen unterschiedlich. Die roten Balken in den

Wertfeldern zeigen an, welcher Anteil der ATKIS-Siedlungsflächen der entsprechenden Nutzung in Städten und Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ der betreffenden Spalte zu einem bestimmten Anteil von Gebäuden überdeckt sind. Die Summe der roten Balken in jeder Spalte (z. B. für jeden Gemeindetyp) ist 1.

Für alle vier Nutzungen ist eine sukzessive Verschiebung des Schwerpunkts der statistischen Verteilung der Gebäudeüberdeckungsanteile von „oben“ (geringe Gebäudeüberdeckungsanteile) bei Gemeindetyp 1 nach „unten“ (hoher Gebäudeüberdeckungsanteile) bei Gemeindetyp 8 erkennbar. So haben z. B. die meisten ATKIS-Siedlungsflächen der Nutzung „Wohnen“ in Gemeinden des Gemeindetyps 1 (26,4 %) eine Gebäudeüberdeckung zwischen 8,5 und 11 %, wohingegen die meisten ATKIS-Siedlungsflächen der Nutzung Wohnen in Gemeinden des Gemeindetyps 8 (20,5 %) eine Gebäudeüberdeckung von über 26 % haben.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten:

- ▶ Der von Gebäuden überdeckte Anteil steigt bei allen Nutzungen mit dem Gemeindetyp (von 1 bis 8) an. Je höher die – vor allem durch den Bodenpreis bedingte – städtebauliche Dichte, desto höher im Mittel der von Gebäuden überdeckte Anteil.
- ▶ Gleichwohl gibt es in allen Gemeindetypen und bei allen Nutzungen Siedlungs- und Verkehrsflächen mit Gebäudeüberdeckungsanteilen im gesamten Wertespektrum der Abbildung 13 bis Abbildung 16. Meint: Auch in Gemeinden den Typs 1 finden sich Flächen mit einem sehr hohen Gebäudeüberdeckungsanteil und auch in Gemeinden den Typs 8 gibt es Flächen mit einem sehr niedrigen Gebäudeüberdeckungsanteil.

Für die weitere Modellierung wird daher die in den beiden vorstehenden Abbildungen gezeigte Häufigkeitsverteilung zur Abbildung der Siedlungsstruktur der Flächenneuanspruchnahme verwendet.

2.4.3 Durchschnittlicher Anteil der restlichen Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ in Abhängigkeit der Gebäudeüberdeckung und der Nutzung

Mit den Ergebnissen des vorstehenden Kapitels 2.4.2 liegt eine detaillierte empirische Grundlage zur Abschätzung des von Gebäuden überdeckten Anteils an der Siedlungs- und Verkehrsfläche vor. Für die Abschätzung der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahmen ist es neben der Gebäudeüberdeckung aber auch relevant, die Flächenanteile der anderen differenzierten „Nachher“-Nutzungsarten zu kennen. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt ein empirischer Zusammenhang zwischen dem Anteil der von Gebäuden überdeckten Flächen und den Anteilen der restlichen Nutzungsarten hergeleitet.

Hierzu wurde für über 2.000 ha Siedlungsfläche eine Oberflächenklassifizierung anhand von Luftbildern durchgeführt. Diese Oberflächenklassifizierung erfolgte durch die Firma mundialis, Bonn, im Rahmen eines Unterauftrags. Das Forschungsteam übergab mundialis eine ausgewählte Stichprobe von Flächen unterschiedlicher Nutzung und Bebauungsdichte mit einer Gesamtfläche von 2.000 ha. Um die empirischen Ergebnisse auf die Flächenneuanspruchnahme anwenden zu können, wurde bei der Auswahl der Flächen darauf geachtet, dass es sich ausschließlich um Siedlungs- und Verkehrsflächen handelt, die nach 1950 entstanden sind. mundialis wendete originäre Algorithmen an, welche Luftbilder, anderen Datenquellen der Fernerkundung sowie die amtlichen Vermessungsdaten verknüpften, um für die unterschiedlichen zu untersuchenden Flächen die jeweiligen Flächenanteile unterschiedlicher Überdeckungen zu quantifizieren.

Einen beispielhaften Ausschnitt der Oberflächenklassifikation zeigt Abbildung 17. Unterschieden wurde zwischen den folgenden Überdeckungen

- ▶ Gebäude (rosa)
- ▶ Sonstige versiegelte Fläche (grau)
- ▶ Niedrige Vegetation (hellgrün)
- ▶ Hohe Vegetation (dunkelgrün)

Der sonstigen Versiegelung wurden in der Auswertung auch Gartenhäuschen und ähnliche Kleingebäude zugeordnet, die in Abbildung 17 rot eingefärbt sind. Zudem wurden Wasserflächen klassifiziert, deren Anteil aber keine große Rolle spielte. Durch eine Verschneidung der Klassifizierung (Abbildung 17) mit den ALKIS-Objektgrenzen war es möglich, die „sonstige versiegelte Fläche“ in eine öffentliche und eine private Versiegelung zu differenzieren. Wie in Kapitel 2.4.4 noch genauer beschrieben, wurden bei der Oberflächenklassifizierung Bäume gesondert erfasst. Die unter den Bäumen liegenden (und auf dem Luftbild nicht sichtbaren) Flächen wurden den vorstehenden Nutzungsarten zugeordnet. Die Aufteilung wurde anhand der jeweils verfügbaren Umfeldinformationen geschätzt.

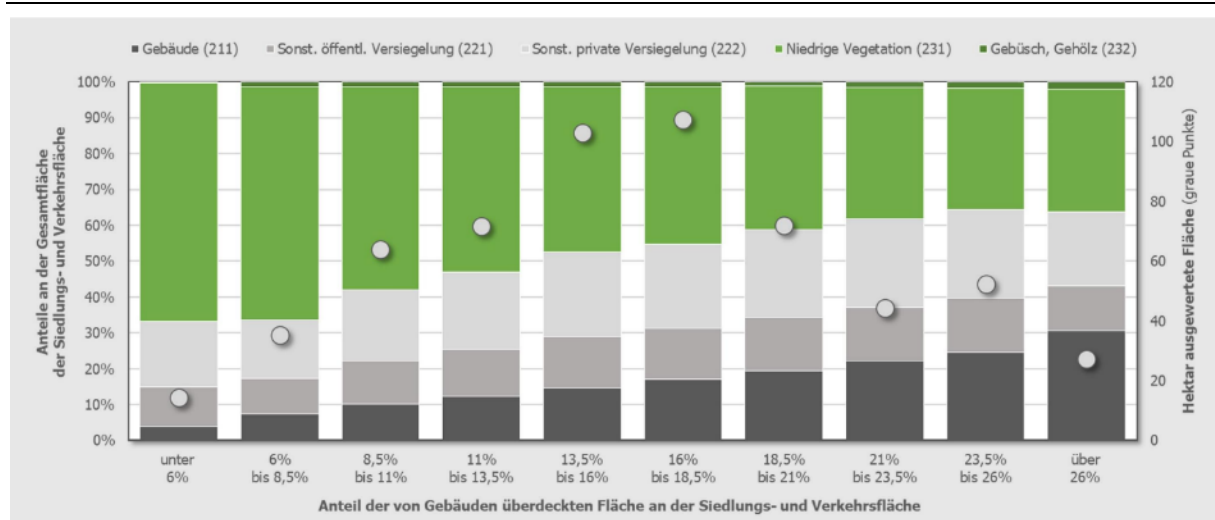
Abbildung 17: Exemplarische Illustration der Oberflächenklassifizierung von über 2.000 ha ATKIS-Siedlungsbereichen anhand von Luftbildern durch die Firma mundialis



Quelle: Luftbild: Geobasis NRW (DOP); Klassifizierung: mundialis
Rosa/rot/grau/hellgrün/dunkelgrün: Gebäude (rosa), Kleingebäude wie z. B. Gartenhäuser (rot), sonstige Versiegelung, insbesondere Straßen (grau), niedrige Vegetation (Rasen, Garten, usw.) (hellgrün), hohe Vegetation mit einer Höhe von mindestens 50 cm (dunkelgrün).

Die nachfolgenden Abbildungen und Tabellen zeigen die aus dieser Oberflächenklassifizierung der Luftbilder für die Nutzungen „Wohnen“ (Abbildung 18, Tabelle 4), „Mischnutzung“ (Abbildung 19, Tabelle 5), „Besondere funktionale Prägung“ (Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR Abbildung 20, Tabelle 6) und „Industrie und Gewerbe“ (Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR Abbildung 21, Tabelle 7) abgeleiteten Flächenanteile.

Abbildung 18: Wohnbauflächen: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils



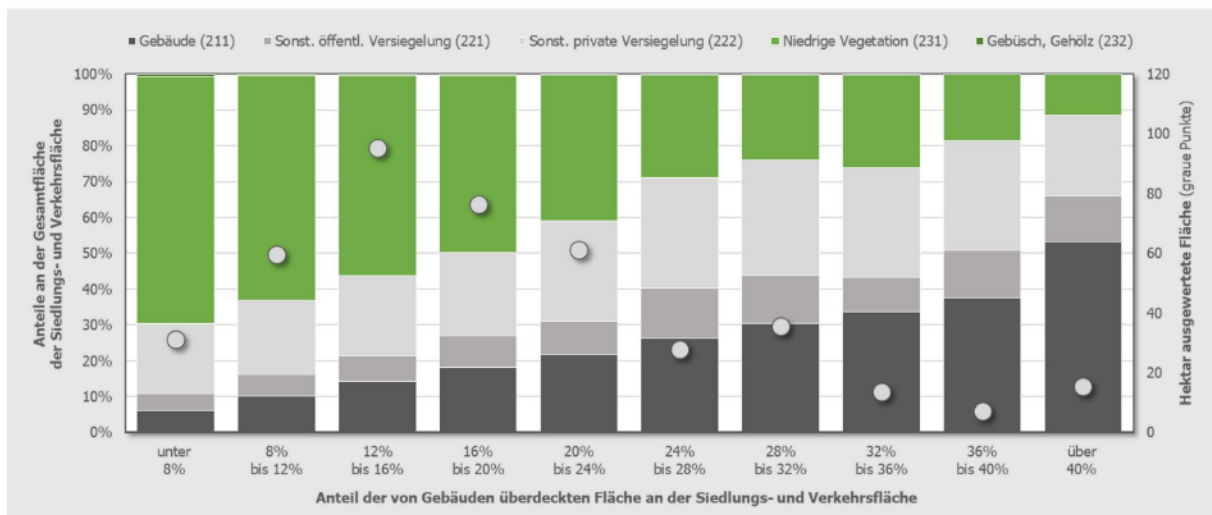
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis der Oberflächenklassifizierung durch die Firma mundialis
Insgesamt: 591,4 ha Wohnbaufläche

Tabelle 4: Wohnbauflächen: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile

Anteil der von Gebäuden überdeckten Fläche an der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Klasse)	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
unter 6%	4,0%	10,2%	18,5%	66,0%	1,3%
6% bis 8,5%	7,0%	11,0%	19,2%	61,5%	1,3%
8,5% bis 11%	10,0%	12,0%	20,1%	56,5%	1,4%
11% bis 13,5%	12,0%	13,0%	21,5%	52,1%	1,4%
13,5% bis 16%	15,0%	14,3%	23,0%	46,2%	1,5%
16% bis 18,5%	17,0%	14,7%	23,4%	43,4%	1,5%
18,5% bis 21%	19,0%	14,9%	24,2%	40,3%	1,6%
21% bis 23,5%	22,0%	14,9%	24,6%	36,8%	1,7%
23,5% bis 26%	25,0%	15,0%	24,3%	33,9%	1,8%
über 26%	31,0%	15,1%	22,8%	29,2%	1,9%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 19: Flächen gemischter Nutzung: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils



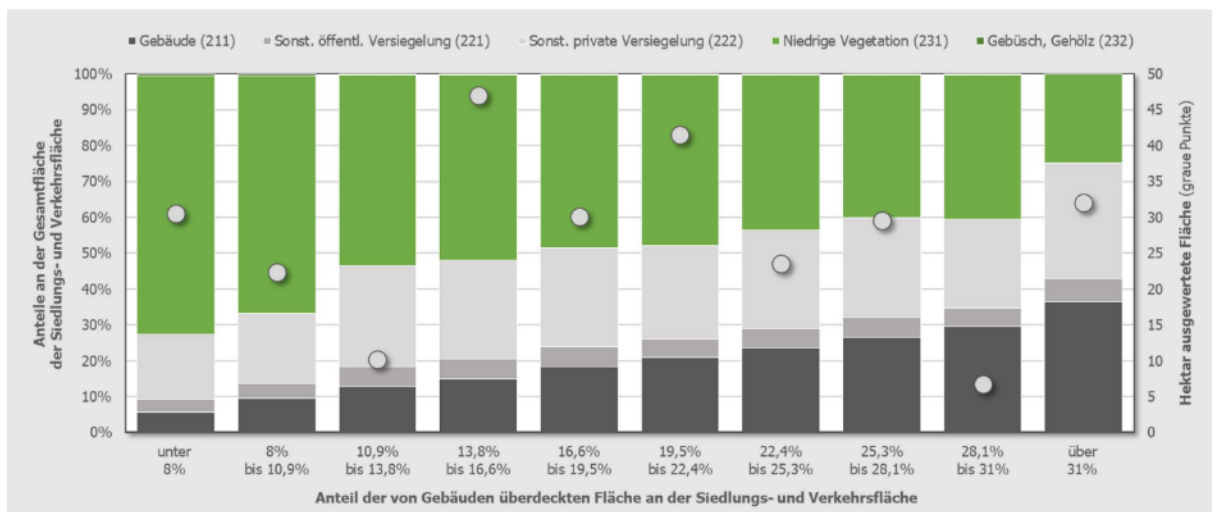
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis der Oberflächenklassifizierung durch die Firma mundialis
Insgesamt: 432,1 ha Flächen gemischter Nutzung

Tabelle 5: Flächen gemischter Nutzung: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile

Anteil der von Gebäuden überdeckten Fläche an der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Klasse)	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
unter 8%	6,0%	5,1%	19,6%	68,7%	0,6%
8% bis 12%	10,0%	6,1%	20,6%	62,7%	0,6%
12% bis 16%	14,0%	7,3%	22,2%	56,0%	0,5%
16% bis 20%	18,0%	8,9%	24,3%	48,3%	0,5%
20% bis 24%	22,0%	10,3%	28,0%	39,3%	0,4%
24% bis 28%	26,0%	11,7%	30,6%	31,4%	0,3%
28% bis 32%	30,0%	12,5%	31,6%	25,6%	0,3%
32% bis 36%	34,0%	13,0%	31,0%	21,8%	0,2%
36% bis 40%	37,0%	13,3%	30,5%	19,0%	0,2%
über 40%	46,0%	13,6%	28,1%	12,1%	0,2%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 20: Flächen besonderer funktionaler Prägung: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils



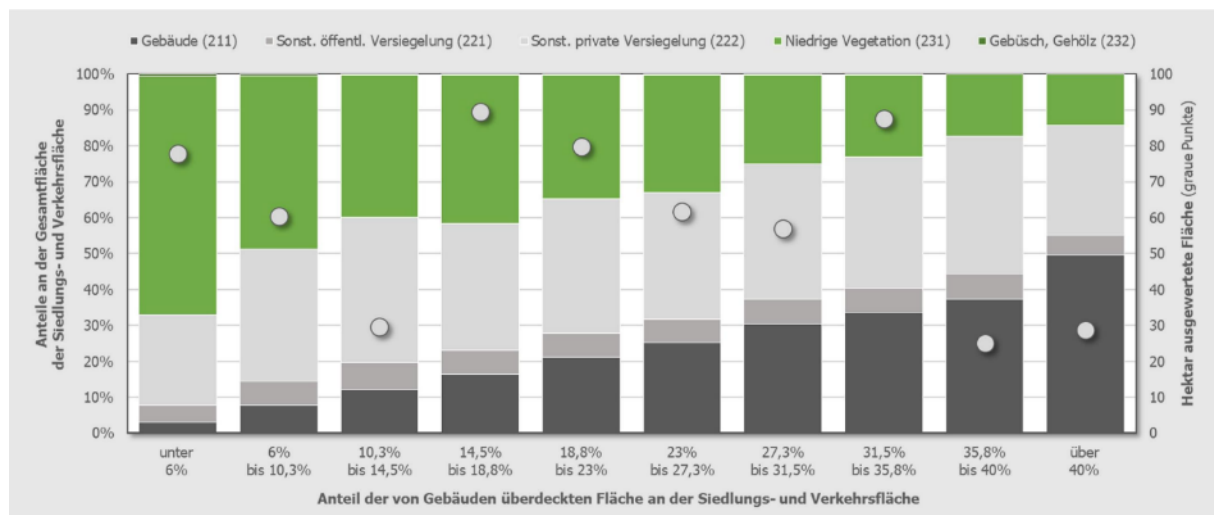
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis der Oberflächenklassifizierung durch die Firma mundialis
Insgesamt: 159,7 ha Flächen besonderer funktionaler Prägung

Tabelle 6: Flächen besonderer funktionaler Prägung: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile

Anteil der von Gebäuden überdeckten Fläche an der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Klasse)	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
unter 8%	6,0%	4,1%	19,2%	70,2%	0,5%
8% bis 10,9%	10,0%	4,5%	21,2%	63,8%	0,5%
10,9% bis 13,8%	13,0%	4,9%	24,0%	57,7%	0,4%
13,8% bis 16,6%	15,0%	5,1%	25,5%	54,0%	0,4%
16,6% bis 19,5%	18,0%	5,3%	26,9%	49,4%	0,4%
19,5% bis 22,4%	21,0%	5,4%	27,4%	45,9%	0,3%
22,4% bis 25,3%	23,0%	5,5%	27,7%	43,5%	0,3%
25,3% bis 28,1%	27,0%	5,7%	28,5%	38,5%	0,3%
28,1% bis 31%	30,0%	6,0%	30,0%	33,7%	0,3%
über 31%	36,0%	6,4%	31,9%	25,5%	0,2%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 21: Industrie- und Gewerbeflächen: Flächenanteile in Abhängigkeit des von Gebäuden überdeckten Flächenanteils



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis der Oberflächenklassifizierung durch die Firma undialis
Insgesamt: 597,2 ha Industrie- und Gewerbefläche

Tabelle 7: Industrie- und Gewerbeflächen: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile

Anteil der von Gebäuden überdeckten Fläche an der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Klasse)	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
unter 6%	3,0%	5,2%	28,0%	63,2%	0,6%
6% bis 10,3%	8,0%	6,0%	33,0%	52,5%	0,5%
10,3% bis 14,5%	12,0%	6,3%	35,0%	46,3%	0,4%
14,5% bis 18,8%	16,0%	6,5%	35,4%	41,7%	0,4%
18,8% bis 23%	21,0%	6,8%	37,0%	34,9%	0,3%
23% bis 27,3%	25,0%	6,8%	37,2%	30,7%	0,3%
27,3% bis 31,5%	30,0%	6,9%	37,8%	25,1%	0,2%
31,5% bis 35,8%	34,0%	6,9%	36,6%	22,3%	0,2%
35,8% bis 40%	37,0%	7,0%	35,0%	20,8%	0,2%
über 40%	49,0%	7,0%	32,0%	11,9%	0,1%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

In den vorstehenden Abbildungen und Tabellen noch nicht enthalten sind die Nutzungen „Plätze“, „Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen“ sowie „Sonstige Siedlungsfreiflächen“, auf denen in der Regel keine oder nur wenige Gebäude stehen. Entsprechend wird für diese Nutzungen nicht nach dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ unterschieden. Gleichwohl wurden auf Basis der Luftbildauswertung auch für diese Nutzungen durchschnittliche Flächenanteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ ermittelt. Tabelle 8 zeigt die für diese drei Nutzungen hergeleiteten Kennwerte.

Tabelle 8: In die Modellierung der Außenentwicklung übernommene Flächenanteile für Nutzungen ohne Differenzierung nach dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“

Nutzung	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Plätze	1,9%	25,7%	45,8%	26,1%	0,4%
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	3,6%	3,9%	14,2%	77,4%	1,0%
Sonstige Siedlungsfreiflächen	1,6%	7,1%	20,4%	70,4%	0,5%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die vorstehend hergeleiteten Kennwerte ermöglichen eine Schätzung der Flächenanteile eines durchschnittlichen, zu Siedlungs- und Verkehrszwecken neu in Anspruch genommenen Hektars in Abhängigkeit der Nutzung und des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“. Getrennt nach Nutzung wird hierzu die Häufigkeitsverteilung der Gebäudeüberdeckungsanteile (Abbildung 13 bzw. Abbildung 15) mit den Flächenanteilen der fünf Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ aus Tabelle 4 bis Tabelle 7 multipliziert.

Wichtet man diese Flächenanteile anschließend nach dem durchschnittlichen Flächenanteil der Nutzungen nach Gemeindetyp „Nutzungen“ aus Abbildung 10 in Kapitel 2.4.1.1, so ergibt sich ein durchschnittlicher Flächenanteil der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ in Abhängigkeit von Gemeindetyp „Nutzungen“ und „Städtebauliche Dichte“. Die nachstehende Abbildung 22 zeigt dies für alle Gemeindetypen „Nutzungen“ (Spalten) sowie beispielhaft für die Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ 1 (sehr geringe Dichte, oberer Teil der Abbildung) bzw. 8 (sehr hohe Dichte, unterer Teil der Abbildung).

Die Unterschiede zwischen den Gemeindetypen „Nutzungen“ ergeben sich aus dem unterschiedlichen Gewicht der Nutzungen am durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung. Die Wichtungsanteile der Nutzungen finden sich in Abbildung 10. Die unterschiedlichen Flächenanteile beim Vergleich der Gemeindetypen „Städtebaulichen Dichte“ sind Ergebnis der in diesem Kapitel vorstehend erläuterten Anteile der Gebäudeüberdeckungsanteile (Abbildung 13 und Abbildung 15) sowie der darauf aufbauenden Anteile der restlichen Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“.

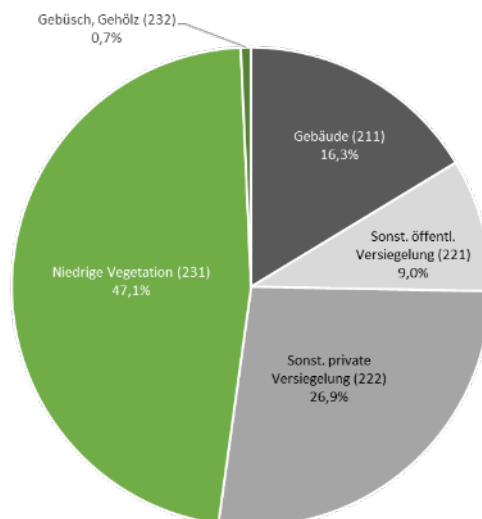
Wichtet man die Gemeindetypen an deren Anteil an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021, so ergibt sich der in Abbildung 23 gezeigte Bundesschnitt. Dieser zeigt, dass die häufig zitierte Faustformel „Die Versiegelung entspricht etwa der Hälfte des Flächenverbrauchs“ sehr nahe an den im Projekt empirisch ermittelten Werten liegt.

Abbildung 22: Durchschnittliche Flächenanteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ pro Hektar Außenentwicklung nach Gemeindetyp „Nutzungen“ (Spalten) und „Städtebauliche Dichte“ (exemplarischer Gemeindetyp 1 oben und Gemeindetyp 8 unten)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 23: Bundesschnitt der Flächenanteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ pro Hektar Außenentwicklung



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die Zahlen in Klammern sind die intern genutzten Codes zur Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Nutzungsarten.

2.4.4 Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich in Abhängigkeit der Gebäudeüberdeckung und der Nutzung

Bei den Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ wurden die neu gepflanzten Bäume extra betrachtet (siehe Kapitel 2.2 im Ergebnisband). Um auch hier zu einer belastbaren empirischen Basis zu kommen, wurde parallel zur vorstehend beschriebenen Oberflächenklassifizierung eine Erkennung von Bäumen und Büschen in den gleichen Luftbildern durchgeführt (Abbildung 24).

Abbildung 24: Differenzierung der hohen Vegetation in Bäume und Hecken/Gehölze sowie Identifizierung der Anzahl von Einzelbäumen im Rahmen der Luftbildauswertung (gleicher Luftbildausschnitt wie in Abbildung 17)



Quelle: Luftbild: Geobasis NRW (DOP); Klassifizierung: mundialis

Rot/gelb/blau: Vegetationsobjekte mit einer Höhe von über 3,00 m (rot), zwischen 3,00 und 1,50 m (gelb) bzw. kleiner 1,50 m (blau).

Bei dieser Luftbildauswertung wurden alle Vegetationsobjekte ab einer Höhe von 50 cm erfasst und klassifiziert. Da es sich bei den Luftbildern in der Mehrzahl um Siedlungsgebiete handelt, die schon 20 oder mehr Jahre besiedelt sind, wurden Vegetationsobjekte zwischen 50 cm und 3 Metern als Hecken und Gebüsch sowie alle Vegetationsobjekte über 3 Meter Höhe als Bäume gezählt. Der im vorstehenden Kapitel 2.4.3 quantifizierte Flächenanteil der Nutzungsart „Gebüsch und Gehölz“ entspricht der Bodenbedeckung aller Vegetationsobjekte über 50 cm

Höhe. Dieser Nutzungsart werden in Kapitel 4 die Treibhausgaswirkungen des Gebüschs zugeordnet. Wie dargestellt werden die Bäume im Zustand „nach der Flächenneuanspruchnahme“ hinsichtlich ihrer Treibhausgaswirkung gesondert betrachtet. Deren Anzahl wird aus den Luftbildauswertungen (Abbildung 24) abgeleitet.

Aus diesen Auswertungen wurden die Modellparameter geschätzt, aus denen sich die in Tabelle 9 zusammengestellten Kennwerte zur Anzahl der neu gepflanzten Bäume pro Hektar Außenentwicklung ableiten lassen. Erkennbar ist, dass die Zahl der Bäume pro Hektar bei steigender städtebaulicher Dichte abnimmt. Bemerkenswert ist gleichwohl, dass der Umfang dieses Rückgangs relativ überschaubar ist. So liegt die gemessene Anzahl der Bäume pro Hektar Siedlungs- und Verkehrsflächen im Gemeindetyp 8 mit der höchsten städtebaulichen Dichte immer noch bei 73 % (Mischnutzung), 87 % (Industrie und Gewerbe), 89 % (besondere funktionale Prägung) bzw. 97 % (Wohnen) der Anzahl der Bäume pro Hektar Siedlungs- und Verkehrsflächen im Gemeindetyp 1 mit der niedrigsten städtebaulichen Dichte.

Tabelle 9: Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Bäume pro Hektar Außenentwicklung (Modellannahme auf Basis der vorstehenden Luftbildauswertung)

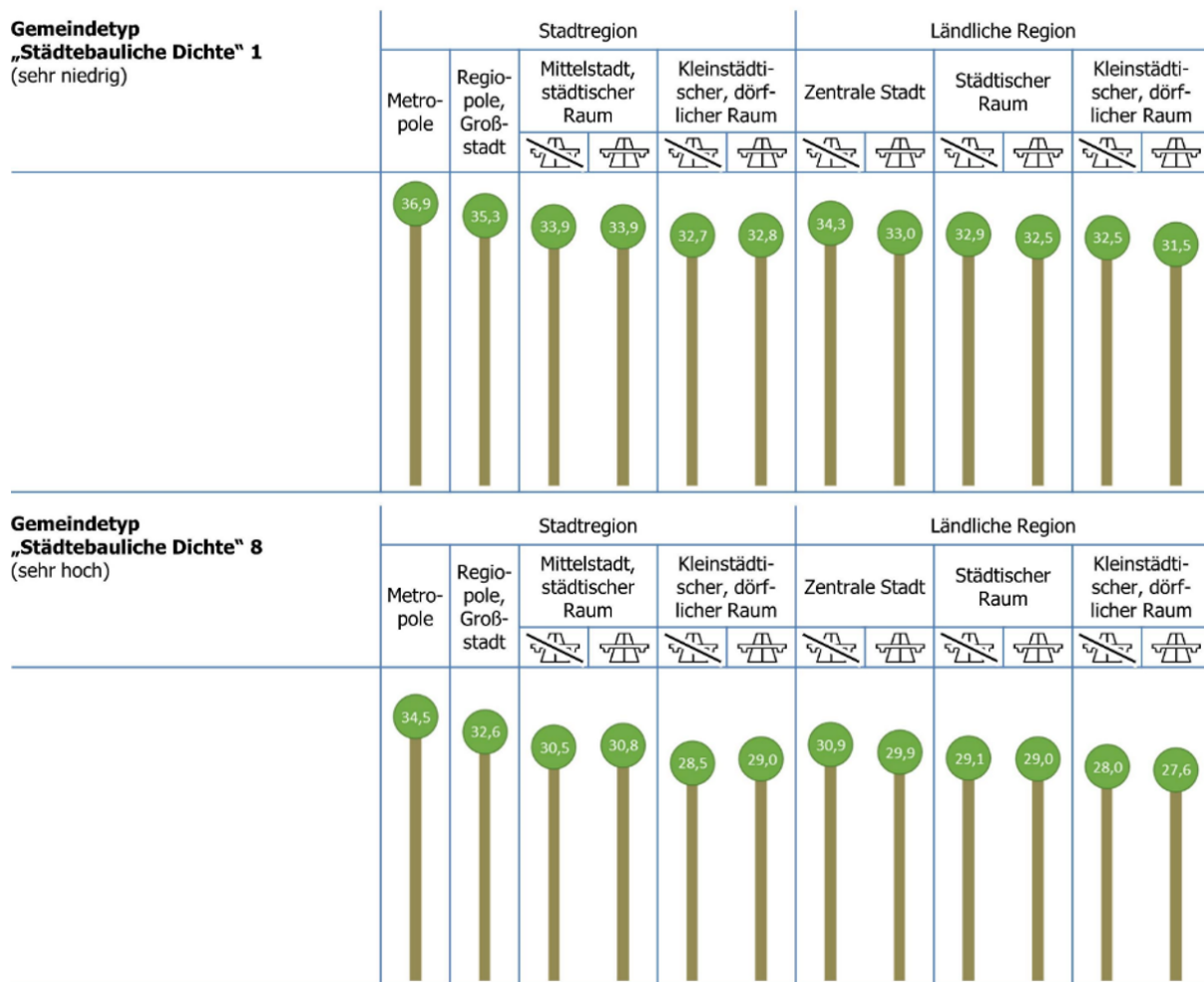
Nutzung	Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“							
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	Typ 7	Typ 8
Wohnen	39,4	39,2	39,1	38,9	38,8	38,5	38,2	38,1
Mischnutzung	30,5	29,8	28,6	27,6	27,1	26,5	25,1	22,2
Besondere funktionale Prägung	50,4	50,3	48,6	48,5	47,8	46,9	45,9	44,9
Industrie und Gewerbe	21,3	20,7	20,5	20,4	20,0	19,3	19,0	18,5
Plätze	32,5							
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	42,9							
Sonstige Siedlungsfreiflächen	67,6							

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die in Tabelle 9 dargestellten Kennwerte sind bereits eine Zusammenfassung der für die Modellierung verwendeten Kennwerte. Für diese wurde ein Kennwert „Bäume pro Hektar“ für jede Kombination aus Nutzung und Gebäudebedeckungsanteilsklasse gebildet. Die Gebäudebedeckungsanteilsklassen entsprechen dabei der Klasseneinteilung aus Abbildung 13 bzw. Abbildung 15.

Verknüpft man die Kennwerte zusätzlich mit den Anteilen der Nutzungen für die Gemeindetypen „Nutzungen“, so ergeben sich die in Abbildung 25 gezeigten Mittelwerte für die Gemeindetypen „Nutzungen“ (in Spalten) und „Städtebauliche Dichten“. Wie bei Abbildung 22 werden auch hier aus Platzgründen nur exemplarisch die Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ 1 (oben) und 8 (unten) dargestellt.

Abbildung 25: Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Bäume pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich (d. h. exklusive außerörtlicher Verkehrsflächen) nach Gemeindetyp „Nutzungen“ (Spalten) und „Städtebauliche Dichte“ (exemplarisch Gemeindetyp 1 oben und Gemeindetyp 8 unten)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Gewichtet man – wie in Abbildung 23 – die Gemeindetypen anhand ihres Anteils an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021, so liegt der Bundesschnitt bei 31,8 Bäumen pro Hektar Siedlungsfläche, die im Außenbereich entsteht.

2.5 Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich: Gemeindespezifische Nutzungsänderungsmatrizen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme

2.5.1 Durchschnittliche Nutzungsänderungen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich nach Gemeinde

Mit den in den vorstehenden Kapiteln beschriebenen Herleitungen liegen für jede Gemeinde in Deutschland die folgenden Abschätzungen vor:

- ▶ Aus Kapitel 2.3: Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ am durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung (ohne Verkehrsflächen außerorts)
- ▶ Aus Kapitel 2.4: Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ am durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung (ohne Verkehrsflächen außerorts)

Verknüpft man diese beiden Abschätzungen, so ergibt sich für jede der 10.994 betrachteten Gemeinden in Deutschland (Gebietsstand 31.12.2021) eine Matrix mit einer Struktur wie in Tabelle 10, die beschreibt, wie viele Quadratmeter welcher Nutzungsart „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in welche Nutzungsart „nach der Flächenneuanspruchnahme“ überführt werden. Die Einzelwerte der Matrix entsprechen der Multiplikation der jeweiligen Anteile der Nutzungsarten „vor“ bzw. „nach der Flächenneuanspruchnahme“.

Aus Platzgründen werden in diesem Methodikband nicht die Matrizen aller 10.994 Einzelgemeinden dargestellt. Stattdessen zeigt die Matrix in Tabelle 10 einen an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021 gewichteten Mittelwert aller Gemeinden.

Die Matrix in Tabelle 10 vereinfacht noch in einer weiteren Hinsicht im Vergleich zur tatsächlich vorgenommenen Modellierung. Wie in Kapitel 2.3 dargestellt wird bei der Vornutzung nämlich zusätzlich nach den Bodentypen „mineralischer Boden“ bzw. „organischer Boden“ unterschieden. Diese Unterscheidung wird in der Modellierung auch in den Nutzungsänderungsmatrizen der Einzelgemeinden beibehalten.

Tabelle 10: Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Status Quo“)

Nach der Flächenneuanspruchnahme Vor der Flächenneuanspruchnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Ackerland	701 qm	388 qm	1162 qm	2049 qm	30 qm
Grünland	528 qm	289 qm	866 qm	1515 qm	22 qm
Streuobst	18 qm	9 qm	27 qm	46 qm	1 qm
Gartenland	24 qm	13 qm	38 qm	65 qm	1 qm
Obstbau	6 qm	3 qm	10 qm	17 qm	0 qm
Weinbau	6 qm	3 qm	10 qm	16 qm	0 qm
Sonst. Landwirtschaftsfl.	11 qm	6 qm	17 qm	29 qm	0 qm
Laubholz	45 qm	25 qm	73 qm	127 qm	2 qm
Nadelholz	48 qm	27 qm	81 qm	144 qm	2 qm
Mischholz	42 qm	23 qm	68 qm	117 qm	2 qm
Gehölz	66 qm	36 qm	108 qm	186 qm	3 qm
Heide	5 qm	3 qm	8 qm	14 qm	0 qm
Unland, vegetationsl. Fl.	132 qm	74 qm	221 qm	389 qm	6 qm

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

In Kapitel 2.3 wurden zudem zwei alternative Szenarien zum zukünftigen Gewicht der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ definiert (Tabelle 2). Vor diesem Hintergrund wird jeder Gemeinde neben der Nutzungsänderungsmatrix für das Vornutzungsszenario „Status Quo“ auch eine Nutzungsänderungsmatrix für das

Vornutzungsszenario „Waldschutz“ zugeordnet. Tabelle 11 zeigt den anhand des jeweiligen gemeindlichen Anteils an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021 gewichteten Mittelwert dieser einzelgemeindlichen Nutzungsänderungsmatrizen für das Vornutzungsszenario „Waldschutz“. Auch hier wurden die Anteilsangaben für den organischen bzw. mineralischen Boden für die Berichtsdarstellung zusammengefasst.

Tabelle 11: Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Waldschutz“)

Nach der Flächenneuanspruchnahme Vor der Flächenneuanspruchnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Ackerland	750 qm	415 qm	1242 qm	2190 qm	32 qm
Grünland	587 qm	321 qm	962 qm	1682 qm	25 qm
Streuobst	20 qm	10 qm	31 qm	51 qm	1 qm
Gartenland	26 qm	14 qm	41 qm	70 qm	1 qm
Obstbau	7 qm	4 qm	11 qm	18 qm	0 qm
Weinbau	7 qm	4 qm	11 qm	17 qm	0 qm
Sonst. Landwirtschaftsfl.	12 qm	6 qm	19 qm	32 qm	0 qm
Laubholz	-	-	-	-	-
Nadelholz	-	-	-	-	-
Mischholz	-	-	-	-	-
Gehölz	74 qm	40 qm	120 qm	208 qm	3 qm
Heide	5 qm	3 qm	9 qm	16 qm	0 qm
Unland, vegetationsl. Fl.	145 qm	81 qm	243 qm	428 qm	6 qm

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die Nutzungsänderungsmatrizen der Gemeinden bilden die Grundlage für die Abschätzung der LULUCF-Treibhausgaswirkungen. Hierzu werden sie mit den Treibhausgaswirkungen der einzelnen Nutzungsänderungen aus Kapitel 4 verknüpft.

2.5.2 Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche im Siedlungsbereich nach Gemeinde

Wie bereits mehrfach erwähnt werden zur Beschreibung des Zustandes „nach der Flächenneuanspruchnahme“ die neu gepflanzten Bäume zusätzlich betrachtet. Hierzu liegen mit den Auswertungen in Kapitel 2.4.4 bereits alle benötigten Werte vor: Jeder Gemeinde wird in Abhängigkeit ihres Gemeindetyps „Nutzungen“ und „Städtebaulichen Dichte“ eine durchschnittliche Anzahl an im Nachgang der Flächenneuanspruchnahme neu gepflanzten Bäumen zugeordnet. Wie am Ende des Kapitels 2.4.4 bereits erwähnt, sind dies im gewichteten

Mittel aller Gemeinden 31,8 Bäumen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (exkl. außerörtliche Verkehrsflächen).

Die gemeindespezifische Anzahl an neu gepflanzten Bäumen pro Hektar Außenentwicklung wird in Kapitel 5 verwendet, um diese Bäume bei der Abschätzung der LULUCF-Treibhausgaswirkungen zu berücksichtigen. Dabei werden sie mit den Treibhausgaswirkungen für neu gepflanzte Bäume verknüpft (siehe Kapitel 4).

2.6 Außerörtliche Verkehrsflächen

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt erfolgt die Abschätzung der Nutzungsänderungen für die Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen nicht wie in den vorstehenden Kapiteln nach Gemeinde differenziert, sondern für Deutschland insgesamt.

Analog zum Vorgehen für die Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich (Kapitel 2.3 bis 2.5) werden dabei zunächst die Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ geschätzt (Kapitel 2.6.1). In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt dann eine Abschätzung der Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ (Kapitel 2.6.2) sowie eine Zusammenführung des Vorher- und Nachher-Zustands in Form von Nutzungsänderungsmatrizen (Kapitel 2.6.3) sowie eine Quantifizierung der Bäume pro Hektar (Kapitel 2.6.4).

2.6.1 Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“

Bezüglich der Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ wird in der Modellierung der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen von der Zusammensetzung in Tabelle 12 ausgegangen. Analog zum Vorgehen in Kapitel 2.3 werden dabei zwei alternative Szenarien der Vornutzung betrachtet.

Den Anteilen des Vornutzungsszenarios „Status Quo“ liegt eine Auswertung der Vornutzung von Flächenneuansprüchen für außerörtliche Verkehrsflächen im Zeitraum 2015-2020 zugrunde, die auf Basis von Daten des IÖR-Monitors ermittelt wurden (IÖR 2023). Dabei wird die besondere Bedeutung der Waldflächen erkennbar, die bei den Flächenneuansprüchen für außerörtliche Verkehrsflächen im Zeitraum 2015-2020 mit 38 % deutlich mehr als ein Drittel aller Neuansprüchen für außerörtliche Verkehrsflächen ausmachen.

Abweichend von diesen Realdaten wird im Vornutzungsszenario „Waldschutz“ unterstellt, dass es gelingt, die Neuansprüchen von Waldflächen für außerörtliche Verkehrsflächen auf null zu reduzieren. Die Anteile aller anderen Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ werden im Vornutzungsszenario „Waldschutz“ entsprechend linear erhöht.

Tabelle 12: Außerörtliche Verkehrsflächen: Anteile der Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ in zwei alternativen Szenarien der Vornutzung

Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	Flächenanteile	
	Vornutzungsszenario „Status Quo“	Vornutzungsszenario „Waldschutz“
Ackerland	30,5%	49,3%
Grünland	13,4%	21,6%
Streuobst	0,5%	0,8%

Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“	Flächenanteile	
Gartenland	0,1%	0,2%
Obstbau	0,2%	0,4%
Weinbau	0,3%	0,5%
Sonst. Landwirtschaftsfläche	0,2%	0,2%
Laubholz	5,9%	-
Nadelholz	16,8%	-
Mischholz	15,3%	-
Gehölz	6,4%	10,1%
Heide	0,4%	0,7%
Unland, vegetationslose Fläche	10,1%	16,2%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Flächen auf trocken gelegten organischen Böden sind anders als in Abbildung 7 im Ergebnisband in den jeweiligen Nutzungsarten enthalten.

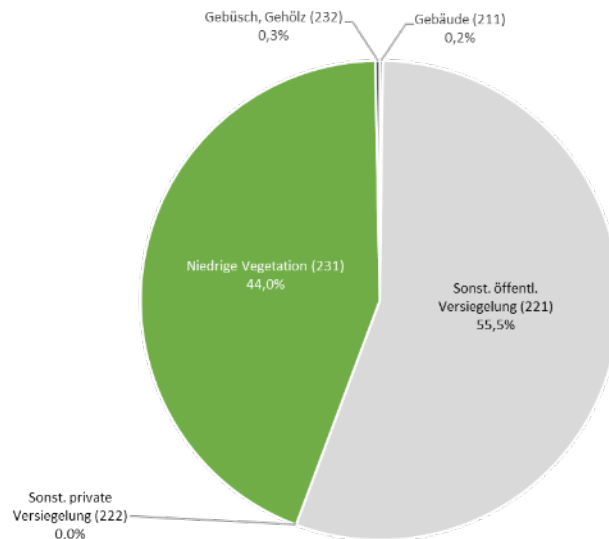
Die in Tabelle 12 genannten Anteile der Nutzungsarten „vorher“ werden in der Modellierung zusätzlich nach mineralischem bzw. organischem Boden differenziert. Dabei wird angenommen, dass 3,6 % der für außerörtliche Verkehrsflächen neu in Anspruch genommenen Flächen auf organischen Böden liegen. Dies entspricht dem bundesweiten Anteil der organischen Böden an der Flächenneuanspruchnahme 2015-2020 insgesamt.

2.6.2 Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“

Eine Luftbilddauswertung von knapp 75 Hektar Verkehrsflächen außerorts ergab die in Abbildung 26 dargestellten Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“. Wenig überraschend dominiert die Nutzungsart „sonstige öffentliche Versiegelung“ mit etwa 55 %. Den Rest machen fast vollständig die Vegetationsflächen mit niedriger Vegetation aus. Hierbei handelt es sich in der Regel um Verkehrsbegleitgrün.

Die Abgrenzung der für diese Anteilsbildung zugrunde gelegten Flächenumrisse ergeben sich aus den ATKIS-Flächeneinheiten und entsprechen damit der Logik der Flächenstatistik.

Abbildung 26: Außerörtliche Verkehrsflächen: Anteile der Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“ (Luftbilddauswertung)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

2.6.3 Durchschnittliche Nutzungsänderungen pro Hektar bundesweit neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche für außerörtliche Verkehrsflächen

Multipliziert man die vorstehenden Annahmen zu

- ▶ den Flächenanteilen „vor der Flächenneuanspruchnahme“
- ▶ den Flächenanteilen organischer bzw. mineralischer Böden sowie
- ▶ den Flächenanteilen „nach der Flächenneuanspruchnahme“

miteinander und differenziert dabei die beiden Vornutzungsszenarien, so ergeben sich die in der nachstehenden Tabelle 13 (Vornutzungsszenario „Status Quo“) und Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR Tabelle 14 (Vornutzungsszenario „Waldschutz“) ausgewiesenen Nutzungsänderungen pro Hektar neu für außerörtliche Verkehrswege in Anspruch genommene Freiraumflächen.

Diese Nutzungsänderungen werden in Kapitel 5 verwendet, um die Verkehrsflächen außerhalb der Siedlungsräume bei der Abschätzung der LULUCF-Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme in den dort definierten Szenarien zu berücksichtigen. Hierbei kommen erneut die in Kapitel 4 hergeleiteten Treibhausgaswirkungen der einzelnen Nutzungsänderungen zur Anwendung.

Tabelle 13: Nutzungsänderungsmatrix pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen (Vornutzungsszenario „Status Quo“)

Nach der Flächen- anspruchnahme		Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Vor der Flächen- anspruchnahme						
Mineralischer Boden	Ackerland	6 qm	1630 qm	0 qm	1292 qm	9 qm
	Grünland	3 qm	715 qm	0 qm	566 qm	4 qm
	Streuobst	0 qm	25 qm	0 qm	20 qm	0 qm
	Gartenland	0 qm	6 qm	0 qm	5 qm	0 qm
	Obstbau	0 qm	13 qm	0 qm	10 qm	0 qm
	Weinbau	0 qm	16 qm	0 qm	13 qm	0 qm
	S. Landwirtschaft	0 qm	8 qm	0 qm	6 qm	0 qm
	Laubholz	1 qm	318 qm	0 qm	252 qm	2 qm
	Nadelholz	3 qm	899 qm	0 qm	713 qm	5 qm
	Mischholz	3 qm	816 qm	0 qm	647 qm	4 qm
	Gehölz	1 qm	341 qm	0 qm	270 qm	2 qm
	Heide	0 qm	23 qm	0 qm	18 qm	0 qm
	Unland, veget.los	2 qm	541 qm	0 qm	429 qm	3 qm
	Organischer Boden	Ackerland	0 qm	61 qm	0 qm	48 qm
Grünland		0 qm	27 qm	0 qm	21 qm	0 qm
Streuobst		0 qm	1 qm	0 qm	1 qm	0 qm
Gartenland		0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Obstbau		0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Weinbau		0 qm	1 qm	0 qm	0 qm	0 qm
S. Landwirtschaft		0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Laubholz		0 qm	12 qm	0 qm	9 qm	0 qm
Nadelholz		0 qm	34 qm	0 qm	27 qm	0 qm
Mischholz		0 qm	30 qm	0 qm	24 qm	0 qm
Gehölz		0 qm	13 qm	0 qm	10 qm	0 qm
Heide		0 qm	1 qm	0 qm	1 qm	0 qm
Unland, veget.los		0 qm	20 qm	0 qm	16 qm	0 qm

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Tabelle 14: Nutzungsänderungsmatrix pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen (Vornutzungsszenario „Waldschutz“)

	Nach der Flächen- anspruchnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Mineralischer Boden	Ackerland	10 qm	2640 qm	0 qm	2093 qm	14 qm
	Grünland	4 qm	1156 qm	0 qm	917 qm	6 qm
	Streuobst	0 qm	41 qm	0 qm	33 qm	0 qm
	Gartenland	0 qm	10 qm	0 qm	8 qm	0 qm
	Obstbau	0 qm	21 qm	0 qm	17 qm	0 qm
	Weinbau	0 qm	27 qm	0 qm	21 qm	0 qm
	S. Landwirtschaft	0 qm	13 qm	0 qm	10 qm	0 qm
	Laubholz	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
	Nadelholz	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
	Mischholz	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
	Gehölz	2 qm	538 qm	0 qm	427 qm	3 qm
	Heide	0 qm	37 qm	0 qm	30 qm	0 qm
	Unland, veget.los	3 qm	866 qm	0 qm	687 qm	5 qm
	Organischer Boden	Ackerland	0 qm	99 qm	0 qm	78 qm
Grünland		0 qm	43 qm	0 qm	34 qm	0 qm
Streuobst		0 qm	2 qm	0 qm	1 qm	0 qm
Gartenland		0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Obstbau		0 qm	1 qm	0 qm	1 qm	0 qm
Weinbau		0 qm	1 qm	0 qm	1 qm	0 qm
S. Landwirtschaft		0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Laubholz		-	-	-	-	-
Nadelholz		-	-	-	-	-
Mischholz		-	-	-	-	-
Gehölz		0 qm	20 qm	0 qm	16 qm	0 qm
Heide		0 qm	1 qm	0 qm	1 qm	0 qm
Unland, veget.los		0 qm	32 qm	0 qm	26 qm	0 qm

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

2.6.4 Durchschnittliche Anzahl an Bäumen pro Hektar bundesweit neu in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche für außerörtliche Verkehrsflächen

Bei der bereits in Kapitel 2.6.2 erwähnten Luftbildauswertung von etwa 75 ha außerörtlicher Verkehrsflächen wurde ermittelt, dass sich auf diesen Flächen im Mittel 13,0 Bäume pro Hektar befinden. Dieser Kennwert wird unverändert in die Modellierung der Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen in den Szenarien des Kapitels 6 auf Basis der Treibhausgaswirkungen für Bäume aus Kapitel 4 übernommen.

3 Modellierung der Flächenkulisse der Innenentwicklung

3.1 Gesuchte Größe: Flächennutzungsänderungen durch eine Innenentwicklung, die einen Hektar Außenentwicklung ersetzt

Nach der Herleitung der für die Bestimmung der Treibhausgaswirkung der alternativen Szenarien der Siedlungsentwicklung relevanten Strukturgrößen der Außenentwicklung (Flächennutzungsänderungen und Baumpflanzungen) im vorigen Kapitel 2, geht es in diesem Kapitel 3 um die entsprechenden Strukturgrößen der Innenentwicklung.

Das besondere an der Herleitung dieser Strukturgrößen ist, dass der Umfang der Innenentwicklung im Rahmen der Szenarien durch den Umfang der vermiedenen Außenentwicklung bestimmt wird. „Innenentwicklung“ im Rahmen der Szenarien meint somit nicht die gesamte Innenentwicklung im Betrachtungszeitraum, sondern lediglich die zusätzliche Innenentwicklung, die zum Ersatz der vermiedenen Außenentwicklung benötigt wird.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Kapitel alle hergeleiteten Strukturgrößen der Innenentwicklung bezogen. Gesucht wird somit zunächst der Umfang der Innenentwicklung der – in Abhängigkeit des Gemeindetyps – notwendig ist, um einen Hektar Außenentwicklung zu ersetzen. Darauf aufbauend wird ermittelt, welche treibhausgasrelevanten Flächennutzungsänderungen für diese Innenentwicklung, d. h. pro Hektar vermiedene Außenentwicklung, benötigt werden.

3.2 Umfang der durch Innenentwicklung zu ersetzenden Bauvolumina pro Hektar Außenentwicklung

Ein Hektar Außenentwicklung wird nicht einfach durch einen Hektar Innenentwicklung ersetzt. Zur Beantwortung der Frage, wie viel Innenentwicklung es pro Hektar Außenentwicklung braucht (und welche Treibhausgaswirkungen diese hat), muss viel eher die Randbedingung gelten, dass die auf dem Hektar Außenentwicklung normalerweise entstehenden Bauvolumina (z. B. qm Geschossfläche) modellhaft durch eine Innenentwicklung mit den gleichen Bauvolumina realisiert werden. Dabei ist zwischen den Nutzungen mit Gebäuden (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe) und den Nutzungen (fast) ohne Gebäude (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, sonstige Siedlungsfreiflächen) zu unterscheiden.

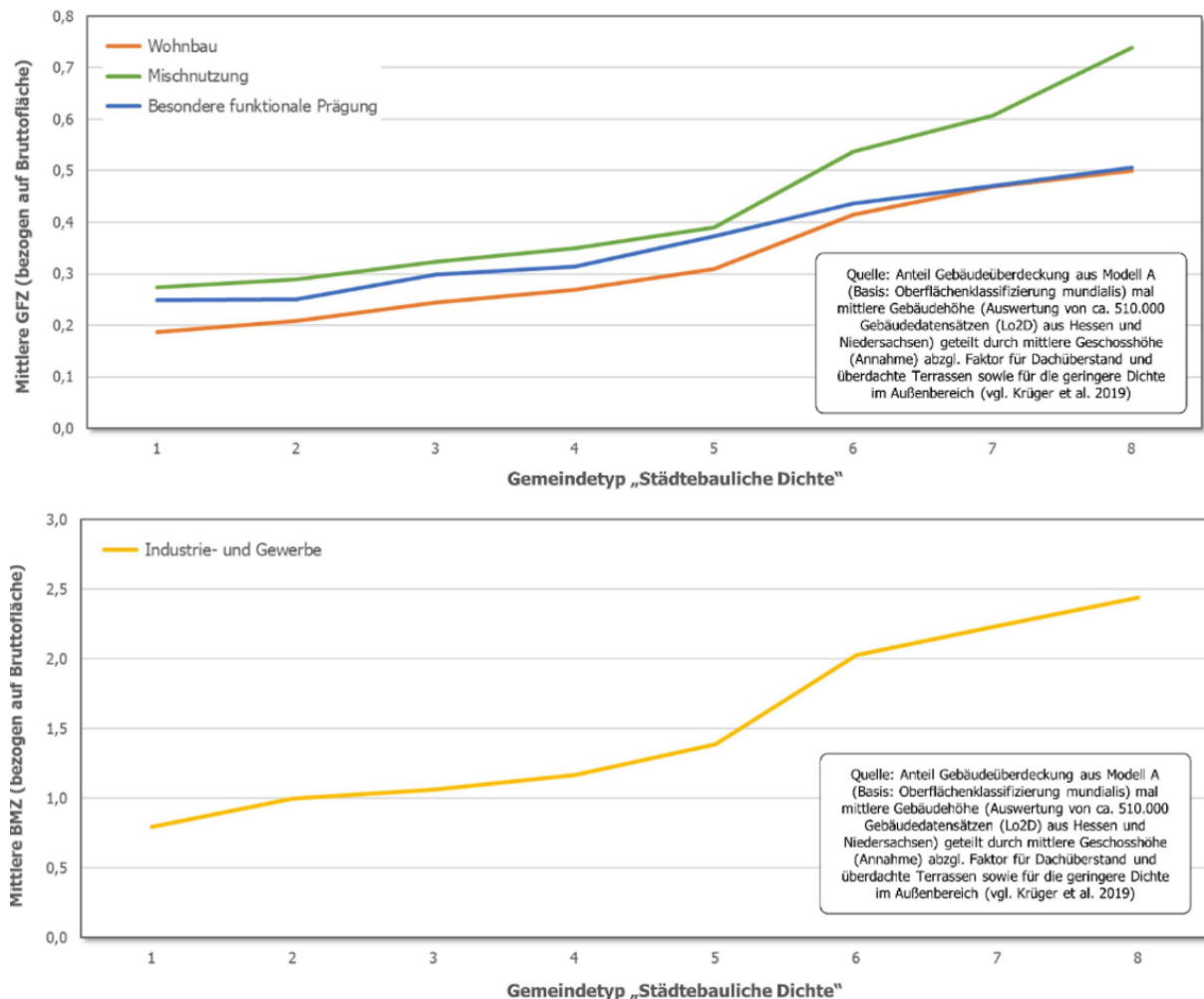
3.2.1 Nutzungen mit Gebäuden (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe)

Bei den Nutzungen mit Gebäuden (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe) bildet die neu geschaffene Geschossflächen bzw. Baumasse eine gute Beschreibungsgröße der Bauvolumina. Hierzu wird in Abbildung 27 ein Verhältnis aus Geschossfläche (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung) bzw. Baumasse (Industrie und Gewerbe) und dem Bruttobauland hergeleitet. Dies entspricht der Logik der Geschossflächen- bzw. Baumassenzahl, allerdings nicht bezogen auf das Baugrundstück (Nettobauland), sondern auf das gesamte Plangebiet (Bruttobauland). Wie aus Abbildung 27 erkennbar, steigen diese Maßzahlen für allen Nutzungen mit dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ an, d. h. in Städten und Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 8 werden pro Hektar Bruttobauland⁶ deutlich mehr Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter

⁶ Vereinfachend gleichzusetzen mit einem Hektar Flächenneuanspruchnahme.

Baumasse realisiert als in Städten und Gemeinden des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ 1. Die in Abbildung 27 ausgewiesenen Werte entstammen einer Verknüpfung der Kennwerte zur Gebäudeüberdeckung aus der in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Luftbildauswertung und einer durchschnittlichen Gebäudehöhe. Letztere wurde aus einer Auswertung der Lo2D-Gebäudedatensätze für Hessen (Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation 2023) und Niedersachsen (LGLN 2023) mit etwa 510.000 Gebäuden gewonnen.

Abbildung 27: Durchschnittliche Geschossflächenzahl (oben) bzw. Baumassenzahl (unten) unterschiedlicher Nutzungen, jeweils bezogen auf die Bruttofläche (Bruttobauland inklusive Erschließungs- und andere Nicht-Nettobauland-Flächen)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis der in der Abbildung aufgeführten Quellen und Daten

Mit den Kennwerten aus Abbildung 27 lässt sich für jede Gemeindetyp-Kombination (Gemeindetyp „Nutzungen“ und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“) ermitteln, wie viel Quadratmeter Geschossflächen bzw. Kubikmeter Baumasse pro Hektar Außenentwicklung entsteht und wie viel entsprechend für einen Ersatz in der Innenentwicklung entstehen muss.

Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass jeder Quadratmeter Geschossfläche bzw. jeder Kubikmeter Baumasse der Außenentwicklung 1:1 in der ersetzenden zusätzlichen Innenentwicklung entsteht (Tabelle 15). Dabei werden die Bauvolumen in der ersetzenden Innenentwicklung eher etwas zu hoch geschätzt, denn in der Realität sind z. B. Wohnungen in der Innenentwicklung tendenziell etwas kleiner als in der Außenentwicklung. Im Sinne einer konservativen Schätzung, d. h. einer Mindest-Abschätzung der Treibhausgas-Einsparpotenziale

durch eine verstärkte Innenentwicklung wird dieser Effekt der höheren Effizienz der Nutzflächen im Innenbereich jedoch nicht berücksichtigt.

Tabelle 15: Ersatzfaktoren „Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung“ für die Nutzungen mit Gebäuden

Nutzung mit Gebäuden	Faktor: Ersetzende Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung
Wohnen	100% der Geschossfläche
Mischnutzung	100% der Geschossfläche
Besondere funktionale Prägung	100% der Geschossfläche
Industrie und Gewerbe	100% der Baumasse

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Multipliziert man die – je nach Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ – pro Hektar Außenentwicklung entstehenden Geschossflächen bzw. Baumassen mit den – je nach Gemeindetyp „Nutzungen“ – unterschiedlichen Anteilen der Nutzungen am durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung in den Gemeinden, so ergeben sich die in Abbildung 28 gezeigten, in Form einer zusätzlichen Innenentwicklung zu realisierenden, Bauvolumen pro Hektar vermiedene Außenentwicklung. Darin noch nicht berücksichtigt sind die im nachfolgenden Kapitel betrachteten Nutzungen ohne Gebäude (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, sonstige Siedlungsfreiflächen). Aus Platzgründen zeigt Abbildung 28 nur die Werte der Kombinationen mit dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ 1 (oben) und 8 (unten). Die Werte aller restlichen Kombinationen mit den Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ 2 bis 7 liegen dazwischen.

Abbildung 28: Pro Hektar ersetzte Außenentwicklung im Innenbereich zu schaffende Geschossflächen bzw. Baumassen

Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse in der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung	Gemeindetyp „Nutzungen“											
	Stadtregion						Ländliche Region					
	Metro- pole	Regio- pole, Groß- stadt	Mittelstadt, städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum		Zentrale Stadt		Städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum	
Wohnbau (qm GF)	492	457	527	551	464	457	484	342	454	443	373	378
Mischnutzung (qm GF)	248	351	622	520	1.015	804	632	495	805	653	1.106	852
Besondere funktionale Prägung (qm GF)	114	128	82	64	47	48	107	90	70	59	44	43
Industrie- und Gewerbe (m³ BM)	2.860	2.904	2.555	2.696	2.031	2.561	2.575	3.409	2.493	2.922	2.136	2.830

Werte für Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ = 1 (sehr gering)	Gemeindetyp „Nutzungen“											
	Stadtregion						Ländliche Region					
	Metro- pole	Regio- pole, Groß- stadt	Mittelstadt, städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum		Zentrale Stadt		Städtischer Raum		Kleinstädti- scher, dörf- licher Raum	
Wohnbau (qm GF)	1.296	1.202	1.387	1.449	1.221	1.204	1.274	900	1.195	1.167	981	994
Mischnutzung (qm GF)	680	961	1.706	1.426	2.781	2.202	1.733	1.356	2.207	1.788	3.032	2.334
Besondere funktionale Prägung (qm GF)	233	261	168	131	95	98	218	185	143	120	89	89
Industrie- und Gewerbe (m³ BM)	8.834	8.968	7.890	8.327	6.274	7.909	7.953	10.530	7.700	9.024	6.596	8.739

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

3.2.2 Nutzungen ohne Gebäude (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, sonstige Siedlungsfreiflächen)

Neben den eben betrachteten Wohn-, Misch-, Gewerbe- bzw. Flächen mit besonderer funktionaler Prägung entstehen im Außenbereich auch Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen.

Wie die Detailbeschreibungen der unterschiedlichen Formen der Innenentwicklung in Kapitel 3.3.1 noch genauer zeigen, erfolgt bei einem Großteil der Innenentwicklung jedoch eine Verdichtung bestehender Strukturen, bei der bestehende Infrastrukturen wie Straßen, Plätze, und Grünflächen nach der Projektrealisierung intensiver genutzt werden. Zusätzliche Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen entstehen nur bei einem Teil der Innenentwicklungsprojekte, vor allem solchen auf größeren Entwicklungsflächen (z. B. der Reaktivierung von Brachen)⁷.

Aus diesem Grund werden im Rahmen der Modellierung die im Außenbereich entstehenden flächenhaften Nutzungen ohne Gebäude nur teilweise durch entsprechende Flächen in der Innenentwicklung ersetzt. Tabelle 16 zeigt die entsprechenden gutachterlichen Setzungen. Diese berücksichtigen auch, dass die genannten Nutzungen auf Innenentwicklungsflächen aufgrund der Rahmenbedingungen der Standorte in der Regel platzsparender realisiert werden als bei der Außenentwicklung.

⁷ Vgl. Innenentwicklungsform 7 in Kapitel 3.3.1.

Tabelle 16: Ersatzfaktoren „Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung“ für die Nutzungen ohne Gebäude

Nutzung (fast) ohne Gebäude	Faktor: Ersetzende Innenentwicklung pro vermiedene Außenentwicklung
Plätze	30% der Bodenfläche
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	20% der Bodenfläche
Sonstige Siedlungsfreiflächen	10% der Bodenfläche

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Setzt man diese Ersatzfaktoren an, so ergibt sich der in Abbildung 29 gezeigte Umfang an in der Innenentwicklung pro Hektar vermiedener Außenentwicklung zu schaffenden Bodenflächen für die genannten Nutzungen ohne Gebäude. Die Werte unterscheiden sich nicht zwischen Gemeinden unterschiedlichen Gemeindetyps „Städtebaulicher Dichte“, aber gleichen Gemeindetyps „Nutzungen“.

Abbildung 29: Pro Hektar ersetzte Außenentwicklung im Innenbereich zu schaffende Bodenflächen für Nutzungen (fast) ohne Gebäude

Quadratmeter Bodenfläche in der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung	Gemeindetyp „Nutzungen“											
	Stadtregion						Ländliche Region					
	Metro-pole	Regio-pole, Groß-stadt	Mittelstadt, städtischer Raum		Kleinstädtischer, dörflicher Raum		Zentrale Stadt		Städtischer Raum		Kleinstädtischer, dörflicher Raum	
Plätze	51	80	35	43	19	36	61	55	31	45	22	44
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	150	154	113	135	129	99	75	116	116	122	108	108
Sonstige Siedlungsfreiflächen	149	107	68	69	33	57	85	92	51	56	45	41

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

3.2.3 Gemeindespezifisches Volumen der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung

Aus einer Kombination der Bau- und Flächenvolumina aus Abbildung 28 und Abbildung 29 lässt sich anhand der Gemeindetypen „Nutzungen“ (Kapitel 2.4.1.1) und „Städtebauliche Dichte“ (Kapitel 2.4.1.2) für jede der 10.994 Gemeinden (Gebietsstand 31.12.2021) das gemeindespezifische Volumen der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung ermitteln.

3.3 Gemeindespezifische Struktur der Innenentwicklung

3.3.1 Formen der Innenentwicklung

Im nächsten Schritt geht es darum, zu konkretisieren, wie die im vorigen Kapitel bestimmten Bau- und Flächenvolumina in der Innenentwicklung realisiert werden. Um bestimmen zu

können, welche treibhausgasrelevanten Veränderungen des Bodens und der Vegetation (Kapitel 4) dabei entstehen, muss die Struktur der Innenentwicklung genauer beschrieben werden.

Dazu wird im Rahmen der Modellierung zwischen acht möglichen Formen der Innenentwicklung unterschieden. Wie Abbildung 30 verdeutlicht, erfolgt die Innenentwicklung entweder auf Ebene von Einzelgebäuden oder auf der Ebene größerer Entwicklungsflächen. Neue Einzelgebäude entstehen auf Baulücken (Form 1), durch einen (häufig vergrößerten) Ersatzneubau abgerissener Gebäude (Form 2) sowie durch den Bau zusätzlicher Gebäude auf bereits teilweise bebauten Grundstücken, z. B. in Folge einer Grundstücksteilung (Form 3). Zusätzliche Geschossfläche entsteht zudem durch Umbau bestehender Einzelgebäude durch Aufstockungen (Form 4) oder Anbauten (Form 5). Auch die Aktivierung von Leerstand (Form 6), z. B. durch eine Sanierung, erhöht die genutzte Geschossfläche in einer Gemeinde. Im Gegensatz zu diesen Projekten an Einzelgebäuden brauchen Vorhaben auf größeren Entwicklungsflächen in der Regel eine innere Gebietserschließung. Häufige Formen sind die Nachnutzung von Brachen (z. B. ehemaligen Industrie-, Bahn- oder Kasernenflächen, Form 7) sowie die Bebauung von Siedlungsfreiflächen (z. B. alten Sportplätzen oder Kleingartenflächen, Form 8).

Abbildung 30: Unterscheidung von acht Formen der Innenentwicklung

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“					Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau	
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen
vorher								
nachher								
Be-schrei-bung	Bebauung freier Baugrundstücke	Abriss bestehender Gebäude und Ersatz durch neue, oft größere Gebäude	Zusätzliche Gebäude auf bereits bebauten Grundstücken (auch „Pfeifenstiel“)	Zusätzliche Etagen auf bestehende Gebäude ohne zusätzliche Flächenüberbauung	Seitliche Erweiterung bestehender Gebäude	Keine bauliche Veränderung (außer ggf. Sanierung)	Nachnutzung ungenutzter baulich geprägter Siedlungs- und Verkehrsflächen, oft mit neuer Erschließung	Bebauung bisheriger Siedlungsfreiflächen (z.B. Sportplätze, Kleingärten, Parks) ggf. mit neuer Erschließung

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Diese acht Formen unterscheiden sich u. a. hinsichtlich

- ▶ des Umfangs der pro Maßnahme entstehenden zusätzlichen Geschossfläche, Baumasse oder umgenutzten Bodenfläche
- ▶ der Relevanz für die betrachteten sieben Nutzungen aus Kapitel 2.4.1.1
- ▶ ihrer mengenmäßigen Bedeutung für die Innenentwicklung einer Stadt oder Gemeinde insgesamt – in Abhängigkeit des Gemeindetyps
- ▶ sowie des Umfangs der treibhausgasrelevanten Eingriffe in Boden und Vegetation.

Zu diesen Aspekten werden in den nachfolgenden Kapiteln jeweils Annahmen hergeleitet.

3.3.2 Zusätzliche Bauvolumina pro Hektar Innenentwicklung

In einem ersten Schritt zur genaueren Beschreibung der acht Innenentwicklungsformen aus Abbildung 30 geht es um die Frage, wie viel zusätzliche Geschossflächen bzw. Baumasse pro

Hektar Innenentwicklung entsteht. Hierzu muss jedoch vorab geklärt werden, was genau mit „einem Hektar Innenentwicklung“ gemeint ist. Hierzu definiert Abbildung 31 eine Bezugsfläche für jede Form der Innenentwicklung. Diese entspricht jeweils einer Bruttobaulandfläche, deren genauere Definition sich in der untersten Zeile der Abbildung 31 findet. Diese Bezugsfläche wird u. a. genutzt, um die Geschossflächenzahl (GFZ) bzw. Baumassenzahl (BMZ) in den nachfolgenden Abbildungen zu definieren. Diese bezieht sich – abweichend von der sonst üblichen Praxis sowie in Anlehnung an Abbildung 27 – auf das Bruttobauland, d. h. die eben festgelegte Bezugsgröße zur Beschreibung der Innenentwicklungsfläche.

Abbildung 31: Bezugsfläche = Bruttofläche: Was meint jeweils „ein Hektar Innenentwicklungsfläche“?

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“					Ebene „Entwicklungsflächen“	
	1) Schließung Baulücke	2) Flächige Nachverdichtung	3) Aufstockung und Dachgeschossausbau	4) Abriss und Neubau	5) Leerstandsaktivierung	6) Brachflächenentwicklung	7) Bebauung Siedlungsfreiflächen
vorher							
nachher							
Definition Bruttobauland	Bruttobauland = Nettobauland (Baugrundstücke) zzgl. pauschal 20% für öffentliche Erschließungs-, Grün- und Daseinsvorsorgeflächen					Bruttobauland, d.h. Baugrundstücke plus ggf. neu geschaffene öffentliche Erschließungs-, Grün- und Daseinsvorsorgeflächen	

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Auf Basis dieser Definitionen finden sich in den nachfolgenden vier Abbildungen Schätzwerte für den Zuwachs der GFZ⁸ bzw. BMZ⁹ durch die jeweilige Form der Innenentwicklung. Der Zuwachs der GFZ bzw. BMZ entspricht der Differenz zwischen der genutzten GFZ bzw. BMZ vor und nach der Innenentwicklungsmaßnahme. Die Schätzwerte wurden in Anlehnung an reale Projekte festgelegt. Die Festlegung erfolgte jeweils für alle Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“. Aus Platzgründen sind in den nachfolgenden Abbildungen jeweils nur die Werte für den Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ 1 (sehr geringe Dichte) und „Städtebauliche Dichte“ 8 (sehr hohe Dichte) dargestellt. Die Werte aller anderen Gemeindetypen liegen dazwischen.

⁸ Bezogen auf die Bruttobaulandfläche.

⁹ Bezogen auf die Bruttobaulandfläche.

Abbildung 32: Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Wohnen

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“										Ebene „Entwicklungsfläche“			
	Neubau			Umbau			Sanierung		Neubau					
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen						
vorher						$\uparrow=0$ $\uparrow=0$								
nachher						$\uparrow>0$ $\uparrow>0$								
GemTyp Sb. Dichte	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch
GFZ *) vorher	0,00	0,00	0,15	0,30	0,18	0,35	0,22	0,50	0,20	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
GFZ *) nachher	0,25	0,60	0,28	0,60	0,36	0,70	0,35	0,85	0,35	0,85	0,23	0,63	0,25	0,95
Zuwachs GFZ *)	0,25	0,60	0,13	0,30	0,18	0,35	0,13	0,35	0,15	0,45	0,23	0,63	0,25	0,95

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) bezogen auf die Bruttobaulandfläche. Nur genutzte Geschossfläche.

Abbildung 33: Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Mischnutzung

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“										Ebene „Entwicklungsfläche“			
	Neubau			Umbau			Sanierung		Neubau					
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen						
vorher						$\uparrow=0$ $\uparrow=0$								
nachher						$\uparrow>0$ $\uparrow>0$								
GemTyp Sb. Dichte	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch
GFZ *) vorher	0,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,30	0,55	0,30	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
GFZ *) nachher	0,38	0,95	0,40	0,95	0,45	0,95	0,45	1,00	0,45	1,00	0,34	0,92	0,40	1,05
Zuwachs GFZ *)	0,38	0,95	0,15	0,45	0,20	0,45	0,15	0,45	0,15	0,50	0,34	0,92	0,40	1,05

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) bezogen auf die Bruttobaulandfläche. Nur genutzte Geschossfläche.

Abbildung 34: Zuwachs der Geschossflächenzahl *) durch Innenentwicklung: Besondere funktionale Prägung

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“										Ebene „Entwicklungsfläche“			
	Neubau			Umbau			Sanierung		Neubau					
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dach.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen						
vorher														
nachher														
GemTyp Sb. Dichte	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch
GFZ *) vorher	0,00	0,00	0,20	0,50	0,20	0,50	0,28	0,45	0,28	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
GFZ *) nachher	0,32	0,65	0,35	0,70	0,38	0,75	0,43	0,80	0,41	0,85	0,31	0,63	0,35	0,65
Zuwachs GFZ *)	0,32	0,65	0,15	0,20	0,18	0,25	0,15	0,35	0,13	0,40	0,31	0,63	0,35	0,65

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) bezogen auf die Bruttobaulandfläche. Nur genutzte Geschossfläche.

Abbildung 35: Zuwachs der Baumassenzahl *) durch Innenentwicklung: Industrie und Gewerbe

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“										Ebene „Entwicklungsfläche“			
	Neubau			Umbau			Sanierung		Neubau					
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dach.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen						
vorher														
nachher														
GemTyp Sb. Dichte	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch	1 gering	8 hoch
BMZ *) vorher	0,00	0,00	0,50	2,00	0,60	2,00	0,80	2,50	0,80	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
BMZ *) nachher	1,00	3,20	1,10	3,40	1,20	3,50	1,10	3,80	1,20	4,00	1,00	3,05	1,25	3,50
Zuwachs BMZ *)	1,00	3,20	0,60	1,40	0,60	1,50	0,30	1,30	0,40	1,50	1,00	3,05	1,25	3,50

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*) bezogen auf die Bruttobaulandfläche. Nur genutzte Geschossfläche.

3.3.3 Gemeindespezifische Anteile der Innenentwicklungsformen

Die acht Innenentwicklungsformen haben einen sehr unterschiedlichen Anteil am Gesamtvolumen der Innenentwicklung, z. B. gemessen an der mit ihnen neu geschaffenen bzw. wiedergenutzten Geschossfläche. Zudem unterscheiden sich die Anteile zwischen Gemeinden unterschiedlichen Typs.

3.3.3.1 Vorgehen bei der Schätzung der Anteile der Innenentwicklungsformen am Gesamtvolumen der Innenentwicklung

In einem nächsten Schritt wird daher eine Schätzung vorgenommen, welchen Anteil die genannten Formen in unterschiedlichen Gemeinden am Gesamtvolumen der mit der Innenentwicklung geschaffenen bzw. wiedergenutzten Geschossfläche haben. Diese Schätzung erfolgt anhand der folgenden Schritte:

- ▶ Aus der Baustatistik 2017-2021 wird ein Gesamtvolumen der Bautätigkeit im Innen- und Außenbereich abgeleitet. Dieses umfasst die durch Neubau sowie durch den Aus- und Umbau von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Betrachtungszeitraum neu geschaffene Geschossfläche für Wohnen bzw. andere Nutzungen. Aus diesem mehrjährigen Gesamtvolumen werden Mittelwerte pro Jahr abgeleitet.
- ▶ Dieses Gesamtvolumen pro Jahr wird – getrennt nach Wohn- und Nutzfläche – anhand der statistischen Differenzierung nach Gemeinden auf die acht Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ aufgeteilt.
- ▶ Insbesondere anhand der Arbeiten von Eichhorn & Siedentop (2022), Eichhorn (2023) sowie Krüger et al. (2019) wird eine Schätzung vorgenommen, welcher Anteil des Gesamtvolumens der Innen- bzw. der Außenentwicklung zuzurechnen ist. Dabei wird zwischen den Nutzungen (Wohnen, Mischnutzung, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe) sowie den Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ differenziert.¹⁰
- ▶ Anhand der statischen Differenzierung nach Umbau und Neubau wird eine Schätzung der Summe des Volumens der Umbau-Innenentwicklungsformen 4 (Anbau) und 5 (Aufstockung) vorgenommen. Diese Gesamtsumme wird Gemeindetyp-spezifisch zwischen den beiden Formen aufgeteilt, wobei unterstellt wird, dass Aufstockungen in Gemeinden mit höheren Bodenpreisen und städtebaulichen Dichten einen größeren Anteil ausmachen als in Gemeinden mit niedrigen Bodenpreisen und städtebaulichen Dichten.
- ▶ Für die Gemeindetyp-spezifische Schätzung des Volumens der Leerstandsaktivierung wird u. a. auf Kennwerte und Einschätzungen aus Grade (2023) zurückgegriffen.
- ▶ In die Gemeindetyp- und nutzungsspezifische Schätzung der Aufteilung der Neubau-Innenentwicklungsformen wurden u. a. die BBSR-Innenentwicklungspotenzialstudie (Blum et al. 2022) sowie die Ex-Post-Analyse der Innenentwicklungsaktivitäten der Allianz Oberes Werntal (Müller-Herbers et al. 2019) einbezogen.
- ▶ In die Gemeindetyp- und nutzungsspezifische Schätzung des Anteils der Bebauung von Siedlungsfreiflächen (Form 8) sind Auswertungen aus dem IÖR-Monitor zu Siedlungsentwicklung auf Siedlungsfreiflächen im Zeitraum 2013-2020 eingeflossen.
- ▶ Bei der Abschätzung des Anteils der Brachflächenaktivierungen in den unterschiedlichen Gemeindetypen wurde zudem das Siedlungsflächenmonitoring Nordrhein-Westfalen einbezogen (Osterhage et al. 2022). Auch dieses ermöglichte eine Differenzierung nach Wohn- und Gewerbestandorten sowie nach Bodenpreisregionen.

¹⁰ An dieser Stelle geht ein besonderer Dank an Sebastian Eichhorn (ILS), der dem Projektteam für die Auswertung nach den Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ die Rohdaten der beiden Veröffentlichungen Eichhorn & Siedentop (2022) und Eichhorn (2023) zur Verfügung gestellt hat.

Aus der Zusammenschau dieser Quellen wurden die in den Abbildungen des Kapitels 3.3.3.3 gezeigten Schätzwerte zum Anteil der acht Formen der Innenentwicklung am Gesamtvolumen der mit der Innenentwicklung geschaffenen bzw. wiedergenutzten Geschossfläche hergeleitet.

3.3.3.2 Zwei Szenarien zur Struktur der Innenentwicklung

Die Abbildungen im nachfolgenden Kapitel zeigen dazu jeweils zwei Szenarien zur Struktur der Innenentwicklung:

- ▶ Ein Innenentwicklungsszenario „Alle Formen der Innenentwicklung“ sowie
- ▶ ein Innenentwicklungsszenario „Erhalt Stadtgrün: keine Nutzung von Siedlungsfreiflächen“

Das Szenario „Alle Innenentwicklungsformen“ entspricht der eben skizzierten Schätzung. Abweichend davon unterstellt das Szenario „Erhalt Stadtgrün“, dass in Zukunft für die Innenentwicklung keine Siedlungsfreiflächen mehr in Anspruch genommen werden. Der Anteil der Innenentwicklungsform 8 (Abbildung 30) wird in diesem Szenario auf Null gesetzt. Hintergrund ist der zunehmende Zielkonflikt zwischen der Innenentwicklung und der Klimaanpassung. Während erstere Siedlungsfreiflächen als Entwicklungspotenzial sieht, fordert letztere den Erhalt von Siedlungsfreiflächen aufgrund deren herausgehobener Bedeutung für das Stadtklima. Die Definition des Szenarios „Erhalt Stadtgrün“ erfolgt u. a. in Anlehnung an den neuen Regionalen Flächennutzungsplan Frankfurt/Rhein-Main, demnach alle städtischen Grünflächen erhalten werden sollen und sich die Innenentwicklung auf die Nachverdichtung im Bestand sowie die Entwicklung von Brachflächen konzentrieren soll.

In den nachfolgenden Abbildungen ergeben sich die Anteile der anderen Innenentwicklungsformen (1 bis 7) im Szenario „Erhalt Stadtgrün“ aus einer einheitlichen prozentualen Erhöhung ihres Anteils bis der durch die Herausnahme der Siedlungsfreiflächen (Form 8) fehlende Anteil ausgeglichen ist.

3.3.3.3 Schätzwerte zum Anteil der Innenentwicklungsformen am Gesamtvolumen der Innenentwicklung

Die ermittelten Schätzwerte für die Nutzungen „Wohnen“ und „Mischnutzungen“ zeigt Abbildung 36. Jede Zeile steht für einen Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, in der Abbildung mit „GT-D“ abgekürzt. Die Bedeutung der Brachflächenentwicklungen nehmen bei Gemeindetypen mit höherer städtebaulicher Dichte sukzessive zu. Entsprechend rückläufig ist die Bedeutung der anderen Innenentwicklungsformen. Gleichwohl zeigen einige Innenentwicklungsformen auch gegenläufige Trends. So haben Aufstockungen z. B. in Gemeinden mit höherer städtebaulicher Dichte einen höheren Anteil.

Die Prozentwerte sind jeweils zeilenweise zu lesen. Ihre Zeilensumme für jeden Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ entspricht 100 %.

In der unteren Hälfte der Abbildung sind die Anteile der Innenentwicklungsformen im eben beschriebenen Szenario „Erhalt Stadtgrün“ dargestellt. Wie in Kapitel 3.3.3.2 erläutert, werden in diesem Szenario die Anteile der Innenentwicklungsform 8 (Entwicklung von Siedlungsfreiflächen) auf Null gesetzt und alle anderen Anteile proportional erhöht.

Abbildung 36: Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Geschossfläche: Wohnen und Mischnutzung

Szenario und Gemeindetyp Städt. Dichte	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau		
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen	
IE-Szenario Alle Formen der Innenentwicklung	GT-D 1	32%	4%	2%	4%	6%	5%	13%	34%
	GT-D 2	31%	4%	2%	5%	6%	4%	15%	33%
	GT-D 3	30%	4%	2%	6%	6%	3%	18%	31%
	GT-D 4	29%	4%	2%	7%	6%	2%	21%	29%
	GT-D 5	28%	6%	3%	6%	4%	1%	35%	17%
	GT-D 6	27%	7%	3%	6%	3%	1%	41%	12%
	GT-D 7	24%	7%	3%	6%	3%	1%	45%	11%
	GT-D 8	23%	8%	4%	5%	2%	1%	52%	5%
IE-Szenario Erhalt Stadtgrün: keine Siedlungsfreiflächen	GT-D 1	48%	6%	3%	6%	9%	8%	20%	0%
	GT-D 2	45%	6%	3%	8%	9%	6%	23%	
	GT-D 3	42%	6%	3%	9%	9%	5%	26%	
	GT-D 4	39%	6%	3%	11%	9%	3%	29%	
	GT-D 5	36%	7%	4%	7%	5%	1%	40%	
	GT-D 6	31%	8%	3%	7%	3%	1%	47%	
	GT-D 7	26%	8%	3%	7%	3%	1%	52%	
	GT-D 8	24%	8%	4%	5%	2%	1%	56%	

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

GT-D: Gemeindetyp Städt. Dichte

Abbildung 37 zeigt die entsprechenden Anteile für Vorhaben der Nutzung „besondere funktionale Prägung“. Für diese Kategorie, zu der u. a. Schulgelände zählen, spielt bisher die Nutzungsänderung bisheriger Siedlungsfreiflächen eine besondere Bedeutung. Entsprechend groß sind die Umschichtungen der Anteile im Szenario „Erhalt Stadtgrün“.

Abbildung 37: Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Geschossfläche: Besondere funktionale Prägung

Szenario und Gemeindetyp Städt. Dichte	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau		
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen	
IE-Szenario Alle Formen der Innenentwicklung	GT-D 1	6%	1%	3%	5%	20%	5%	3%	57%
	GT-D 2	9%	1%	5%	6%	19%	4%	4%	52%
	GT-D 3	14%	2%	8%	6%	19%	3%	8%	40%
	GT-D 4	14%	2%	8%	7%	18%	2%	11%	38%
	GT-D 5	17%	4%	11%	6%	15%	1%	19%	27%
	GT-D 6	16%	4%	12%	6%	12%	1%	23%	26%
	GT-D 7	14%	4%	12%	6%	11%	1%	29%	23%
	GT-D 8	14%	5%	13%	6%	10%	1%	32%	19%
IE-Szenario Erhalt Stadtgrün: keine Siedlungsfreiflächen	GT-D 1	14%	2%	7%	12%	46%	12%	7%	0%
	GT-D 2	17%	2%	9%	13%	41%	9%	9%	
	GT-D 3	23%	3%	13%	10%	33%	5%	13%	
	GT-D 4	23%	3%	13%	11%	29%	3%	18%	
	GT-D 5	23%	5%	15%	8%	21%	1%	27%	
	GT-D 6	22%	5%	16%	8%	16%	1%	32%	
	GT-D 7	18%	5%	16%	8%	14%	1%	38%	
	GT-D 8	17%	6%	16%	7%	12%	1%	41%	

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

GT-D: Gemeindetyp Städt. Dichte

Bei der Abschätzung für die Nutzung „Industrie und Gewerbe“ (Abbildung 38) wird anstelle der Geschossfläche die Baumasse betrachtet. Eine Besonderheit ist die Interpretation der Innenentwicklungsform „Zusätzliche Gebäude“ (Form 3). In Anlehnung an entsprechende Befunde im Siedlungsflächenmonitoring Nordrhein-Westfalen (Osterhage et al. 2022) wurde

dieser Innenentwicklungsform auch die Nutzung betriebsgebundener Flächen durch die Unternehmen zugewiesen. Dies beschreibt die Praxis, dass manche Unternehmen bei ihrer Ansiedlung mehr Grundstücksflächen ankaufen als sie zunächst benötigen und diese dann später für Erweiterungen belegen.

Abbildung 38: Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Baumasse: Industrie und Gewerbe

Szenario und Gemeindetyp Städtebaul. Dichte	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau		
	1) Schließung Baulücke *)	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude *)	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen	
IE-Szenario Alle Formen der Innenentwicklung	GT-D 1	26%	4%	9%	4%	17%	5%	11%	24%
	GT-D 2	25%	4%	9%	5%	17%	5%	12%	23%
	GT-D 3	25%	4%	9%	5%	16%	4%	16%	21%
	GT-D 4	24%	4%	8%	6%	15%	4%	19%	20%
	GT-D 5	23%	5%	9%	5%	12%	3%	24%	19%
	GT-D 6	20%	5%	9%	5%	10%	3%	30%	18%
	GT-D 7	19%	5%	8%	5%	9%	2%	36%	16%
	GT-D 8	17%	6%	8%	5%	9%	2%	43%	10%
IE-Szenario Erhalt Stadtgrün: keine Siedlungsfreiflächen	GT-D 1	34%	5%	13%	5%	23%	7%	13%	0%
	GT-D 2	32%	5%	13%	6%	22%	6%	16%	
	GT-D 3	31%	5%	12%	7%	21%	5%	19%	
	GT-D 4	29%	5%	11%	8%	20%	5%	22%	
	GT-D 5	28%	6%	11%	6%	16%	4%	29%	
	GT-D 6	24%	6%	11%	6%	12%	4%	37%	
	GT-D 7	21%	6%	10%	6%	12%	3%	42%	
	GT-D 8	20%	7%	9%	5%	9%	2%	48%	

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

GT-D: Gemeindetyp Städtebauliche Dichte

*) Beinhaltet auch die Nutzung „betriebsgebundener Flächen“, d. h. die Nutzung für eine spätere Erweiterung betriebsintern vorgehaltener Flächen.

Bei den vier vorstehenden Nutzungen geht es vor allem um zusätzliche Geschossfläche bzw. Baumasse. Annahmen sind aber auch für die drei Nutzungen (fast) ohne Gebäude zu treffen: Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen. Wie in Kapitel 3.2.2 bereits erläutert, entstehen diese Flächennutzungsänderungen im Innenbereich nur auf der Ebene größerer Entwicklungsflächen (Formen 7 und 8). Entsprechend können diese Flächennutzungen im Szenario „Erhalt Stadtgrün“ nur noch auf Brachflächen (Form 7) entstehen (Abbildung 39). In diesem Fall ist auch keine weitere Differenzierung zwischen den Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ notwendig.

Neue Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie neue „sonstige Siedlungsfreiflächen“ können zudem bereits im Szenario „Alle Innenentwicklungsformen“ nicht auf Siedlungsfreiflächen entstehen, denn diese sind ja bereits Sport-, Freizeit-, Erholungs- oder sonstige Siedlungsfreiflächen (Abbildung 40).

Abbildung 39: Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Bodenfläche: Plätze

Szenario und Gemeindetyp Städtebaul. Dichte	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau		
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen	
IE-Szenario Alle Formen der Innenentwicklung	GT-D 1							31%	69%
	GT-D 2							35%	65%
	GT-D 3							44%	56%
	GT-D 4	0%						48%	52%
	GT-D 5							69%	31%
	GT-D 6							73%	27%
	GT-D 7							80%	20%
	GT-D 8							90%	10%
IE-Szenario Erhalt Stadtgrün: keine Siedlungsfreiflächen	GT-D 1							100%	0%
	GT-D 2								
	GT-D 3								
	GT-D 4	0%							
	GT-D 5								
	GT-D 6								
	GT-D 7								
	GT-D 8								

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

GT-D: Gemeindetyp Städtebauliche Dichte

Abbildung 40: Geschätzter Anteil der Innenentwicklungsformen an der in der Innenentwicklung entstehenden Bodenfläche: Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen

Anteile an Bodenfläche der Innenentwicklung: Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen

Szenario und Gemeindetyp Städtebaul. Dichte	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“		
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau		
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen	
IE-Szenario Alle Formen der Innenentwicklung	GT-D 1							100%	0%
	GT-D 2								
	GT-D 3								
	GT-D 4	0%							
	GT-D 5								
	GT-D 6								
	GT-D 7								
	GT-D 8								
IE-Szenario Erhalt Stadtgrün: keine Siedlungsfreiflächen	GT-D 1							100%	0%
	GT-D 2								
	GT-D 3								
	GT-D 4	0%							
	GT-D 5								
	GT-D 6								
	GT-D 7								
	GT-D 8								

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

GT-D: Gemeindetyp Städtebauliche Dichte

Mit den in diesem Kapitel hergeleiteten Anteilswerten können die im vorstehenden Kapitel 3.2 gemeindespezifisch hergeleiteten Gesamtvolumen der Innenentwicklung der pro Hektar vermiedener Außenentwicklung auf die acht Innenentwicklungsformen aufgeteilt werden. Dies ist notwendig, um die im nachfolgenden Kapitel betrachtete Flächennutzungsänderung und die damit verbundenen, treibhausgasrelevanten Eingriffe in Boden und Vegetation untereinander

gewichten zu können. Zudem können dabei die beiden Innenentwicklungsszenarien „Alle Innenentwicklungsformen“ und „Erhalt Stadtgrün“ differenziert betrachtet werden.

3.4 Treibhausgasrelevante Eingriffe der Innenentwicklung in Boden und Vegetation

3.4.1 Flächennutzungsänderungen

In der Außenentwicklung (Kapitel 2) bestanden alle Flächennutzungsänderungen in einem Übergang von den Nutzungsarten „vor der Flächenneuanspruchnahme“ zu den Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“, d. h. von Freiraumflächen zu Siedlungs- und Verkehrsflächen (siehe Abbildung 1 sowie Tabelle 2 jeweils im Ergebnisband). Bei der Innenentwicklung besteht das Plangebiet bereits vor der jeweiligen Innenentwicklungsmaßnahme aus Siedlungs- und Verkehrsflächen. Entsprechend geht es bei den Flächennutzungsänderungen der Innenentwicklung ausschließlich um Anteilsverschiebungen innerhalb der fünf Nutzungsarten „nach der Flächenneuanspruchnahme“:

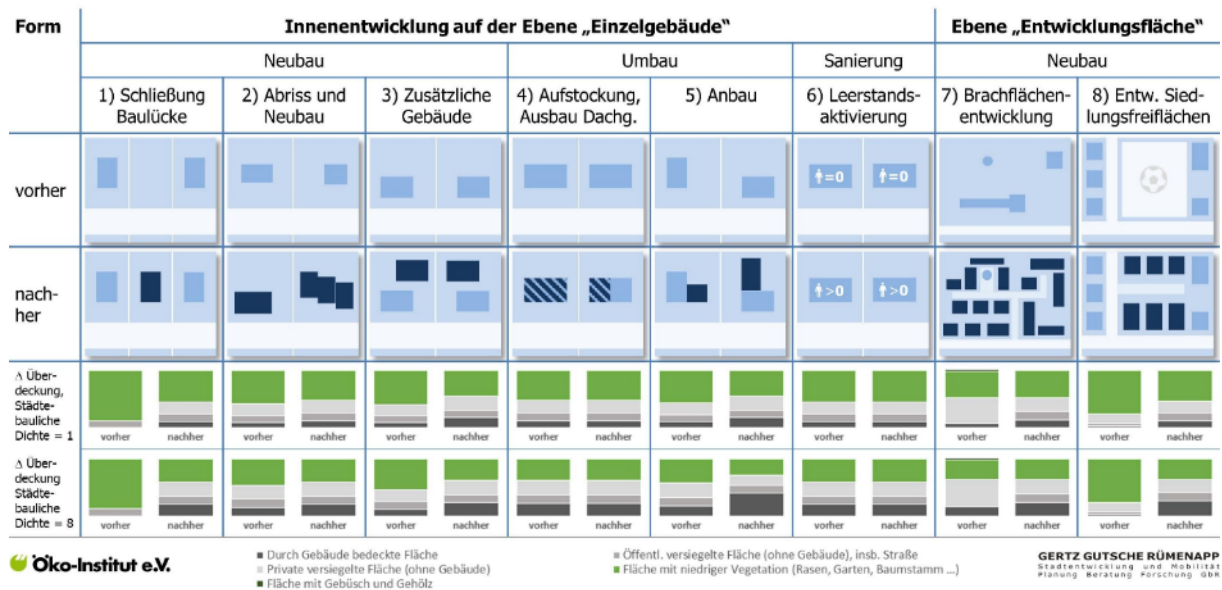
- ▶ Durch Gebäude bedeckte Fläche
- ▶ Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen
- ▶ Private versiegelte Fläche ohne Gebäude
- ▶ Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)
- ▶ Fläche mit Gehölz, Hecken, Gebüsch

Zur Abschätzung des Umfangs dieser Anteilsverschiebungen pro Hektar Innenentwicklungsfläche¹¹ wird für jede Innenentwicklungsform, jede Nutzung mit Gebäuden und jeden Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ geschätzt, zu welcher Veränderung der Flächenüberdeckung eine Realisierung der betreffenden Innenentwicklungsmaßnahme führen würde. Abbildung 41 zeigt dies beispielhaft für die Nutzung „Wohnen“. Der Umfang der jeweils abgebildeten Innenentwicklungsmaßnahmen entspricht den GFZ- bzw. BMZ-Veränderungen aus Kapitel 3.3.2.

¹¹ Zur Innenentwicklungsform-abhängigen Definition der Messgröße „Innenentwicklungsfläche“ siehe Kapitel 3.3.2.

**Abbildung 41: Veränderung der Flächenüberdeckungsanteile durch die Innenentwicklungsformen:
Wohnen**

Veränderung der Flächenüberdeckungsanteile: Wohnen



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Aus Platzgründen sind in Abbildung 41 jeweils durch die Veränderung der Flächenüberdeckungsanteile für die Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ 1 (sehr gering) und 8 (sehr hoch) dargestellt. Die Werte der anderen Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ 2 bis 7 liegen dazwischen.

Aus diesen Veränderungen der Flächenüberdeckungsanteile (Abbildung 41) werden die letztendlich gesuchten, weil treibhausgasrelevanten Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklungsfläche abgeleitet, die in den nachfolgenden fünf Abbildungen dargestellt sind.

Die Abbildungen sind jeweils wie folgt zu lesen: Alle drei Abbildungen haben im Titel zwei farbige Zeilen mit den Zeilentiteln „vorher“ und „nachher“. Diese zeigen an, welche Nutzungsarten aus der ersten Zeile in die Nutzungsarten der zweiten Zeile umgenutzt werden. Die Farbfelder der zweiten Zeile sind aus Platzgründen nur sehr abgekürzt beschriftet. Die Farben entsprechen jedoch jeweils den ausgeschriebenen beschrifteten Feldern in der ersten Zeile.

Die eigentlichen Nutzungsänderungen finden sich in den Tabellenfeldern darunter. Alle Wertangaben haben die Einheit Hektar Nutzungsänderung pro Hektar Innenentwicklungsfläche. Ein Lesebeispiel: Wird zusätzlicher Wohnraum (Abbildung 42) durch die Schließung von Baulücken (Innenentwicklungsform 1, erste beiden Zeilen nach der Zwischenüberschrift „Wohnen“ in Abbildung 42) in einer Gemeinde vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ 1 (Abbildung 42, zweite Spalte bzw. erste Zeile nach der Zwischenüberschrift „Wohnen“) realisiert, so werden pro Hektar Innenentwicklungsfläche¹² 0,12 ha Flächen mit niedriger Vegetation in von Gebäude überdeckter Fläche umgenutzt. Zudem werden 0,21 ha Flächen mit niedriger Vegetation in private Versiegelungsflächen umgenutzt. Zusätzliche öffentliche Versiegelungsflächen entstehen nicht, weil die Baulücke bereits vollständig erschlossen ist. Eine Besonderheit in Abbildung 42 (und den vier nachfolgenden Abbildungen) stellt die

¹² Zur Abgrenzung vgl. Abbildung 31.

Nutzungsänderung von Flächen mit niedriger Vegetation in Flächen mit niedriger Vegetation dar. Im Falle der eben betrachteten Baulückenschließung mit Wohnungsbau in Gemeinden der städtebaulichen Dichte 1 wird hier mit 0,54 ha sogar ein sehr großer Wert angegeben. Auch alle anderen Zeilen zeigen große Werte, obwohl eigentlich keine Flächennutzungsänderung im engeren Sinne stattfindet (vorher und hinterher: Fläche mit niedriger Vegetation). Diese „Nutzungsänderung“ wird gleichwohl quantifiziert und ausgewiesen, weil in der Abschätzung der Treibhausgaswirkungen der Flächennutzungsänderungen in Kapitel 4 konservativ unterstellt wird, dass diese Fälle mit Treibhausgaswirkungen verbunden sind, siehe Kapitel 4.4).

Die entsprechenden Werte für die anderen Nutzungen finden sich in Abbildung 42 (Wohnen), Abbildung 43 (Mischnutzung), Abbildung 44 (Besondere funktionale Prägung) und Abbildung 45 (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen). Bei letzterer werden nur Innenentwicklungsformen 7 und 8 dargestellt, weil diese Nutzungen nicht mit den anderen Innenentwicklungsformen realisiert werden.¹³

Eine Besonderheit in allen fünf Abbildungen bildet die Brachflächenentwicklung (Innenentwicklungsform 7). Durch den hohen Anteil versiegelter Flächen im „vorher“-Zustand (vgl. die auffallend große graue Einfärbung in Abbildung 41) startet der Großteil der Nutzungsänderungen mit einer versiegelten Fläche, die im Saldo nach der Entwicklung entweder „anders“ versiegelt oder – nur in wenigen Konstellationen – entsiegelt ist.

Abbildung 42: Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Wohnen

vorher nachher	Städte- bauliche Dichte	Gebäude überdeckt			öffentl. Vers.		sonst. private Versiegelung				niedrige Vegetation				Fläche mit Gebüsch und Gehölz				
		öf. Vs	pr. Vs	ni. Vg.	Geb.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	ni. Vg.	G. u G.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni Vg.	
Wohnen																			
1) Schließung Baulücke	1											0,12		0,21	0,54				
	8											0,21		0,24	0,39				
2) Abriss und Neubau	1											0,03		0,03	0,51				
	8											0,05		0,01	0,39				
3) Zusätzliche Gebäude	1											0,09		0,06	0,44				
	8											0,12		0,04	0,36				
4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	1														0,51				
	8														0,36				
5) Anbau	1											0,08		0,04	0,44				
	8											0,21			0,21				
6) Leerstands- aktivierung	1														0,54				
	8														0,39				
7) Brachflächen- entwicklung	1						0,06	0,14							0,46				0,01
	8						0,08	0,14							0,34		0,01		
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1											0,09	0,08	0,05	0,52			0,01	
	8											0,24	0,09	0,07	0,34				

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

¹³ Vgl. Kapitel 3.3.3.3.

Abbildung 43: Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Mischnutzung

vorher nachher	Städte- bauliche Dichte	Gebäude überdeckt			öffentl. Vers.		sonst. private Versiegelung				niedrige Vegetation				Fläche mit Gebüsch und Gehölz				
		öf. Vs	pr. Vs	ni. Vg.	Geb.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	ni. Vg.	G. u G.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni Vg.	
1) Schließung Baulücke	1												0,18		0,23	0,49			
	8												0,31		0,32	0,25			0,01
2) Abriss und Neubau	1												0,04		0,02	0,48			
	8												0,07		0,04	0,25			
3) Zusätzliche Gebäude	1												0,10		0,08	0,40			
	8												0,15		0,10	0,25			
4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	1															0,51			
	8															0,33			
5) Anbau	1												0,08		0,07	0,38			
	8												0,25			0,08			
6) Leerstands- aktivierung	1															0,51			
	8															0,25			
7) Brachflächen- entwicklung	1							0,12	0,05					0,02		0,43		0,02	
	8							0,16					0,01	0,08		0,25		0,02	
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1												0,16	0,04	0,07	0,47			0,02
	8												0,3	0,06	0,13	0,25			0,02

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 44: Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Besondere funktionale Prägung

vorher nachher	Städte- bauliche Dichte	Gebäude überdeckt			öffentl. Vers.		sonst. private Versiegelung				niedrige Vegetation				Fläche mit Gebüsch und Gehölz				
		öf. Vs	pr. Vs	ni. Vg.	Geb.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	ni. Vg.	G. u G.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni Vg.	
1) Schließung Baulücke	1												0,13		0,28	0,53			
	8												0,2		0,26	0,48			
2) Abriss und Neubau	1												0,03		0,04	0,53			
	8												0,03			0,45			
3) Zusätzliche Gebäude	1												0,11			0,44			
	8												0,08			0,42			
4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	1															0,52			
	8															0,48			
5) Anbau	1												0,07			0,46			
	8												0,18		0,05	0,25			
6) Leerstands- aktivierung	1															0,53			
	8															0,48			
7) Brachflächen- entwicklung	1							0,08	0,06	0,03					0,46				0,02
	8							0,06	0,05	0,09					0,34				0,02
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1												0,12	0,01	0,10	0,52			0,02
	8												0,18		0,08	0,48			0,02

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 45: Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Industrie und Gewerbe

vorher nachher	Städte- bauliche Dichte	Gebäude überdeckt			öffentl. Vers.		sonst. private Versiegelung				niedrige Vegetation				Fläche mit Gebüsch und Gehölz				
		öf. Vs	pr. Vs	ni. Vg.	Geb.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	ni. Vg.	G. u G.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni Vg.	
Industrie und Gewerbe																			
1) Schließung Baulücke	1													0,14		0,38	0,41		
	8													0,27		0,37	0,29		0,01
2) Abriss und Neubau	1													0,04			0,39		
	8													0,06		0,02	0,26		
3) Zusätzliche Gebäude	1													0,12			0,30		
	8													0,17			0,17		
4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	1																0,41		
	8																0,25		
5) Anbau	1													0,06			0,36		
	8													0,14		0,01	0,20		
6) Leerstands- aktivierung	1																0,41		
	8																0,29		
7) Brachflächen- entwicklung	1							0,07						0,03	0,04		0,39		0,02
	8							0,10						0,06	0,05		0,24		0,02
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1													0,13	0,02	0,18	0,41		0,02
	8													0,27	0,02	0,2	0,25		0,02

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Abbildung 46: Hektar Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung: Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen

vorher nachher	Städte- bauliche Dichte	Gebäude überdeckt			öffentl. Vers.		sonst. private Versiegelung				niedrige Vegetation				Fläche mit Gebüsch und Gehölz				
		öf. Vs	pr. Vs	ni. Vg.	Geb.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	ni. Vg.	G. u G.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni. Vg.	Geb.	öf. Vs.	pr. Vs.	ni Vg.	
Plätze																			
7) Brachflächen- entwicklung	1	0,07												0,19	0,01	0,26			0,02
	8	0,15						0,01						0,08		0,26		0,02	
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1	0,01												0,20	0,28	0,26			0,02
	8	0,01												0,20	0,28	0,26			0,02
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen																			
7) Brachflächen- entwicklung	1	0,04		0,01					0,29							0,46			0,02
	8	0,04		0,09					0,33							0,34			0,02
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1				0,01				0,02							0,74			0,01
	8				0,01				0,02							0,74			0,01
Sonstige Siedlungsfreiflächen																			
7) Brachflächen- entwicklung	1	0,07							0,23							0,46			0,02
	8	0,07		0,08					0,27							0,34			0,02
8) Entw. Sied- lungsfreiflächen	1	0,01												0,01	0,03	0,70			0,01
	8	0,01												0,01	0,03	0,70			0,01

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die letztendlich pro Hektar vermiedener Außenentwicklung im Innenbereich in einer konkreten Gemeinde auftretenden Flächennutzungsänderungen ergeben sich aus der Multiplikation

- ▶ der je nach Gemeindetypen „Nutzungen“ und „Städtebauliche Dichte“ pro Hektar vermiedener Außenentwicklung durch Innenentwicklung neu zu schaffenden Geschossfläche, Baumasse bzw. Bodenfläche (= Kennwerte aus Kapitel 3.2.3)
- ▶ der – vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ abhängigen – Anteile der Innenentwicklungsformen an dieser benötigten Innenentwicklung (= Kennwerte aus Kapitel 3.3.3.3)

- ▶ der – ebenfalls vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ abhängigen und in den vorstehenden Abbildungen ausgewiesenen – Nutzungsänderungen pro Hektar Innenentwicklung (= Kennwerte dieses Kapitels)

3.4.2 Verlust an Bestandsbäumen

Mit der Innenentwicklung kann ein Verlust an Bestandsbäumen einhergehen. Da diese Bäume mitunter eine gewisse Größe haben, ist dieser Effekt nicht unerheblich. Aus diesem Grund wird in der Modellierung der Innenentwicklung unterstellt, dass pro Hektar Innenentwicklungsfläche die in Tabelle 17 genannte Anzahl an Bestandsbäumen entfernt wird. Bei den Werten handelt es sich um gutachterliche Annahmen des Projektteams mit Blick auf reale Projekte. Eine fundierte empirische Grundlage zur Frage, wie viele Bestandsbäume im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen gefällt werden, konnte leider nicht gefunden werden.

Die Annahmen orientieren sich an der Beobachtung aus realen Projekten, dass die meisten Bäume auf Brachflächen gefällt werden – vor allem, wenn diese Brachflächen über mehrere Jahrzehnte brachlagen und sich dort in Teilbereichen zum Teil waldähnliche Strukturen bilden konnten.

Tabelle 17: Annahme zur Anzahl der pro Hektar Innenentwicklung gefällten Bestandsbäume

Form der Innenentwicklung	Szenario Innenentwicklung	
	Alle Formen der Innenentwicklung = kein verstärkter Baumschutz	Erhalt Stadtgrün = keine Bebauung von Siedlungsfreiflächen, Baumschutz auf anderen Flächen
1) Schließung Baulücke	1,5	0,5
2) Abriss und Neubau	1,5	0,5
3) Zusätzliche Gebäude	2,5	1,0
4) Aufstockung und Dachausbau	0,5	0
5) Anbau	1,5	1,0
6) Leerstandsaktivierung	0	0
7) Brachflächenentwicklung	10,0	5,0
8) Bebauung Siedlungsfreiflächen	6,0	keine Bebauung

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Analog zum Vorgehen bei den Flächennutzungsänderungen errechnen sich die pro Hektar vermiedener Außenentwicklung im Innenbereich einer konkreten Gemeinde gefällten Bestandsbäume aus der Multiplikation

- ▶ der je nach Gemeindetypen „Nutzungen“ und „Städtebauliche Dichte“ pro Hektar vermiedener Außenentwicklung durch Innenentwicklung neu zu schaffenden Geschossfläche, Baumasse bzw. Bodenfläche (= Kennwerte aus Kapitel 3.2.3)
- ▶ der – vom Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“ abhängigen – Anteile der Innenentwicklungsformen an dieser benötigten Innenentwicklung (= Kennwerte aus Kapitel 3.3.3.3)

- ▶ der in Tabelle 17 genannten Anzahl an gefälltten Bestandsbäumen pro Hektar
Innenentwicklung (= Kennwerte dieses Kapitels)

Die Treibhausgaswirkungen dieser Bestandsbaumfällungen ergeben sich aus einer Multiplikation dieser Anzahl an gefälltten Bestandsbäumen mit den in Kapitel 4.3 hergeleiteten Treibhausgaswirkungen pro gefällttem Bestandsbaum.

4 Treibhausgaswirkungen aus der Nutzungsänderung von einem Hektar einer Vorhernutzung in einen Hektar einer Nachhernutzung (LULUCF)

4.1 Systemgrenze und Effekte

Die Kernfrage, die im Rahmen des vorliegenden Projekts beantwortet werden soll, lautet:

- ▶ Welche Treibhausgaswirkungen entstehen durch die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bzw. welche Minderungspotenziale lassen sich durch eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme erschließen?

Im Fokus stehen also die Auswirkungen, die sich aus zukünftigen Entscheidungen ergeben. Anders als im Nationalen Treibhausgasinventar (UBA 2023a), das im Wesentlichen eine akkurate Bestandsaufnahme vornimmt, d. h. die Frage beantwortet „Was ist bzw. was gilt aktuell in Deutschland?“ stehen im vorliegenden Projekt zukunftsgerichtete Fragestellungen im Vordergrund.

Vor diesem Hintergrund werden die Treibhausgaswirkungen grundsätzlich durch den Vergleich der beiden Szenarien „Mit Flächenneuanspruchnahme“ versus „Ohne Flächenneuanspruchnahme“ ermittelt.

Die Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme ergibt sich bzgl. LULUCF aus Veränderungen in der Flächennutzung. Wird eine bestimmte Vorher-Nutzung in eine bestimmte Nachher-Nutzung überführt, ergeben sich Veränderungen im Kohlenstoffvorrat in Boden und Vegetation mit entsprechenden Treibhausgaswirkungen.¹⁴ Für jede Vorher-Nachher-Konstellation ergibt sich eine spezifische Treibhausgaswirkung:

$$THG_{Vorher \rightarrow Nachher}$$

In der Regel setzt sich Flächenneuanspruchnahme aus mehreren Nutzungsänderungen zusammen. Dabei ergibt sich die Gesamttreibhausgaswirkung aus der Summe der Treibhausgaswirkungen der einzelnen Nutzungsänderungen:

$$THG_{Gesamt} = \sum THG_{Vorher \rightarrow Nachher}$$

Es wird zwischen den Vorher- und Nachher-Nutzungsarten differenziert, die in Kapitel 2.2 im Ergebnisband erklärt und dort in Tabelle 2 aufgelistet sind.

Für die Außenentwicklung wird angesetzt, dass alle Vorher-Nutzungen zu gleichen Teilen in die entsprechenden Nachher-Nutzungen überführt werden. Bei der Innenentwicklung wird berücksichtigt, dass aufgrund der räumlichen Anordnungen der Vornutzungen einige Flächennutzungsänderungen wahrscheinlicher sind als andere¹⁵.

Die Treibhausgaswirkung einer Flächennutzungsänderung Vorher → Nachher setzt sich aus 6 Einzeleffekten zusammen, die im Folgenden beschrieben sind. Die Treibhausgaswirkung von je-

¹⁴ Für den Sonderfall, dass bei einer Innenentwicklungsmaßnahme Vorher- und Nachher-Nutzung übereinstimmend aus niedriger Vegetation bestehen, ergeben sich ebenfalls Treibhausgaswirkungen.

¹⁵ So ist es z. B. bei der Bebauung einer Baulücke wahrscheinlicher, dass die zentrale Fläche mit eher niedriger Vegetation zu Gebäuden und sonstiger privater Versiegelung umgewandelt wird als die oft am Rand befindlichen und ggf. durch kommunale Satzung geschützten Baum- und Gebüschbereiche.

dem der 6 Effekte lässt sich separat berechnen. Die Gesamtwirkung ergibt sich aus der Summe über die 6 Effekte.

$$THG_{Vorher \rightarrow Nachher} = \sum_{i=1}^6 \text{Effekt}_i$$

Die 6 Effekte unterscheiden sich in ihrer Wirkungsrichtung, darin, ob sie den Boden, die Vegetation oder Boden und Vegetation beeinflussen, hinsichtlich der Wirkungsdauer und hinsichtlich der relevanten Treibhausgase, siehe Tabelle 18. Effekte 1 bis 3 sind klimanachteilig, Effekte 4 bis 6 sind klimavorteilhaft. Die Wirkung von Effekten 1 und 2 tritt ausschließlich im Jahr der Nutzungsänderung ein, die Wirkung von Effekten 3 bis 6 ist kontinuierlich zu verbuchen.

Tabelle 18: Überblick über die sechs Einzeleffekte (LULUCF)

Nr	Effekt	Wirkungsrichtung	Wirkungsdauer	Bereich	Treibhausgase
1	Verlust der vorherigen Vegetation	Klimanachteilig	Einmalig im Jahr der Nutzungsänderung	Vegetation	CO ₂
2	Abschieben und Auskoffern des Bodens	Klimanachteilig	Einmalig im Jahr der Nutzungsänderung	Boden	CO ₂ , N ₂ O
3	Entgangene Einbindung im Wald	Klimanachteilig	Kontinuierlich	Vegetation und Boden	CO ₂
4	Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation	Klimavorteilhaft	Kontinuierlich	Vegetation	CO ₂
5	Naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen	Klimavorteilhaft	Kontinuierlich	Vegetation und Boden	CO ₂ , N ₂ O
6	Veränderung der kontinuierlichen Treibhausgasemissionen aus trockengelegten organischen Böden	Klimavorteilhaft	Kontinuierlich	Boden	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die sechs Effekte sind in Kapiteln 4.3 bis 4.8 einzeln detailliert beschrieben.

Die folgenden Aspekte bleiben standardmäßig in der Modellierung außen vor:

- Über Effekt 2 hinausgehende Veränderungen im Kohlenstoffvorrat des Bodens aufgrund von Nutzungsänderungen

Üblicherweise erfolgt eine Zuordnung des Kohlenstoffvorrats im Boden auf Basis von der Flächennutzung. Wird eine Flächennutzung in eine andere überführt, wird typischerweise und insbesondere im Nationalen Treibhausgasinventar (UBA 2023a) angesetzt, dass der Kohlenstoffvorrat über einen Zeitraum von 20 Jahren kontinuierlich ansteigt bzw. abnimmt, so dass nach 20 Jahren der Kohlenstoffvorrat im Boden das Niveau der Nachher-Nutzung aufweist. Eine Ausnahme diesbezüglich stellen Nutzungsänderungen in Siedlungs- und Verkehrsfläche dar: Hier unterstellt das Nationale Treibhausgasinventar in einem konservativen Ansatz, „dass unversiegelte, innerstädtische Böden Kohlenstoffvorräte aufweisen, die denen der Böden entsprechen, aus denen sie sich nach einer Landnutzungsänderung entwickeln.“ (UBA 2023a, S. 544). D. h. es wird kein entsprechender Effekt verbucht. Da die vorliegende Methodik ausschließlich Flächennutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche betrachtet, wird in Anlehnung an

das Vorgehen im Nationalen Treibhausgasinventar keine Angleichung des Kohlenstoffvorrats im Boden innerhalb einer 20-jährigen Übergangszeit vorgenommen. Im Nationalen Treibhausgasinventar wird auch darauf hingewiesen, dass einige Studien höhere Kohlenstoffvorräte auf unversiegelten Siedlungs- und Verkehrsflächen nachweisen im Vergleich zu den angrenzenden Freiraumflächen. Der Auftrag zusätzlichen humosen Bodens sowie die intensive Bewirtschaftung (Inputs, Bewässerung) werden als Begründungen angeführt. Dieser Umstand wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.4.3 im Ergebnisband betrachtet.

► Verringerte landwirtschaftliche Aktivität

Wird eine landwirtschaftlich genutzte Fläche in Siedlungs- und Verkehrsfläche umgenutzt, finden auf dieser Fläche keine landwirtschaftlichen Aktivitäten mehr statt, d. h. es werden u. a. kein Diesel mehr für den Betrieb der landwirtschaftlichen Maschinen und keine Düngemittel mehr eingesetzt mit entsprechenden Treibhausgaswirkungen (Emissionen aus der Bereitstellung, Lachgasemissionen bei der Ausbringung von Stickstoffdünger, usw.). Der Effekt wird standardmäßig nicht in die Systemgrenze einbezogen, da die Flächenneuinanspruchnahme keinen kausalen Effekt auf die Gesamtnachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen hat. Entsprechend wird unterstellt, dass das dem Markt fehlende landwirtschaftliche Erzeugnis anstatt auf der zu SuV-Fläche umgenutzten Fläche auf einer anderen Fläche erzeugt wird, mitunter weltweit. Dann entstehen dort die mit der Bewirtschaftung verbundenen Treibhausgaswirkungen. Im Saldo ergibt sich also keine Treibhausgaswirkung, sondern lediglich eine räumliche Verschiebung,

► Indirekte Landnutzungsänderungen / Verdrängungseffekte

Analog zur logischen Kette bzgl. des Aspekts „verringerte landwirtschaftliche Aktivität“ ist es möglich, dass die verlorene landwirtschaftliche Fläche (durch Nutzungsänderung in SuV-Fläche) auf anderen Flächen verdrängt wird, insbesondere auf Freiraumflächen. Hier gibt es große thematische und logische Übereinstimmungen zur sogenannten „iLUC“-Debatte, die im Zuge des Anstiegs von Anbaubiomasse (insbesondere Mais und Raps) zur Gewinnung von Biokraftstoffen (insbesondere Methangas und Biodiesel) intensiv geführt wurde. Der Effekt wird standardmäßig nicht in die Systemgrenze einbezogen, da die Bandbreite möglicher Szenarien sehr groß ist, sodass sich entsprechend hohe Unsicherheiten ergeben. Beispielsweise kann ein verlorener Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland durch zwei Hektar gerodeten Regenwald in Südamerika kompensiert werden oder durch eine Professionalisierung der landwirtschaftlichen Produktion in Malaysia mit entsprechenden Ertragszuwächsen ohne Anstieg der Produktionsfläche. Das Thema wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.4.2 im Ergebnisband betrachtet.

► Veränderte Oberflächenalbedo

Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche führen zu einer veränderten Lichtreflexion. Der Effekt wird standardmäßig nicht in die Systemgrenze einbezogen, da er schwer quantifizierbar ist und mit Unsicherheiten behaftet ist.

4.2 Angesetzte Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungen

Tabelle 19 fasst die angesetzten Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungsraten für Flächenelemente auf mineralischem Boden und für Einzelbäume auf SuV-Flächen zusammen. Die in Tabelle 19 dargestellten Werte bilden die Grundlage für die Berechnung der LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkung der Flächenneuinanspruchnahme mithilfe der Effekte 1 bis 6.

Tabelle 19: Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungsraten für Flächenelemente auf mineralischem Boden und für Einzelbäume auf SuV-Flächen

Flächenelement	Boden: C-Vorrat, obere 30 cm [t C/ha] ¹⁶	Boden: C-Vorratsänderung [t C/ha/a]	Vegetation: C-Vorrat [t C/ha]	Vegetation: C-Vorratsänderung [t C/ha/a]
Ackerland	62	0	6,6	0
Grünland	88	0	6,8	0
Streuobst	88	0	13	0
Gartenland	62	0	6,6	0
Obstbau	72	0	13	0
Weinbau	49	0	6,8	0
Sonstige Landwirtschaftsfläche	62	0	6,6	0
Laub-/Nadel-/Mischholz	68	0,23	41	1,12
Gehölz	63	0	56	0
Heide	88	0	6,8	0
Unland	15	0	0	0
SuV: Gebäude und sonstige versiegelte Fläche	43	0	0	0
SuV: Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)	43	0	3,4 ¹⁷	0
SuV: Fläche mit Gebüsch und Gehölz	43	0	26 ¹⁸	0
Einzelbäume	Boden: C-Vorrat, obere 30 cm [t C/ha]	Boden: C-Vorratsänderung [t C/ha/a]	Vegetation: C-Vorrat [t C/Baum]	Vegetation: C-Vorratsänderung [t C/Baum/a]
SuV: Einzelbaum, Bestand	0	0	0,540	0
SuV: Einzelbaum, Jungbaum gepflanzt nach Flächenneuanspruchnahme	0	0	0,003	*

¹⁶ C-Vorrat obere 100 cm = C-Vorrat obere 30 cm · 1,54 (Flessa et al. 2019)

¹⁷ nach einer Aufwuchszeit von 5 Jahren

¹⁸ nach einer Aufwuchszeit von 12 Jahren

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

*: gemäß Aufwuchsformel in Abhängigkeit von der Kronenschirmfläche und der Höhe, siehe Kapitel 4.6.

Die Kohlenstoffvorräte in den oberen 30 cm des Bodens sind dem Nationalen Treibhausgasinventar entnommen (UBA 2023a, Submission 2023 für das Bezugsjahr 2021). Für die Bestimmung des Werts für Siedlungs- und Verkehrsflächen sind die Bundesland-spezifischen Angaben in Tabelle 330 (UBA 2023a) anhand der Bundeslandanteile an der gesamtdeutschen Siedlungs- und Verkehrsfläche gewichtet. Für Wald und Gehölze sind in der Submission 2023 keine Durchschnittswerte angegeben. Sie sind stattdessen auf Basis der Submission 2022 (UBA 2022) festgelegt. Mit der Submission 2023 wurden im Nationalen Treibhausgasinventar regionalisierte Kohlenstoffvorräte im Boden eingeführt, d. h. die Vorräte liegen differenziert nach Nutzung und konkretem Standort vor. Die regionalisierten Kohlenstoffvorräte sind nicht mehr in das vorliegende Projekt integriert worden, da die methodische Entwicklung bereits zu weit fortgeschritten war, um eine Integration noch zu realisieren.

Die Kohlenstoffvorräte in der Vegetation von Freiraumflächen sind ebenfalls dem Nationalen Treibhausgasinventar entnommen (UBA 2023a, Submission 2023 für das Bezugsjahr 2021). Darin ist für Gehölze angesetzt, dass sie alle 12 Jahre auf den Stock zurückgesetzt werden. Entsprechend ist dem Nationalen Treibhausgasinventar der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat zum Zeitpunkt 6 Jahre nach der jüngsten Rücksetzung entnommen. Er setzt sich aus 24 t C unterirdischer und 32 t C oberirdischer Biomasse pro ha zusammen. Für Obst- und Weinbau sind in der Submission 2023 keine Durchschnittswerte angegeben. Sie sind stattdessen auf Basis der Submission 2022 (UBA 2022) festgelegt.

Die Kohlenstoffvorräte in der Vegetation von Siedlungs- und Verkehrsflächen sind wie folgt festgelegt: Für versiegelte Flächen wird ein Kohlenstoffvorrat von null angesetzt. Dabei sind Ausnahmefälle wie z. B. Gründächer, Pflanzen in Kübeln oder Tiefgaragen, die unterhalb von Vegetationsflächen liegen, konservativ außer Acht gelassen. Für Flächen mit niedriger Vegetation (Rasen etc.) wird pauschal der Kohlenstoffvorrat von Grünland halbiert und eine pauschale Aufwuchszeit von 5 Jahren wird abgeschätzt. Für Flächen mit Gebüsch und Gehölz ist der Wert im Nationalen Treibhausgasinventar ungeeignet, da im Siedlungsbereich deutlich kleinere Hecken wachsen. Stattdessen ist der Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse von 27 t C pro ha aus Drexler et al. (2021) für Hecken mit einer Höhe von 4 m (Figure 2) per Multiplikation mit 0,75 auf Hecken mit einer Höhe von 3 m übertragen, da für das vorliegende Projekt Vegetation ab 3 m Höhe als Bäume definiert sind. Darauf ist das im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzte Verhältnis aus ober- zu unterirdischer Biomasse angewendet, um auf die unterirdische Biomasse zu schließen. Die im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzte Aufwuchszeit von 12 Jahren ist übernommen.

4.3 Effekt 1: Verlust der vorherigen Vegetation

Außenentwicklung

Es wird angesetzt, dass Außenentwicklungsmaßnahmen stets zur vollständigen Entfernung der ober- und unterirdischen Biomasse führen. Mit Ausnahme von Waldflächen wird der in der entfernten Biomasse gespeicherte Kohlenstoff im Jahr der Nutzungsänderung vollständig als CO₂ emittiert, d. h. es wird insbesondere eine zeitnahe Verbrennung oder Verrottung angesetzt.

Für Waldflächen wird angesetzt, dass sich der Kohlenstoffvorrat der ober- und unterirdischen Biomasse aus der lebenden Biomasse (Stamm, Äste, Wurzeln, usw.), dem Totholz (ca. 2 t C pro ha) und der Streu (ca. 19 t C pro ha) zusammensetzt. Es wird angesetzt, dass der Kohlenstoffvorrat in Totholz und Streu im Jahr der Nutzungsänderung vollständig als CO₂ emittiert wird. Im Gegensatz zur entfernten Vegetation anderer Flächenkategorien wird

angesetzt, dass ein Teil der lebenden Biomasse aus der Rodung von Waldflächen stofflich genutzt wird, beispielsweise in der Papier-, der Möbel- oder Bauholzindustrie. Eine Emission des Kohlenstoffs als CO₂ findet frühestens nach dem ersten Nutzungszyklus der Produkte statt. Darüber hinaus trägt das geerntete Waldholz zur Befriedigung der Nachfrage auf dem Holzmarkt bei und substituiert Holzernten in entsprechendem Umfang an anderer Stelle. Stoffliche Nutzung und Substitution anderer Ernten werden pauschal mit einem kombinierten Abschlagsfaktor von 0,5 auf den Kohlenstoffvorrat der lebenden Biomasse auf Waldflächen berücksichtigt. Die Emissionen werden entsprechend dem Abschlagsfaktor verringert, aber trotz stofflicher Nutzung analog zu allen anderen Nutzungsänderungen im Jahr der Nutzungsänderung verbucht und nicht zeitlich verzögert. Für das Jahr 2020 wird für den Kohlenstoffvorrat in der lebenden Biomasse der Wert von 40,88 t C/ha angesetzt, der im Nationalen Treibhausgasinventar für solche Waldflächen berichtet wird, die in andere Nutzungen umgenutzt werden (UBA 2023a, „Entwaldungsflächen“). Dieser Wert ist deutlich niedriger als der Kohlenstoffvorrat in der lebenden Biomasse von durchschnittlichen Waldflächen. Der Kohlenstoffvorrat, der bei der Nutzungsänderung von Waldflächen vollständig als Emission verbucht wird, wird dementsprechend mit 41 t C pro ha angesetzt ($40,88 * 0,5 + 19 + 2$). Der Kohlenstoffvorrat der lebenden Biomasse steigt im Lauf der Jahre an (siehe Effekt 7).

Innenentwicklung

Auch im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen ist Effekt 1 relevant. Die Modellierung differenziert zwischen den folgenden vier Typen von Vegetation auf Siedlungs- und Verkehrsflächen:

3. Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, usw.)
4. Gebüsch / Gehölz / Hecken
5. Jungbäume, die nach einer Außenentwicklungsmaßnahme gepflanzt werden, oder
6. Bestandsbäume, die im Zuge einer Innenentwicklungsmaßnahme gefällt werden.

Niedrige Vegetation und Gebüsch / Gehölz / Hecken werden als Flächenelemente, Bäume (sowohl Jungbäume als auch Bestandsbäume) hingegen als Punktelemente „ohne“ Fläche behandelt. Die Baumkrone liegt „über“ den Flächenelementen. Die Baumkronen können sowohl auf versiegelten als auch auf unversiegelten Flächen liegen.

Finden Innenentwicklungsmaßnahme auf Flächen mit niedriger Vegetation oder Gebüsch / Gehölz / Hecken statt, wird der in der Vegetation gebundene Kohlenstoff analog zu Außenentwicklungsmaßnahmen im Jahr der Nutzungsänderung vollständig als CO₂-Emission verbucht. Es wird angesetzt, dass die Vegetation auf der Siedlungs- und Verkehrsfläche vor der Nutzungsänderung voll ausgewachsen ist, d. h. dass sie einen Kohlenstoffvorrat von 3,4 (niedrige Vegetation) bzw. 26 t C (Gebüsch / Gehölz / Hecken) pro ha aufweist (siehe Tabelle 19).

Bei Bestandsbäumen wird angesetzt, dass ein Teil der Bestandsbäume erhalten bleibt und ein Teil entfernt wird (siehe Kapitel 3.4.2). Es wird angesetzt, dass Bestandsbäume zu jedem Zeitpunkt eine oberirdische Trockenbiomasse von 900 kg aufweisen. Dieser Durchschnittswert wurde wie folgt bestimmt:

1. Luftbildgestützte Auswertung von Vegetationsobjekten im Siedlungs- und Verkehrsbereich durch Firma mundialis (Unterauftrag im Rahmen des vorliegenden Projekts). Attribute je Vegetationsobjekt u. a. Höhe und Kronenschirmfläche.
2. Festlegung: ab 3 m Höhe gelten Vegetationsobjekte als „Baum“.
3. Anwendung der Formel aus Kändler et al. (2011, S. 41) zur Bestimmung der oberirdischen Trockenbiomasse eines Baums anhand von Höhe und Kronenschirmfläche.

4. Bildung des arithmetischen Mittels über Gesamtanzahl aller Bäume: 900 kg.
5. Plausibilisierung: Kändler et al. (2011) (S. 43) ermitteln eine durchschnittliche oberirdische Trockenbiomasse pro Baum von 835 kg.

Unter den Annahmen, dass die unterirdische Trockenbiomasse etwa 17 % an der gesamten Trockenbiomasse ausmacht¹⁹ und dass der Kohlenstoffgehalt an der Trockenbiomasse 50 % beträgt, wird ein Kohlenstoffvorrat von 540 kg C pro Bestandsbaum angesetzt. Ein gefälltter Bestandsbaum wird folglich mit einer Treibhausgaswirkung von knapp 2 t CO₂-Äq. verbucht.

4.4 Effekt 2: Abschieben und Auskoffern des Bodens

Es wird angesetzt, dass sowohl bei Außen- als auch bei Innenentwicklungsmaßnahmen zunächst der Oberboden (ca. obere 30 cm) auf der gesamten Fläche abgeschoben wird, d. h. auch auf den Flächenanteilen, die im Nachher-Zustand unversiegelt sind, beispielsweise mit Rasen bewachsen sind.²⁰ Zusätzlich wird angesetzt, dass der Boden unterhalb von Gebäuden und sonstigen versiegelten Flächen im Zuge der Bautätigkeit tiefgründig ausgekoffert (mindestens 1 m tief) wird.

Das Abschieben und Auskoffern ist mit Treibhausgasemissionen verbunden, da „der Boden auf den betreffenden Flächen gestört (ausgebaggert, transportiert, wieder ausgebracht; u.U. mehrere Monate sachgerecht auf Halde gelagert), wodurch die Struktur gestört und der Boden verstärkt belüftet wird; zumindest kurzfristig. Dadurch wird i.d.R. eine verstärkte Umsetzung organischer Bodensubstanzen durch Mikroorganismen initialisiert.“ (UBA 2023a, S. 542) Während im Nationalen Treibhausgasinventar ein konstanter Verlustfaktor von ca. 11 % auf die gesamte umgenutzte Fläche angewendet wird, wird im vorliegenden Projekt ein differenzierter Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Nachher-Nutzung angewendet, da die Arbeiten im Rahmen dieses Projekts Aussagen zu den wahrscheinlichen durchschnittlichen Nachher-Nutzungen aller Gemeinden Deutschlands ermöglichen. Es werden folgende Verlustfaktoren angesetzt:

- ▶ 5,5 % des Kohlenstoffvorrats in den oberen 30 cm des Bodens bei Flächen, die im Nachher-Zustand nicht versiegelt sind²¹
- ▶ 11 % des Kohlenstoffvorrats in den oberen 30 cm des Bodens bei Flächen, die im Nachher-Zustand versiegelt sind²²
- ▶ 5,5 % des Kohlenstoffvorrats im Unterboden (30-100 cm Tiefe) bei Flächen, die im Nachher-Zustand versiegelt sind²³

Mit diesem Ansatz wird konservativ berücksichtigt, dass es auch Außenentwicklungsvorhaben gibt, die den Oberboden auf solchen Flächen nicht abschieben, die im Nachher-Zustand unversiegelt bleiben. Der im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzte Verlustfaktor von 11 % ist aus Mangel an spezifischen Untersuchungen pauschal halbiert.

Andererseits werden über die im Nationalen Treibhausgasinventar berücksichtigen Aspekte hinausgehende Emissionen aus dem Unterboden verbucht. Die Berichterstattung im Nationalen

¹⁹ sodass sich von der unterirdischen Trockenbiomasse per Multiplikation mit 1,2 auf die ober- und unterirdische Trockenbiomasse schließen lässt.

²⁰ Ausnahme: Fläche ist im Vorher- und im Nachher-Zustand versiegelt.

²¹ Ausnahme: Fläche war im Vorher-Zustand bereits versiegelt.

²² Ausnahme: Fläche war im Vorher-Zustand bereits versiegelt.

²³ Ausnahme: Fläche war im Vorher-Zustand bereits versiegelt.

Treibhausgasinventar ist grundsätzlich auf die oberen 30 cm beschränkt. Die vorliegende Methodik hingegen ist unabhängig von dieser global gesetzten Randbedingung der international harmonisierten Berichterstattung und zielt stattdessen auf eine möglichst vollständige und richtungssichere Quantifizierung der Treibhausgaswirkungen. Entsprechend sind auch Verluste aus dem Unterboden berücksichtigt. Da der Unterboden im Vergleich zum Oberboden abbausicherer ist, wird der halbierte Verlustfaktor von 5,5 % angewendet. Er kommt lediglich dort zum Tragen, wo ausgekoffert wird.²⁴

Ein Sonderfall ergibt sich, wenn Flächen im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen im „vorher“- und im „nachher“-Zustand mit niedriger Vegetation bestanden sind. Konservativ wird davon ausgegangen, dass solche „Nutzungsänderungen“ mit den THG-Emissionen verbunden sind, die sich für den Fall ergeben, dass die Fläche zunächst abgeschoben wird und anschließend wieder mit niedriger Vegetation bepflanzt wird.

Effekt 2 kommt lediglich hinsichtlich Nutzungsänderungen von mineralischen Böden zum Tragen. Bei Nutzungsänderungen von organischen Böden wird Effekt 2 nicht verbucht, da der Boden bereits belüftet ist, bereits kontinuierliche Kohlenstoffverluste verzeichnet und nicht davon ausgegangen wird, dass eine Verbringung zu einer Erhöhung der Kohlenstoffverluste führt, siehe auch Kapitel 4.8 (Effekt 6).

Neben den Kohlenstoffverlusten durch Abschieben und Auskoffern, die zur Freisetzung von CO₂ führen, ergibt sich die folgende weitere Treibhausgaswirkung durch das Abschieben und Auskoffern: Das Verhältnis aus Kohlenstoff zu Stickstoff (C:N-Verhältnis) bleibt weitgehend konstant. Der Kohlenstoffverlust führt daher auch zu einem Stickstoffverlust. Zu einem Teil wird der Stickstoff als N₂O in die Atmosphäre freigesetzt. Es wird für alle Flächennutzungen auf mineralischem Boden ein C:N-Verhältnis von 11 angesetzt (UBA 2023a, Tabellen 327 und 329). Es wird ein Verlustfaktor von 1,225 % N₂O-N angesetzt. Es wird gemäß IPCC AR 5 (Myhre et al. 2013) ein GWP von 265 für N₂O angesetzt, d. h. 1 kg N₂O wird in 265 kg CO₂-Äquivalente umgerechnet. Auch diese Treibhausgaswirkung aus der Freisetzung von N₂O wird vollständig in dem Jahr verbucht, in dem die Nutzungsänderung stattfindet (siehe Tabelle 18).

4.5 Effekt 3: Entgangene Einbindung im Wald

Photosynthese, Aufwuchs der Vegetation, Mortalitätsrate, Akkumulation von organischem Material im Boden, Ernte bzw. Entnahme usw. bilden die kontinuierliche Dynamik, die zum Anstieg oder zum Abbau von Kohlenstoffvorräten in Boden und Vegetation führen. In einem konservativen Ansatz weist das Nationale Treibhausgasinventar sowohl hinsichtlich des Bodens als auch hinsichtlich der Vegetation ausschließlich Waldflächen die Eigenschaft zu, kontinuierlich und zeitlich unbegrenzt Kohlenstoff einzubinden²⁵. Diesem Ansatz folgen die vorliegenden Arbeiten. Entsprechend steht in den Spalten „Boden: C-Vorratsänderung [t C/ha/a]“ sowie „Vegetation: C-Vorratsänderung [t C/ha/a]“ in Tabelle 19 stets „0“, außer bei Waldflächen.

Werden Waldflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgenutzt, wird auf diesen Flächen kein Kohlenstoff mehr eingebunden. Anders als im Nationalen Treibhausgasinventar wird die entgangene Einbindung in der vorliegenden Methodik vollständig als Treibhausgaswirkung der

²⁴ Es wird angesetzt, dass sowohl bei Gebäuden als auch bei öffentlicher und privater Versiegelung ausgekoffert wird. In der Realität werden teilweise Gebäude ohne Keller errichtet und auch bei anderen Maßnahmen wird teilweise nur geringfügig ausgekoffert. Andererseits wird bei Gebäuden in der Regel auf einer größeren Fläche als der reinen Grundfläche ausgekoffert.

²⁵ Kommende Submissionen werden voraussichtlich von diesem jahrelang gültigen methodischen Ansatz abweichen und auch anderen Flächenkategorien, u. a. Grünland und Ackerland kontinuierliche Einbindungen zuweisen.

Flächenneuanspruchnahme verbucht (siehe die methodische Randbedingung zu Beginn von Kapitel 4.1).

Hinsichtlich der Einbindung im Boden wird ein Wert von 0,23 t C/ha/a angesetzt. Mit der Submission des Nationalen Treibhausgasinventars im Jahr 2023 (UBA 2023a, Bezugsjahr 2021) wurde ein neues Modell bezüglich des Kohlenstoffvorrats im Waldboden eingeführt. Das Modell trifft auch Aussagen zu den voraussichtlichen Einbindungsraten in den kommenden Jahrzehnten. Als Durchschnitt für den Zeitraum zwischen 1985 und 2050 werden 0,23 t C/ha/a genannt. Vor dem Hintergrund der zukunftsgerichteten Fragestellung, die der vorliegenden Untersuchung zugrunde liegt, wurde dieser perspektivische Durchschnittswert für angemessen erachtet und im Standardfall für Waldboden angesetzt. Die höhere Einbindungsrate von 0,41 t C/ha/a, die jahrelang im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzt wurde, wird einem konservativen Ansatz folgend nicht verwendet.

Hinsichtlich der Einbindung in der Vegetation wird ein Wert von 1,12 t C/ha/a angesetzt. Er ist aus dem arithmetischen Mittel der jüngsten 10 Submissionen des Nationalen Treibhausgasinventars für verbleibende Waldflächen ermittelt (Vgl. Tabelle 354 in UBA 2023a). Für „Entwaldungsflächen“ ist kein entsprechender Wert berichtet. Es wird angesetzt, dass sich Entwaldungsflächen und durchschnittliche Waldflächen nicht darin unterscheiden, wie stark bzw. schnell sie Kohlenstoff einbinden.

4.6 Effekt 4: Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation

Nach einer Außenentwicklungsmaßnahme weist die Vegetation auf der Siedlungs- und Verkehrsfläche zunächst keinen Kohlenstoffvorrat auf, mit Ausnahme von den neu gepflanzten Jungbäumen, bei denen ein Alter von 10 Jahren und ein Kohlenstoffvorrat von 3,5 kg C pro Jungbaum angesetzt wird.

Es wird angesetzt, dass niedrige Vegetation (Rasen, etc.) sowie Gebüsch / Gehölz / Hecken linear zu dem in Tabelle 19 dargestellten Kohlenstoffvorrat von 3,4 (niedrige Vegetation) bzw. 26 t C (Gebüsch / Gehölz / Hecken) pro ha aufwachsen. Niedrige Vegetation wächst über einen Zeitraum von 5 Jahren auf, Gebüsch / Gehölz / Hecken über einen Zeitraum von 12 Jahren (siehe Kapitel 4.2). Anschließend bleibt der Kohlenstoffvorrat dieser Vegetationstypen konstant.

Jungbäume speichern kontinuierlich und im Betrachtungszeitraum zeitlich unbegrenzt Kohlenstoff in der lebenden Biomasse. In Anlehnung an Rötzer et al. (2019) wird die folgende Aufwuchsformel angesetzt:

$$\text{Trockenbiomasse im Baumlebensjahr } x \text{ [kg pro Baum]} = 0,5 \times (0,0019 x^3 + 0,1094 x^2 + 0,1075 x)$$

Für Bestandsbäume wird angesetzt, dass sie einen konstanten Kohlenstoffvorrat aufweisen, da Mortalität und Zuwachs im Gleichgewicht sind.

4.7 Effekt 5: Naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen

Gemäß Bundesnaturschutzgesetz sind unvermeidbare Eingriffe, u. a. Flächenneuanspruchnahmen, auszugleichen. Die Ausgleichsmaßnahmen sind kausal direkt mit der Flächenneuanspruchnahme verknüpft und werden daher in der Berechnung der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme konsequent berücksichtigt. Im Nationalen Treibhausgasinventar werden naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen nicht als Bestandteil der Nutzungsänderung von Freiraumflächen in Siedlungsflächen verbucht.

Die Ermittlung der Höhe der Treibhausgaswirkung erfolgt in 3 Schritten:

Schritt 1: Berechnung des Ausgleichsbedarfs

Allen Vorher- und Nachher-Nutzungsarten sowie Einzelbäumen wird jeweils ein Wertpunkt pro ha bzw. pro Einzelbaum zugewiesen (siehe Tabelle 20). Als Grundlage wird die Hessische Kompensationsverordnung genutzt. In Anlehnung an die dort zugrundeliegende Vorgehensweise wird die Differenz der Wertpunkte im Vorher- und im Nachherzustand zur Festlegung des Ausgleichsbedarfs genutzt.

Tabelle 20: Wertpunkte zur Bestimmung des Ausgleichsbedarfs

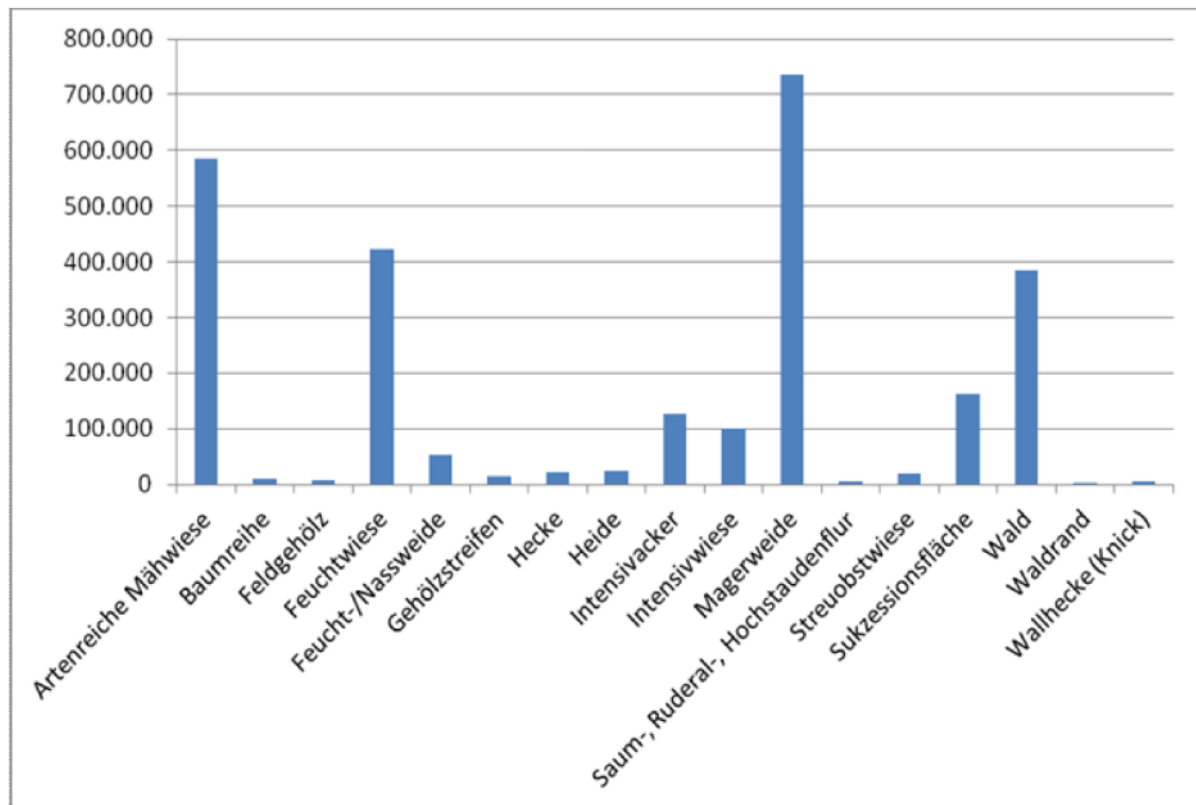
Element	Wertpunkte (WP)
Flächenelemente Freiraumfläche	[WP / m²]
Ackerland	16
Grünland	21
Streuobst	31
Gartenland	16
Obstbau	21
Weinbau	29
Sonstige Landwirtschaftsfläche	16
Laubholz	45
Nadelholz	26
Mischholz	36
Gehölz	39
Heide	59
Unland	19
Flächenelemente Siedlungs- und Verkehrsfläche	[WP / m²]
Versiegelte Fläche	3
Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, usw.)	10
Fläche mit Gebüsch/Gehölz/Hecken	14
Einzelbäume	[WP / Baum]
Neu gepflanzte Jungbäume	102
Gefällte Bestandsbäume	1.987

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung auf Basis der Hessischen Kompensationsverordnung

Schritt 2: Festlegung einer durchschnittlichen Ausgleichsmaßnahme

In einer Studie von uventus/Thünen-Institut (Oles et al. 2015) wurde systematisch untersucht, welche Ausgleichsmaßnahmen ergriffen werden und auf welchen Zielbiotopen sie durchgeführt werden. Insgesamt wurden knapp 100 Flächen mit einer Gesamtgröße von knapp 30 ha untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 47 dargestellt.

Abbildung 47: Zusammensetzung der angesetzten durchschnittlichen Ausgleichsmaßnahme nach Zielbiotopen



Quelle: Oles et al. 2015

Schritt 3: Bestimmung der Treibhausgaswirkung der notwendigen Ausgleichsmaßnahmen für beliebige Vorher-Nachher-Konstellationen

Mithilfe von Effekten 1 bis 4 sowie 6 wird bestimmt, welche Treibhausgaswirkung die durchschnittliche, durch Abbildung 47 charakterisierte Ausgleichsmaßnahme aufweist. Die Treibhausgaswirkung der durchschnittlichen Ausgleichsmaßnahme wirkt kontinuierlich und im Betrachtungszeitraum unbegrenzt verbucht, da auch Neupflanzungen von Wald enthalten sind. Über einen Wirkungszeitraum von 25 Jahren ergibt sich eine Treibhausgaseinsparung von etwa 17 t CO₂-Äquivalenten pro Hektar der Ausgleichsmaßnahme. Wie viele Hektare Ausgleichsmaßnahme notwendig sind, hängt davon ab, welche Nutzungsänderungen verursacht wurden (siehe die Tabelle 20 angesetzten Wertpunkte). Pro Hektar Nutzungsänderung werden Ausgleichsmaßnahmen im Umfang von 0,1 ha (Ackerland → Gebüsch / Gehölz / Hecken auf Siedlungs- und Verkehrsflächen) bis 2,4 ha (Laubwald → versiegelte Flächen) angesetzt.

4.8 Effekt 6: Veränderung der kontinuierlichen Treibhausgasemissionen aus trockengelegten organischen Böden

Es gibt mineralische und organische Böden in Deutschland. Organische Böden sind Moorböden, Moorfolgeböden oder Anmoore, die über lange Zeiträume große Mengen an Kohlenstoff gebunden haben. Organische Böden weisen wesentlich höhere Kohlenstoffvorräte im Boden auf als mineralische Böden (Flessa et al. 2019). Organische Böden bedecken ungefähr 5 % der Landesfläche von Deutschland (Wittnebel et al. 2023).

In Deutschland sind weite Teile der organischen Böden durch den Menschen, z. B. zum Torfabbau und anschließender landwirtschaftlicher Nutzung, trockengelegt worden. Sobald

organische Böden trockengelegt werden, gelangt Sauerstoff in den Boden und der kohlenstoffreiche Torf wird zersetzt. So gelangt der Bodenkohlenstoff in Form von CO₂ in die Atmosphäre. Dieser Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauernde kontinuierliche Prozess ist aktuell für ca. 7 % der jährlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich.

In Deutschland sind organische Böden mittlerweile weitgehend geschützt und kommen für Außenentwicklungsmaßnahmen nicht in Frage. Hinzu kommt, dass die allgemeine Sensibilisierung für das Thema deutlich angestiegen ist. In Ausnahmefällen und für einzelne Vorhaben sehen die Planungen noch die Trockenlegung von organischen Böden vor.

Für die Modellierung der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme im vorliegenden Projekt wird in einem konservativen Ansatz angesetzt, dass eine Trockenlegung von intakten organischen Böden aufgrund von Flächenneuanspruchnahmen oder Nutzungsänderungen in der Innenentwicklung ausgeschlossen ist.

Wo Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsflächen auf organischen Böden stattfinden, wird stattdessen angesetzt, dass die Böden bereits trockengelegt sind. Das heißt, dass auf diesen Flächen im Vorher-Zustand bereits große kontinuierliche Treibhausgasemissionen auftreten.

Kommt es zu einer Nutzungsänderung, verändern sich die kontinuierlichen Emissionsraten. Tabelle 21 fasst die angesetzten Änderungsraten zusammen.

Tabelle 21: Kontinuierliche Veränderungsraten an Bodenkohlenstoffvorrat, Methan bzw. Lachgas auf trockengelegten organischen Böden in Abhängigkeit von der Nutzung

Flächenelement	C-Vorratsänderung [t C/ha/a]	CH ₄ Emission [kg CH ₄ /ha/a]	N ₂ O Emission [kg N ₂ O/ha/a]
Ackerland	- 9,2	5,5	11,1
Grünland	- 8,3	11,2	4,6
Streuobst	- 9,2	5,5	11,1
Gartenland	- 9,2	5,5	11,1
Obstbau	- 9,2	5,5	11,1
Weinbau	- 9,2	5,5	11,1
Sonstige Landwirtschaftsfläche	- 9,2	5,5	11,1
Laub-/Nadel-/Mischholz	- 2,6	2,5	2,8
Gehölz	- 2,6	2,5	2,8
Heide	- 7,1	70,2	0,7
Unland	- 7,1	70,2	0,7
Siedlungs- und Verkehrsfläche: versiegelt	0	0	0
Siedlungs- und Verkehrsfläche: unversiegelt	- 8,3	11,2	4,6

Quelle: Tiemeyer et al. 2020, Table 2. Für Wald ist der Defaultwert angesetzt, da für Wald nur eine vergleichsweise kleine Stichprobe zustande kam.

Die Treibhausgaswirkung ergibt sich aus der Differenz der Emissionsraten im Vorher- bzw. im Nachher-Zustand. Es wird gemäß IPCC AR 5 (Myhre et al. 2013) ein GWP von 28 für CH₄

angesetzt, d. h. 1 kg CH₄ wird in 28 kg CO₂-Äquivalente umgerechnet. Für N₂O wird ein GWP von 265 angesetzt (Myhre et al. 2013).

Werden im Zuge von Nutzungsänderungen unversiegelte trockengelegte organische Böden versiegelt, werden die kontinuierlichen Emissionen im Standardfall auf null reduziert, d. h. die Nutzungsänderung führt zu kontinuierlichen Treibhausgaseinsparungen.

Es wurden bislang noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt, die LULUCF-Effekte von Bauvorhaben auf trockengelegten organischen Böden untersuchen. Unter anderem bei den Wirkungen, die sich durch eine Verbringung des abgeschobenen und ausgekofferten Bodens ergeben, bestehen Unsicherheiten. Fraglich ist beispielsweise, wie sich die Kohlenstoffverluste ändern, wenn der trockengelegte organische Boden auf anderem organischem Boden bzw. auf anderem mineralischem Boden abgelegt wird.

Der Standardansatz ist konservativ, da die meisten anderen möglichen Varianten zu geringeren bzw. keinen Treibhausgaseinsparungen durch die Nutzungsänderung auf trockengelegten organischen Böden führen.

4.9 Zusammenfassung

Der vorliegende methodische Ansatz erlaubt es, die Treibhausgaswirkung von Flächennutzungsänderungen mit beliebigen Vorher-Nachher-Konstellationen, sowohl für Außen- als auch für Innenentwicklungsmaßnahmen, zu quantifizieren. Die Wirkungen lassen sich differenziert nach dem Bodentyp (mineralisch bzw. organisch) und nach dem Nutzungsänderungszeitpunkt, d. h. dem Jahr, in dem die Außen- bzw.

Innenentwicklungsmaßnahme stattfindet, berechnen. Darüber hinaus kann eine für die Gemeinde und die Nutzung typische Anzahl an gepflanzten Jungbäumen (Außenentwicklung) bzw. an gefälltten Bestandsbäumen (Innenentwicklung) angesetzt werden. Die Wirkungen setzen sich aus 6 Effekten zusammen, wovon Effekte 3 bis 6 kontinuierliche Wirkungen entfalten. Deshalb ergibt sich die Treibhausgaswirkung stets aus der Summe über einen gewählten Wirkungszeitraum.

Eine zusammenfassende Ergebnistabelle findet sich im Ergebnisband in Kapitel 4.1.5.

5 Treibhausgaswirkungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (LULUCF)

5.1 Treibhausgaswirkung pro durchschnittlichem Hektar Außenentwicklung

5.1.1 Gemeindespezifische Treibhausgaswirkung

Anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Modellierung der Flächenkulisse der Außenentwicklung liegen für jede Gemeinde in Deutschland Matrixtabellen in der Art von Tabelle 22 vor, die beschreiben, aus welchen Nutzungsänderungen sich ein durchschnittlicher Hektar Außenentwicklung zusammensetzt. Die Matrixtabellen liegen differenziert nach mineralischem und organischem Boden vor. Darüber hinaus liegt die gemeindespezifische Anzahl der voraussichtlich gepflanzten Jungbäume pro Hektar Außenentwicklung vor.

Tabelle 22: Aus Kapitel 2.5.1 übernommen: Bundesweit gewichteter Mittelwert der für die einzelnen Gemeinden in der Modellierung der Außenentwicklung angenommenen Nutzungsänderungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme (Vornutzungsszenario „Status Quo“)

Nach der Flächenneuanspruchnahme Vor der Flächenneuanspruchnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Ackerland	701 qm	388 qm	1162 qm	2049 qm	30 qm
Grünland	528 qm	289 qm	866 qm	1515 qm	22 qm
Streuobst	18 qm	9 qm	27 qm	46 qm	1 qm
Gartenland	24 qm	13 qm	38 qm	65 qm	1 qm
Obstbau	6 qm	3 qm	10 qm	17 qm	0 qm
Weinbau	6 qm	3 qm	10 qm	16 qm	0 qm
Sonst. Landwirtschaftsfl.	11 qm	6 qm	17 qm	29 qm	0 qm
Laubholz	45 qm	25 qm	73 qm	127 qm	2 qm
Nadelholz	48 qm	27 qm	81 qm	144 qm	2 qm
Mischholz	42 qm	23 qm	68 qm	117 qm	2 qm
Gehölz	66 qm	36 qm	108 qm	186 qm	3 qm
Heide	5 qm	3 qm	8 qm	14 qm	0 qm
Unland, vegetationsl. Fl.	132 qm	74 qm	221 qm	389 qm	6 qm

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Modellierung der Treibhausgaswirkungen sind zudem für jede der in Tabelle 22 aufgeführten Vorher-Nachher-Konstellationen die Treibhausgaswirkungen über unterschiedliche Wirkungszeiträume bekannt. Auch diese differenzieren nach mineralischem und organischem Boden (siehe Tabelle 8 im Ergebnisband).

Zur Bestimmung der Treibhausgaswirkung eines durchschnittlichen Hektars Außenentwicklung in einer bestimmten Gemeinde werden zunächst die umgenutzten Flächen mit den zugehörigen Treibhausgaswirkungen multipliziert und die Wirkungen aufaddiert, sowohl für Flächen auf mineralischen als auch für Flächen auf organischen Böden. Anschließend wird die Treibhausgaswirkung der Jungbäume hinzuaddiert, die sich aus der Multiplikation der gemeindespezifisch modellierten Anzahl an Jungbäumen mit der Treibhausgaswirkung pro Jungbaum (siehe Kapitel 4.6) ergibt.

Aus diesem Vorgehen lassen sich für jede Gemeinde die durchschnittlichen Treibhausgaswirkungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme ermitteln. Tabelle 23 zeigt ausgewählte Beispiele.

Tabelle 23: Durchschnittliche Treibhausgaswirkung eines Hektars Flächenneuanspruchnahme in exemplarischen Städten und Gemeinden, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Vornutzung: Status Quo

	Schne- verdingen (Nieder- sachsen)	Cottbus (Branden- burg)	Löhne (Nordrhein- Westfalen)	Ilmenau (Thüringen)	Augsburg (Bayern)
Mineralischer Boden	44 t CO ₂ -Äq. / ha	39 t CO ₂ -Äq. / ha	44 t CO ₂ -Äq. / ha	76 t CO ₂ -Äq. / ha	51 t CO ₂ -Äq. / ha
Organischer Boden	-392 t CO ₂ -Äq. / ha	-356 t CO ₂ -Äq. / ha	-420 t CO ₂ -Äq. / ha	-412 t CO ₂ -Äq. / ha	-474 t CO ₂ -Äq. / ha
Anteil organischer Böden an Fläche der Umringe, nutzungskorrigiert	4,2%	5,1%	< 0,1%	0,1%	6,8%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Wie bereits mehrfach erläutert wird auch aus Tabelle 23 deutlich, dass sich die Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme auf mineralischen und organischen Böden deutlich unterscheiden. Während eine Flächenneuanspruchnahme auf mineralischen Böden klimanachteilig ist, hat eine Überbauung organischer Böden rechnerisch klimavorteilhafte Wirkungen, da kontinuierliche Emissionen, die ansonsten entstanden wären, vermieden werden. Wie in Kapitel 4.1.4 im Ergebnisband beschrieben, verringert eine Bebauung organischer Böden jedoch die Möglichkeiten zur Wiedervernässung organischer Böden.

In Tabelle 23 wird in der letzten Zeile angegeben, wie hoch der Anteil der organischen Böden in den Umringen aus Kapitel 2.3.1 ist, korrigiert an den Nutzungswahrscheinlichkeiten aus Kapitel 0 der gezeigten Beispielmunicipien. Im Bundesschnitt liegt der Anteil der organischen Böden an der Flächenneuanspruchnahme bei 3,61 %. Für die Berechnung der in Kapitel 6 beschriebenen Szenarien der zukünftigen Siedlungsentwicklung in Deutschland wird für jede Gemeinde der jeweilige, nutzungskorrigierte Anteil der mineralischen bzw. organischen Böden in den jeweiligen Umringen zur Wichtung der Wirkungen einer Neuanspruchnahme mineralischer bzw. organischer Böden verwendet.

5.1.2 Gewichtete Mittelwerte für Landkreise, Länder und Deutschland insgesamt

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, liegen die Treibhausgaswirkungen pro durchschnittlichem Hektar Außenentwicklung für alle ca. 11.000 Gemeinden in Deutschland als Projektergebnis vor.

Um auf die durchschnittlichen Treibhausgaswirkungen pro Hektar Außenentwicklung für größere räumliche Einheiten wie Landkreise, Bundesländer oder Deutschland insgesamt zu schließen, wird eine Gewichtung der Gemeindewerte anhand ihres Anteils an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021 vorgenommen.

Tabelle 24 zeigt einige Beispiele für exemplarische Landkreise und Bundesländer sowie die Werte für Deutschland insgesamt.

Tabelle 24: Durchschnittliche Treibhausgaswirkung eines Hektars Flächenneuanspruchnahme in exemplarischen Kreisen und Bundesländern sowie für Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Jahr der Nutzungsänderung: 2025, Szenario Vornutzung: Status Quo

	Heidekreis (Nieder- sachsen)	Ilm-Kreis (Thüringen)	Land Brandenburg	Freistaat Bayern	Deutschland insgesamt
Mineralischer Boden	60 t CO ₂ -Äq. / ha	61 t CO ₂ -Äq. / ha	57 t CO ₂ -Äq. / ha	54 t CO ₂ -Äq. / ha	54 t CO ₂ -Äq. / ha
Organischer Boden	-321 t CO ₂ -Äq. / ha	-287 t CO ₂ -Äq. / ha	-335 t CO ₂ -Äq. / ha	-348 t CO ₂ -Äq. / ha	-387 t CO ₂ -Äq. / ha
Anteil organischer Böden an Fläche der Umringe, nutzungskorrigiert	5,73%	0,01%	6,61%	3,27%	3,61%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

5.2 Treibhausgaswirkung einer zusätzlichen Innenentwicklung pro durchschnittlichem vermiedenem Hektar Außenentwicklung

5.2.1 Gemeindespezifische Treibhausgaswirkung

Methodischer Grundansatz des vorliegenden Projekts ist, dass eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme durch eine verstärkte Innenentwicklung kompensiert wird. Die Berechnung der gemeindespezifischen Treibhausgaswirkung dieser zusätzlichen Innenentwicklung erfolgt weitgehend analog zur Berechnung der Treibhausgaswirkung der Außenentwicklung (siehe Kapitel 5.1):

Anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Modellierung der Flächenkulisse der Innenentwicklung liegen für jede Gemeinde in Deutschland Matrizen vor, die beschreiben, welche Nutzungsänderungen in der Innenentwicklung stattfinden, um einen vermiedenen Hektar in der Außenentwicklung zu kompensieren (Kapitel 3.4.1). Zudem wurde dort abgeschätzt, welchen Anteil die mineralischen bzw. organischen Böden an der Innenentwicklung haben. Darüber hinaus wurde in Kapitel 3.4.2 eine Abschätzung zur durchschnittlichen Anzahl der im Zuge der Innenentwicklung gefälltten Bestandsbäume pro vermiedenem Hektar Außenentwicklung vorgenommen.

Wie bei der Außenentwicklung (Kapitel 5.1) lassen sich diese Nutzungsänderungen auch für die Innenentwicklung mit den in Kapitel 4 hergeleiteten Treibhausgaswirkungen der einzelnen Flächennutzungsänderungen (Tabelle 8 im Ergebnisband) multiplizieren, um die

Treibhausgaswirkung abzuschätzen. Nach dem gleichen Prinzip wird die gemeindespezifisch geschätzte Anzahl an durch Innenentwicklungsprojekte gefälltten Bestandsbäumen mit der Treibhausgaswirkung pro gefällttem Bestandsbaum (siehe Kapitel 4.3) multipliziert. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, bildet bei diesen Berechnungen nicht der Hektar Innenentwicklung, sondern der Hektar vermiedene Außenentwicklung die Referenzgröße. Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt Tabelle 25 wieder beispielhaft für fünf ausgewählte Städte und Gemeinden.

Tabelle 25: Durchschnittliche Treibhausgaswirkung der zusätzlichen Innenentwicklung zur Kompensation eines vermiedenen Hektars Außenentwicklung in exemplarischen Städten und Gemeinden, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Innenentwicklung: Alle Innenentwicklungsformen

	Schne- verdingen (Nieder- sachsen)	Cottbus (Branden- burg)	Löhne (Nordrhein- Westfalen)	Ilmenau (Thüringen)	Augsburg (Bayern)
Mineralischer Boden	13 t CO ₂ -Äq. / ha	12 t CO ₂ -Äq. / ha	13 t CO ₂ -Äq. / ha	13 t CO ₂ -Äq. / ha	11 t CO ₂ -Äq. / ha
Organischer Boden	-139 t CO ₂ -Äq. / ha	-120 t CO ₂ -Äq. / ha	-139 t CO ₂ -Äq. / ha	-139 t CO ₂ -Äq. / ha	-103 t CO ₂ -Äq. / ha
Anteil organischer Böden in der Innenentwicklung	4,0%	3,8%	< 0,1%	0,1%	5,9%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

5.2.2 Gewichtete Mittelwerte für Landkreise, Länder und Deutschland insgesamt

Auch für die Treibhausgaswirkung der Innenentwicklung lassen sich gewichtete Mittelwerte für Landkreise, Bundesländer und Deutschland insgesamt ableiten, indem man die Werte der einzelnen Städte und Gemeinden (Tabelle 25) anhand deren Anteilen an der realen Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021 wichtet. Da es dabei nicht um die durchschnittliche Treibhausgaswirkung der Innenentwicklung insgesamt, sondern um die durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro Hektar vermiedener Außenentwicklung geht, ist eine erneute Wichtung an der bisherigen Außenentwicklung sinnvoller als eine Wichtung am gemeindespezifischen Gesamtvolumen der Innenentwicklung. Tabelle 26 zeigt Beispiele für diese gewichtete Mittelwertbildung.

Tabelle 26: Durchschnittliche Treibhausgaswirkung der zusätzlichen Innenentwicklung zur Kompensation eines vermiedenen Hektars Außenentwicklung in exemplarischen Kreisen und Bundesländern sowie für Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Innenentwicklung: Alle Innenentwicklungsformen

	Heidekreis (Nieder- sachsen)	Ilm-Kreis (Thüringen)	Land Brandenburg	Freistaat Bayern	Deutschland insgesamt
Mineralischer Boden	13 t CO ₂ -Äq. / ha	12 t CO ₂ -Äq. / ha	12 t CO ₂ -Äq. / ha	13 t CO ₂ -Äq. / ha	12,5 t CO ₂ -Äq. / ha

	Heidekreis (Nieder- sachsen)	Ilm-Kreis (Thüringen)	Land Brandenburg	Freistaat Bayern	Deutschland insgesamt
Organischer Boden	-140 t CO ₂ -Äq. / ha	-463 t CO ₂ -Äq. / ha	-133 t CO ₂ -Äq. / ha	-233 t CO ₂ -Äq. / ha	-208 t CO ₂ -Äq. / ha
Anteil organischer Böden in der Innenentwicklung	5,56%	0,01%	7,64%	2,87%	3,61%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

5.3 Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen

In Kapitel 2.2 wurde erläutert, dass die Flächenneuanspruchnahme für zusätzliche außerörtliche Verkehrsflächen in den Modellrechnungen gesondert betrachtet wird, weil sich diese Flächenentwicklung nicht durch eine verstärkte Innenentwicklung kompensieren lässt. Wie dort ebenfalls erläutert, findet die Betrachtung zudem bundesweit, d. h. nicht nach Gemeinden differenziert statt.

Die Flächenkulisse der außerörtlichen Verkehrsflächen wurde in Kapitel 2.6 hergeleitet. Multipliziert man die dort genannten Flächennutzungsänderungen pro Hektar zusätzlicher außerörtlicher Verkehrsfläche sowie die dort ebenfalls ermittelte durchschnittliche Anzahl an Baumpflanzungen pro Hektar Neuanspruchnahme mit den Treibhausgaskennwerten aus Kapitel 4 (bzw. Tabelle 8 im Ergebnisbericht), so ergibt sich die in Tabelle 27 dargestellte durchschnittliche Treibhausgaswirkung außerörtlicher Verkehrsflächen.

Tabelle 27: Durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen; Deutschland insgesamt, Wirkungsdauer: 25 Jahre, Szenario Vornutzung: Status Quo

	Deutschland insgesamt
Mineralischer Boden	128 CO ₂ -Äq. / ha
Organischer Boden	-7 CO ₂ -Äq. / ha
Anteil organischer Böden	3,61%

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

5.4 Durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche und pro Kubikmeter Baumasse

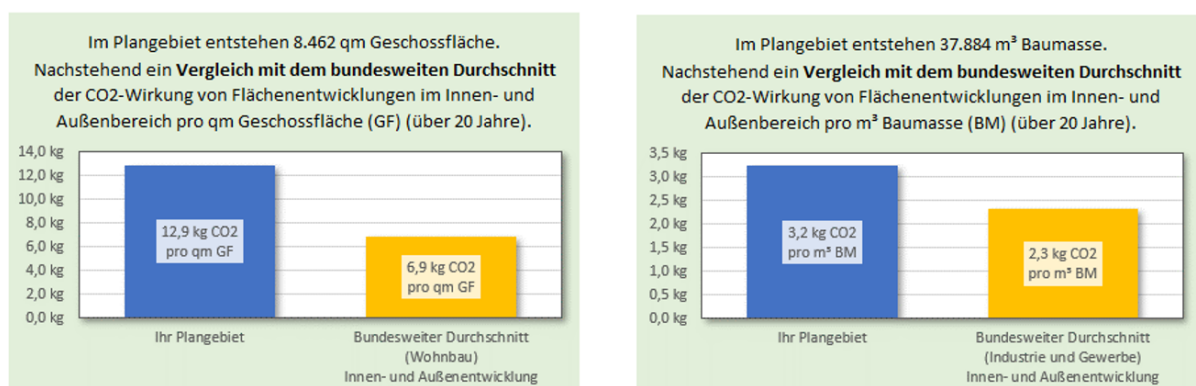
Um ein konkretes Planungsvorhaben hinsichtlich seiner Treibhausgaswirkungen mit anderen Vorhaben zu vergleichen, sind Kennwerte zur Treibhausgaswirkung pro neu geschaffenen Bauvolumen (qm Geschossfläche oder Kubikmeter Baumasse) sinnvoll. Dies gilt aus zwei Gründen:

- ▶ Zur Bewertung eines konkreten Planvorhabens, z. B. eines Bebauungsplanentwurfs, sind die vorstehend hergeleiteten Kennwerte pro Hektar (Kapitel 5.1 und 5.2) aufgrund des Flächenbezugs („pro Hektar Flächenneuanspruchnahme“) wenig hilfreich, weil diese weder Aussagen zur Nutzung noch zur städtebaulichen Dichte enthalten.²⁶
- ▶ Setzt man stattdessen die Treibhausgas-Wirkungsfaktoren aus Kapitel 4 an, so führt eine höhere städtebauliche Dichte immer zu einer höheren Treibhausgaswirkung. Dass mit der höheren städtebaulichen Dichte aber mehr Nutzung auf gleichem Raum untergebracht werden kann und somit eine Flächenneuanspruchnahme an anderer Stelle vermieden wird, wird bei dieser Betrachtung nicht sofort ersichtlich.

Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel bundesweite Vergleichskennwerte der Treibhausgaswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse in Abhängigkeit der Nutzung hergeleitet. Diese Kennwerte erlauben es, eine konkrete Planung mit diesen Durchschnittswerten zu vergleichen und so zu einer fundierteren Bewertung zu gelangen.

Die nachstehend hergeleiteten Kennwerte sind als Vergleichswerte auch im LULUCF Wirkungsrechner enthalten, der im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurde (Abbildung 48).

Abbildung 48: Screenshot aus dem Excel-basierten LULUCF Wirkungsrechner: Vergleich einer exemplarischen Planung mit den in diesem Kapitel hergeleiteten bundesweiten Durchschnittswerten, links: für Nutzungen „Wohnen“, „Mischfläche“ oder „besondere funktionale Prägung“ (Bezug: qm Geschossfläche), rechts: für Nutzung „Industrie und Gewerbe“ (Bezug: Kubikmeter Baumasse)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR, anhand des im Rahmen des vorliegenden Projekts entwickelten LULUCF Wirkungsrechners

²⁶ Wie dargestellt wurden die gemeindetypspezifischen Nutzungsanteile und städtebaulichen Dichten in der Herleitung der Kennwerte detailliert berücksichtigt. Aufgrund der primären Anwendung in den Szenarien (Kapitel 6) sind die abgeleiteten Kennwerte („CO₂-Äquivalente pro Hektar realisierter bzw. vermiedener Flächenneuanspruchnahme“) jedoch entsprechend gewichtete Mittelwerte.

Die Herleitung der in Tabelle 31 am Ende des Kapitels ausgewiesenen Vergleichswerte erfolgt über die folgenden Schritte. Die Vergleichswerte beziehen sich ausschließlich auf eine Nutzungsänderung auf mineralischem Boden.

- ▶ Die nach Nutzung differenzierten Gemeindewerte zu den Nutzungsänderungen und zur Anzahl an Baumpflanzungen pro Hektar Außenentwicklung (Kapitel 2.5) werden nach den Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“ zusammengefasst. Wichtungsfaktor bei der Zusammenfassung ist der Anteil der Gemeinden an der realen Flächenneuanspruchnahme 2009-2021 innerhalb des jeweiligen Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“. Die daraus abgeleiteten Kennwerte sind in der dritten Spalte der Tabelle 28 dargestellt.²⁷
- ▶ In der vierten Spalte der Tabelle 28 sind die durchschnittlichen Geschossflächen- (GFZ) bzw. Baumassenzahlen (BMZ) ausgewiesen, die bereits in Kapitel 3.2.3 zur Herleitung des gemeindespezifischen Volumens der Innenentwicklung zum Ersatz eines vermiedenen Hektars Außenentwicklung verwendet wurden. Nutzt man diese erneut, um das pro Hektar Außenentwicklungsfläche entstehende Bauvolumen (Geschossfläche bzw. Baumasse) abzuschätzen und setzt dieses in Relation zur zuvor bestimmten Treibhausgaswirkung pro Hektar Außenentwicklung, so lassen sich die in der letzten Spalte der Tabelle 28 ausgewiesenen Kennzahlen zur Treibhausgaswirkung pro qm Geschossfläche bzw. m³ Baumasse errechnen. Aufgrund der kleinen Bezugsgröße (qm GF bzw. m³ BM) wird diese in Kilogramm CO₂-Äquivalenten (anstatt in Tonnen) angegeben.
- ▶ Nach einem ähnlichen Verfahren wird mit Tabelle 29 die durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro qm neu geschaffener Geschossfläche bzw. m³ Baumasse hergeleitet.

²⁷ Beim Vergleich mit den Kennwerten der vorstehenden Kapitel 5.1 bzw. 4.1.5 im Ergebnisband ist zu beachten, dass sich die Werte in Tabelle 28 auf einen Wirkungszeitraum von 20 statt 25 Jahre beziehen. Kürzere Betrachtungszeiträume führen in der Regel zu größeren Treibhausgaswirkungen.

Tabelle 28: Herleitung der Treibhausgaswirkung der Außenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden

Nutzung	Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	Treibhausgaswirkung pro ha Außenentwicklung ¹⁾ [t CO ₂ -Äq. / ha]	Durchschnittliche GFZ bzw. BMZ (Außenentwicklung)	Treibhausgaswirkung der Außenentwicklung pro qm GF bzw. m ³ BM ¹⁾ [kg CO ₂ -Äq. / qm bzw. m ³]
Wohnen	1	37,7	0,19	19,8 kg / qm GF
	2	40,5	0,21	19,3 kg / qm GF
	3	40,9	0,24	17,0 kg / qm GF
	4	44,1	0,27	16,3 kg / qm GF
	5	44,1	0,31	14,2 kg / qm GF
	6	49,8	0,41	12,2 kg / qm GF
	7	51,4	0,47	10,9 kg / qm GF
	8	38,8	0,50	7,8 kg / qm GF
Mischnutzung	1	41,0	0,27	15,2 kg / qm GF
	2	43,7	0,29	15,1 kg / qm GF
	3	44,6	0,32	13,9 kg / qm GF
	4	48,2	0,35	13,8 kg / qm GF
	5	48,1	0,39	12,3 kg / qm GF
	6	53,5	0,54	9,9 kg / qm GF
	7	55,3	0,61	9,1 kg / qm GF
	8	44,4	0,74	6,0 kg / qm GF
Besondere funkt. Prägung	1	36,1	0,25	14,5 kg / qm GF
	2	38,3	0,25	15,3 kg / qm GF
	3	39,3	0,30	13,1 kg / qm GF
	4	42,1	0,31	13,6 kg / qm GF
	5	42,2	0,37	11,4 kg / qm GF
	6	47,6	0,44	10,8 kg / qm GF
	7	49,2	0,47	10,5 kg / qm GF
	8	37,0	0,51	7,3 kg / qm GF
Industrie und Gewerbe	1	43,6	0,79	5,5 kg / m ³ BM
	2	47,0	1,00	4,7 kg / m ³ BM
	3	47,1	1,06	4,4 kg / m ³ BM
	4	50,0	1,16	4,3 kg / m ³ BM
	5	50,4	1,38	3,6 kg / m ³ BM
	6	56,3	2,02	2,8 kg / m ³ BM
	7	57,6	2,23	2,6 kg / m ³ BM
	8	45,3	2,44	1,9 kg / m ³ BM

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

¹⁾ Nutzungsänderung im Jahr 2025, 20 Jahre Wirkungsdauer, mineralischer Boden

Tabelle 29: Herleitung der Treibhausgaswirkung der Innenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden

Nutzung	Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	Treibhausgaswirkung pro ha Innenentwicklung ¹⁾ [t CO ₂ -Äq. / ha]	qm GF bzw. m ³ BM pro Hektar Innenentwicklung	Treibhausgaswirkung der Innenentwicklung pro qm GF bzw. m ³ BM ¹⁾ [kg CO ₂ -Äq. / qm bzw. m ³]
Wohnen	1	14,7	2.320	6,3 kg / qm GF
	2	14,9	2.689	5,6 kg / qm GF
	3	15,1	3.240	4,7 kg / qm GF
	4	15,2	3.589	4,2 kg / qm GF
	5	15,1	4.251	3,6 kg / qm GF
	6	14,9	5.980	2,5 kg / qm GF
	7	14,8	6.960	2,1 kg / qm GF
	8	14,4	7.503	1,9 kg / qm GF
Mischnutzung	1	16,4	3.516	4,7 kg / qm GF
	2	16,6	3.682	4,5 kg / qm GF
	3	17,2	4.081	4,2 kg / qm GF
	4	17,7	4.395	4,0 kg / qm GF
	5	17,9	4.870	3,7 kg / qm GF
	6	17,6	6.661	2,6 kg / qm GF
	7	17,8	7.546	2,4 kg / qm GF
	8	17,5	9.127	1,9 kg / qm GF
Besondere funkt. Prägung	1	13,6	2.851	4,8 kg / qm GF
	2	13,7	2.814	4,9 kg / qm GF
	3	14,1	3.270	4,3 kg / qm GF
	4	14,3	3.390	4,2 kg / qm GF
	5	14,4	3.970	3,6 kg / qm GF
	6	14,6	4.667	3,1 kg / qm GF
	7	14,4	5.023	2,9 kg / qm GF
	8	14,1	5.323	2,7 kg / qm GF
Industrie und Gewerbe	1	14,9	9.055	1,6 kg / m ³ BM
	2	14,9	11.185	1,3 kg / m ³ BM
	3	15,2	12.042	1,3 kg / m ³ BM
	4	15,3	13.277	1,2 kg / m ³ BM
	5	16,0	16.057	1,0 kg / m ³ BM
	6	16,1	23.672	0,7 kg / m ³ BM
	7	16,4	26.434	0,6 kg / m ³ BM
	8	16,4	28.640	0,6 kg / m ³ BM

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

1) Nutzungsänderung im Jahr 2025, 20 Jahre Wirkungsdauer, mineralischer Boden, 2/3 Szenario „Alle Formen der Innenentwicklung“, 1/3 Szenario „Erhalt Stadtgrün“

Tabelle 30: Am Innenentwicklungsanteil gewichtete durchschnittliche Treibhausgaswirkung der Außen- und Innenentwicklung pro qm Geschossfläche bzw. m³ Baumasse, differenziert nach Nutzung und Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“, nur mineralischer Boden

Nutzung	Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte“	Anteil der Innenentwicklung an der neu geschaffenen Geschossfläche bzw. Baumasse	Treibhausgaswirkung der Innen- und Außenentwicklung pro qm GF bzw. m ³ BM ¹) [kg CO ₂ -Äq. / qm bzw. m ³]	Anteil des Gemeindetyps „Städtebauliche Dichte“ an der neu geschaffenen Geschossfläche bzw. Baumasse der Nutzung	
Wohnen	1	50%	13,0 kg / qm GF	1,5%	Σ = 100%
	2	50%	12,4 kg / qm GF	4,1%	
	3	51%	10,7 kg / qm GF	8,4%	
	4	52%	10,0 kg / qm GF	14,5%	
	5	64%	7,4 kg / qm GF	28,2%	
	6	78%	4,6 kg / qm GF	24,6%	
	7	87%	3,3 kg / qm GF	16,6%	
	8	87%	2,7 kg / qm GF	2,2%	
Mischnutzung	1	50%	9,9 kg / qm GF	1,5%	Σ = 100%
	2	50%	9,8 kg / qm GF	4,1%	
	3	51%	9,0 kg / qm GF	8,4%	
	4	52%	8,7 kg / qm GF	14,5%	
	5	64%	6,8 kg / qm GF	28,2%	
	6	78%	4,2 kg / qm GF	24,6%	
	7	87%	3,2 kg / qm GF	16,6%	
	8	87%	2,5 kg / qm GF	2,2%	
Besondere funkt. Prägung	1	45%	10,1 kg / qm GF	1,8%	Σ = 100%
	2	45%	10,6 kg / qm GF	4,6%	
	3	46%	9,1 kg / qm GF	9,1%	
	4	47%	9,2 kg / qm GF	13,5%	
	5	58%	6,9 kg / qm GF	29,6%	
	6	70%	5,4 kg / qm GF	24,0%	
	7	78%	4,5 kg / qm GF	15,0%	
	8	78%	3,7 kg / qm GF	2,5%	
Industrie und Gewerbe	1	35%	4,2 kg / m ³ BM	1,8%	Σ = 100%
	2	35%	3,5 kg / m ³ BM	4,6%	
	3	36%	3,3 kg / m ³ BM	9,1%	
	4	37%	3,2 kg / m ³ BM	13,5%	
	5	45%	2,5 kg / m ³ BM	29,6%	
	6	55%	1,6 kg / m ³ BM	24,0%	
	7	61%	1,4 kg / m ³ BM	15,0%	
	8	61%	1,1 kg / m ³ BM	2,5%	

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

¹⁾ Nutzungsänderung im Jahr 2025, 20 Jahre Wirkungsdauer, mineralischer Boden

- ▶ In Kapitel 3.3.3 wurde detailliert dargestellt, auf Basis welcher empirischen Kennwerte die gemeindespezifischen Anteile der Innenentwicklungsformen hergeleitet wurden. Im Rahmen dieser Herleitung wurde u. a. ein gemeindetyp- bzw. nutzungsspezifischer Innenentwicklungsanteil geschätzt. Diese Innenentwicklungsanteile werden in Tabelle 30 verwendet, um die Treibhausgaswirkung der Außenentwicklung (Tabelle 28) und der Innenentwicklung (Tabelle 29) in Abhängigkeit von Nutzung und städtebaulicher Dichte zu gewichten. Ergebnis ist die in der vierten Spalte der Tabelle 30 ausgewiesene durchschnittliche Treibhausgaswirkung pro qm GF bzw. m³ BM der Neubauvorhaben der genannten Nutzungen insgesamt, also in der Außen- und der Innenentwicklung.
- ▶ Um zu den letztendlich gesuchten Kennwerten nach Nutzung (Tabelle 31) zu gelangen, braucht es in einem letzten Schritt eine Gewichtung der Gemeindetypen „Städtebauliche Dichte“. Diese Gewichtungsfaktoren sind in der vorletzten Spalte der Tabelle 30 ausgewiesen. Wie die letzte Spalte zeigt, ist die Summe der Gewichtungsfaktoren für jede der vier betrachteten Nutzungen (Wohnen, Mischnutzung, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe) jeweils 100 %. Die Gewichtungsfaktoren wurden ebenfalls der Herleitung aus Kapitel 3.3.3 entnommen. Hauptquelle sind die Bautätigkeitsstatistik der Statistikämter des Bundes und der Länder auf Gemeindeebene (Regionalstatistik der Statistikämter des Bundes und der Länder 2023; Destatis 2023).

Tabelle 31: Treibhausgaswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse im Bundesschnitt in Abhängigkeit der Nutzung

Nutzung	Durchschnittliche Treibhausgaswirkung entsprechender Projekte in der Innen- und Außenentwicklung (Bundesschnitt, mineralischer Boden)
Wohnbau	6,9 kg CO ₂ -Äquivalente/ qm Geschossfläche (GF)
Mischnutzung	6,1 kg CO ₂ -Äquivalente/ qm Geschossfläche (GF)
Besondere funktionale Prägung	6,8 kg CO ₂ -Äquivalente/ qm Geschossfläche (GF)
Industrie und Gewerbe	2,3 kg CO ₂ -Äquivalente/ m ³ Baumasse (BM)

Aus einem Vergleich der beiden im Zuge der Herleitung verwendeten Kennwerttabellen (Tabelle 28: Außenentwicklung; Tabelle 29) werden erneut zwei Effekte deutlich:

- ▶ Ein Quadratmeter Geschossfläche bzw. ein Kubikmeter Baumasse erzeugt in der Innenentwicklung nur etwa 27 % der Treibhauswirkung wie in der Außenentwicklung.
- ▶ Eine höhere städtebauliche Dichte führt zu deutlich geringen Treibhausgaswirkungen pro neu geschaffenem Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse. Zwischen dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte 1 (= sehr gering) und dem Gemeindetyp „Städtebauliche Dichte 8 (= sehr hoch) zeigt sich mehr als eine Halbierung der Treibhauswirkung pro Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Baumasse.

6 Bundesweiter Vergleich der Treibhausgaswirkung von Szenarien der Siedlungsentwicklung (LULUCF)

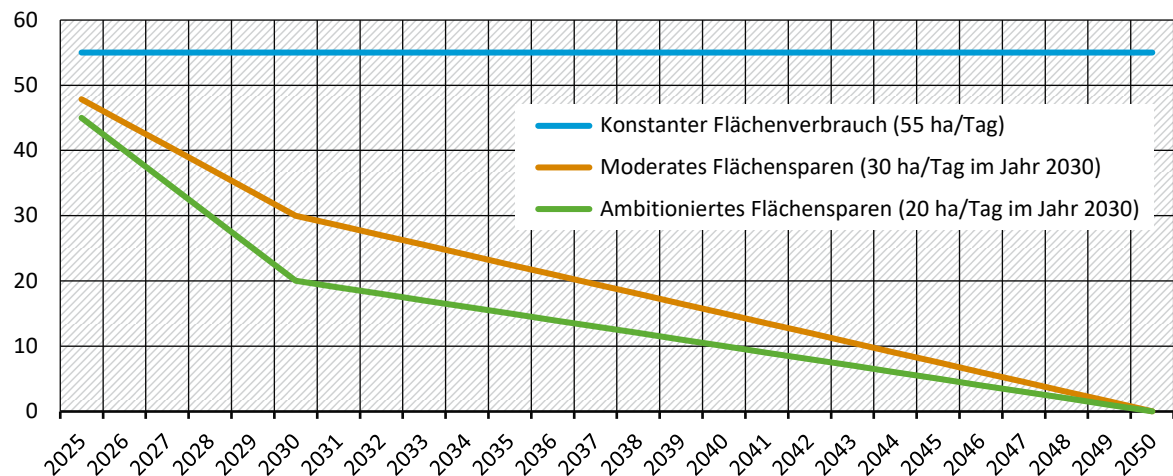
6.1 Szenarien der Siedlungsentwicklung

Die Treibhausgaswirkungen werden für die folgenden 3 Szenarien der Siedlungsentwicklung berechnet:

1. Konstanter Flächenverbrauch: 55 ha pro Tag
2. Ambitioniertes Flächensparen: 30 ha pro Tag im Jahr 2030
3. Moderates Flächensparen: 20 ha pro Tag im Jahr 2030

Die Entwicklung der Flächenneuanspruchnahme in den 3 Szenarien ist in Abbildung 49 dargestellt.

Abbildung 49: Szenarien der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland in Hektar pro Tag



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ wird angesetzt, dass es nicht gelingt, die Flächenneuanspruchnahme weiter zu reduzieren. Sie bleibt auf einem konstanten Niveau von 55 Hektar pro Tag.

In den beiden Zielszenarien Ambitioniertes Flächensparen und Moderates Flächensparen wird in Anlehnung an die bundespolitischen Ziele angesetzt, dass die Flächenneuanspruchnahme im Jahr 2030 auf 30 bzw. auf 20 Hektar pro Tag reduziert wird und anschließend bis zum Jahr 2050 auf Netto-Null absinkt. Die Reduktion zum Zielwert im Jahr 2030 erfolgt linear ausgehend von 55 Hektar pro Tag im Jahr 2024, d. h. es wird angesetzt, dass die aktuellen Maßnahmen bereits greifen und ausreichen, um die Flächenneuanspruchnahme entsprechend zu reduzieren.

Es wird angesetzt, dass die gegenüber dem Referenzwert von 55 Hektar pro Tag reduzierte Flächenneuanspruchnahme durch verstärkte Aktivitäten im Bereich der Innenentwicklung kompensiert werden. In Deutschland finden bereits umfangreiche Aktivitäten im Bereich der Innenentwicklung statt. Die hier betrachtete und abgebildete Innenentwicklung stellt lediglich eine Teilmenge der gesamtdeutschen Innenentwicklung dar und ist im Umfang so modelliert, dass sie die vermiedene Außenentwicklung kompensiert. Die Herleitung des zur Kompensation benötigten Umfangs der Innenentwicklung ist detailliert in Kapitel 3 dargestellt.

Die in Abbildung 49 dargestellte gesamtdeutsche Flächenneuanspruchnahme wird anhand eines konstanten gemeindespezifischen Anteilsfaktors auf die ca. 11.000 Gemeinden in Deutschland umgelegt. Die Anteilsfaktoren entsprechen dem Anteil jeder Gemeinde an der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland im Zeitraum 2009 bis 2021. Diese Modellierung beinhaltet folglich keinerlei Variation der Akzentuierung, wo Flächenneuanspruchnahme in Deutschland stattfindet und auch keine normativen Aspekte, wo Flächenneuanspruchnahme stattfinden sollte bzw. sinnvoll ist.

6.2 Absolute Treibhausgaswirkungen der Siedlungsentwicklung in den drei Szenarien

Die absolute Treibhausgaswirkung der Siedlungsentwicklung in den ca. 11.000 Gemeinden Deutschlands ergibt sich aus der Wirkung der Außenentwicklung plus der Wirkung der zusätzlichen Innenentwicklung²⁸. Die Wirkungen der Außenentwicklung wird berechnet, indem die jahres- und gemeindespezifische Flächenneuanspruchnahme (siehe vorheriger Kapitel 6.1) mit der jahres- und gemeindespezifischen Treibhausgaswirkung pro Hektar Außenentwicklung (siehe Kapitel 5.1) multipliziert wird. Die Wirkung der Innenentwicklung wird berechnet, indem die jahres- und gemeindespezifische Anzahl der gegenüber dem Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ vermiedenen Hektare Außenentwicklung mit der jahres- und gemeindespezifischen Treibhausgaswirkung der zusätzlichen Innenentwicklung pro vermiedenem Hektar Außenentwicklung (siehe Kapitel 5.2) multipliziert wird.

Aus den ermittelten Treibhausgaswirkungen der Siedlungsentwicklung der ca. 11.000 Gemeinden in Deutschland können per Aufsummierung die Treibhausgaswirkungen anderer räumlicher Einheiten bestimmt werden, insbesondere die bundesweiten Treibhausgaswirkungen.

Per Differenzbildung zwischen den modellierten Szenarien der Siedlungsentwicklung wurde auf Einsparpotenziale geschlossen.

²⁸ nur in den beiden Zielszenarien Ambitioniertes bzw. Moderates Flächensparen.

7 Treibhausgaswirkungen aus der Errichtung und Nutzung von technischer Infrastruktur und Gebäuden

7.1 Errichtung von technischer Infrastruktur

Im Fokus des vorliegenden Projekts stehen die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen von Flächenneuanspruchnahme. Darüber hinaus werden die mit der Errichtung von Infrastruktur und Gebäuden verbundenen Treibhausgaswirkungen in einem nachrangigen aber soliden Detailgrad untersucht.

7.1.1 Systemgrenze

Die Systemgrenze umfasst die Herstellung der benötigten Baumaterialien und den Baustellenbetrieb zur erstmaligen Neuerrichtung der zusätzlichen Infrastrukturen. Kontinuierlich anfallende Instandhaltungs- oder -setzungsmaßnahmen sind nicht innerhalb der Systemgrenze. Die folgenden technischen Infrastruktursektoren liegen innerhalb der Systemgrenze:

- ▶ Fahrbahnen und Gehwege
- ▶ Elektrizität
- ▶ Trinkwasserversorgung
- ▶ Abwasserentsorgung
- ▶ Telekommunikation
- ▶ Abfallentsorgung
- ▶ Nah- bzw. Fernwärme
- ▶ Wasserstoff bzw. Erdgas

Außerhalb der Systemgrenze liegen U-Bahnen, Straßenbahnen, Haltestellen und Lärmschutzwände. Außerdem liegt private technische Infrastruktur außerhalb der Systemgrenze.

7.1.2 Bestimmung des Umfangs der technischen Infrastruktur

Unabhängig davon, ob technische Infrastruktur in der Außenentwicklung oder der Innenentwicklung neu gebaut wird, wird der Umfang der technischen Infrastruktur durch folgende Kenngrößen festgelegt, jeweils bezogen auf einen Hektar Siedlungsfläche:

- ▶ Fläche der Fahrbahnen und Gehwegen
- ▶ Schichtaufbau der Fahrbahnen und Gehwege
- ▶ Länge der leitungsgebundenen Infrastrukturen
- ▶ Dimensionierung der Leitungen

Es wird generell zwischen folgenden 8 Nutzungen differenziert:

1. Verkehrsflächen außerhalb
2. Plätze

3. Wohnbau
4. Mischnutzung
5. Besondere funktionale Prägung
6. Industrie- und Gewerbe
7. Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen
8. Sonstige Siedlungsfreiflächen

Außenentwicklung

Um in Erfahrung zu bringen, wie sich Siedlungs- und Verkehrsfläche aus Vegetationsfläche und aus versiegelter Fläche zusammensetzt, wurde eine ca. 2.000 ha Siedlungs- und Verkehrsflächen umfassende luftbildgestützte Auswertung beauftragt (siehe Kapitel 2.4). Ein Ergebnis dieser Flächenklassifizierung ist der Anteil „öffentlicher versiegelter Fläche“. Es wird angenommen, dass dieser Anteil identisch ist mit der Fläche für Fahrbahnen und Gehwege. Er beträgt etwa 4 % für die Nutzung Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen und etwa 26 % für Plätze, siehe Tabelle 8.

Bezüglich des Schichtaufbaus wird für außerörtliche Straßen und Industrie- und Gewerbegebiete der Schichtaufbau von Landstraßen angenommen. Für alle anderen Nutzungen, insbesondere Wohnen und Mischnutzung, wird ein allgemeiner Schichtaufbau von Gemeindestraßen angenommen.

Hinsichtlich der leitungsgebundenen Infrastruktursektoren sind Projekt-Check durchschnittliche Netzlängen von etwa 180 m pro ha für die Nutzungen Wohnbau, Mischnutzung und besondere funktionale Prägung sowie etwa 130 m pro ha für Industrie und Gewerbe entnommen.

In Abhängigkeit vom Infrastruktursektor und vom Bodenpreisniveau der Gemeinden werden diese Netzlängen mit einem Anpassungsfaktor multipliziert, um auf die voraussichtlichen Netzlängen zu schließen. Die Anpassungsfaktoren sind geschätzt. Für Nah- bzw. Fernwärme wird in den höchstpreisigen und entsprechend am dichtesten bebauten Gemeinden ein Anpassungsfaktor von 0,95 angesetzt, für die niedrigstpreisigen Gemeinden ein Faktor von 0,35, dazwischen linear interpoliert. Für Wasserstoff wird in den höchstpreisigen Gemeinden ein Anpassungsfaktor von 0,2 angesetzt, für die niedrigstpreisigen Gemeinden ein Faktor von 0,65, dazwischen linear interpoliert. Im Neubau werden aktuell nur noch selten klassische Erdgasnetze verlegt, da die Gebäudetemperierung anderweitig realisiert wird. Die Anpassungsfaktoren der anderen Infrastruktursektoren sind unabhängig vom Bodenpreisniveau der Gemeinden.

Darüber hinaus wird mithilfe eines Dimensionierungsfaktors berücksichtigt, dass in Gemeinden mit hohem Bodenpreisniveau tendenziell höhere Leitungsquerschnitte usw. verwendet werden. Die Dimensionierungsfaktoren sind ebenfalls geschätzt, aber mithilfe von Arbeiten aus Buchert et al. (2023) plausibilisiert. Der Faktor beträgt 1,5 für die Gemeinden mit dem höchsten Bodenpreisniveau und 0,8 für die Gemeinden mit niedrigstem Bodenpreisniveau, dazwischen linear interpoliert.

Die unterschiedlichen Ansätze sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 32: Ansätze zur Bestimmung des Umfangs technischer Infrastruktur

Nutzung	Fahrbahnen und Gehwege	Leitungsgebundene Infrastrukturen
Verkehrsflächen außerhalb	55 % asphaltierter Flächenanteil, Schichtaufbau Landstraße	keine Versorgungsleitungen

Nutzung	Fahrbahnen und Gehwege	Leitungsgebundene Infrastrukturen
Plätze	25 % asphaltierter Flächenanteil, Schichtaufbau Landstraße	keine Versorgungsleitungen
Wohnbau	12 – 14 % asphaltierter Flächenanteil (Bodenpreisniveau-abhängig), Schichtaufbau Gemeindestraße	180 m / ha · Netzlängenfaktor Infrastruktursektor · Dimensionierungsfaktor
Mischnutzung	8 – 11 % asphaltierter Flächenanteil (Bodenpreisniveau-abhängig), Schichtaufbau Gemeindestraße	180 m / ha · Netzlängenfaktor Infrastruktursektor · Dimensionierungsfaktor
Besondere funktionale Prägung	5 – 6 % asphaltierter Flächenanteil (Bodenpreisniveau-abhängig), Schichtaufbau Gemeindestraße	180 m / ha · Netzlängenfaktor Infrastruktursektor · Dimensionierungsfaktor
Industrie- und Gewerbe	6 – 7 % asphaltierter Flächenanteil (Bodenpreisniveau-abhängig), Schichtaufbau Landstraße	130 m / ha · Netzlängenfaktor Infrastruktursektor · Dimensionierungsfaktor
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	Ca. 4 % asphaltierter Flächenanteil, Schichtaufbau Gemeindestraße	20 % der Netzlänge für Wohnbau
Sonstige Siedlungsfreiflächen	Ca. 7 % asphaltierter Flächenanteil, Schichtaufbau Gemeindestraße	20 % der Netzlänge für Wohnbau

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Hinsichtlich des Infrastrukturektors Abfallentsorgung wird angesetzt, dass in begrenztem Umfang zusätzliche Abfallsammelfahrzeuge benötigt werden. Zusätzliche Müllbehandlungskapazitäten, die sich zwischen schwerpunktmäßigen Außen- bzw. Innenentwicklungsszenarien unterscheiden, werden nicht quantifiziert.

Innenentwicklung

Es wird vereinfacht angesetzt, dass Innenentwicklung, die auf Ebene von Einzelgebäuden stattfindet (Typen 1 bis 6, siehe Kapitel 3.3), nicht mit der Errichtung von zusätzlicher technischer Infrastruktur verbunden ist. In der Realität führt Nachverdichtung dazu, dass technische Infrastrukturen überlastet sein können, sodass teilweise Anpassungen an der Dimensionierung vorgenommen werden müssen. Dieser Zusammenhang ist im Modell nicht quantifiziert. Wo Innenentwicklung auf der Ebene von Entwicklungsflächen stattfindet (Typen 7 und 8, siehe Kapitel 3.3), wird konsequent angesetzt, dass neue zusätzliche Infrastrukturen zum Zeitpunkt der Nutzungsänderung errichtet werden. Dass diese Maßnahmen teilweise auch mit einem Rückbau vorhandener Infrastruktur verbunden sind, ist im Modell nicht quantifiziert.

Bezogen auf einen Hektar Nutzungsänderung zu Siedlungs- und Verkehrsflächen mit einer bestimmten Nachher-Nutzung werden für Innenentwicklungsmaßnahmen dieselben Randbedingungen angesetzt wie für Außenentwicklungsmaßnahmen, beispielsweise hinsichtlich der Flächenanteile für Fahrbahnen und Gehwege und der Netzlängen mit der Ausnahme, dass hinsichtlich leitungsgebundener Infrastrukturen angesetzt wird, dass das Bodenpreisniveau jeweils eine Kategorie höher liegt, sodass in der Dimensionierung größere Querschnitte usw. verwendet werden.

7.1.3 Bestimmung der Treibhausgasemissionen pro Infrastruktureinheit

Die Treibhausgasemissionen pro Infrastruktureinheit ergeben sich aus den Materialaufwendungen zur Herstellung des Straßenbelags bzw. der Leitungen sowie dem Baustellenbetrieb für den Einbau der Materialien. Aus Buchert et al. (2023) sind die Emissionen pro m Leitungsnetz für die Sektoren Trinkwasser, Abwasser sowie Nah- bzw. Fernwärme entnommen. Hinsichtlich Fahrbahnen und Gehwege werden die aktuelleren Emissionsfaktoren, die in Buchert et al. (2022) für das Bayerische Verkehrsministerium zusammengestellt wurden, verwendet. Die verbleibenden Sektoren Elektrizität, Telekommunikation und Wasserstoff sind mithilfe von Informationen zu den verwendeten Materialien und den Leitungsquerschnitten abgeschätzt. Auf Basis von Buchert et al. (2022) wird ein pauschaler Aufschlag von 25 % ergänzt, um den Baustellenbetrieb (insbesondere Einsatz von Dieselmotoren für Baumaschinen und Transporte) abzubilden. Auf Basis der Ergebnisse in Buchert et al. (2023) wird angesetzt, dass die zusätzlichen benötigten Abfallsammelfahrzeuge einen pauschalen Beitrag von 0,4 % der Treibhausgasemissionen ausmachen.

Tabelle 33 fasst die angesetzten Emissionsfaktoren zusammen.

Tabelle 33: Emissionsfaktoren für die Errichtung technischer Infrastruktur

Infrastruktursektor	Spezifikation	Bezugsgröße	kg CO ₂ -Äq. pro Bezugsgröße	Quelle
Fahrbahn und Gehweg	Gemeindestraße	m ²	50	Eigene Abschätzung auf Basis von Buchert et al. (2022)
Fahrbahn und Gehweg	Landstraße	m ²	59	Buchert et al. (2022)
Elektrizität		m	66	Eigene Abschätzung auf Basis von Ecoinvent (2023)
Trinkwasser		m	54	Buchert et al. (2023)
Abwasser		m	37	Buchert et al. (2023)
Telekommunikation		m	33	Eigene Abschätzung auf Basis von Ecoinvent (2023)
Nah- bzw. Fernwärme		m	138	Buchert et al. (2023)
Wasserstoff		m	10	Eigene Abschätzung auf Basis von Ecoinvent (2023)

Die Emissionen werden vollständig im Jahr der Nutzungsänderung verbucht. Im Standardfall wird ein starres Hintergrundsystem angesetzt, d. h. die in Tabelle 33 aufgeführten Emissionsfaktoren gelten unabhängig davon, wann die Nutzungsänderung stattfindet.

7.2 Errichtung von Gebäuden

7.2.1 Systemgrenze

Die Systemgrenze umfasst grundsätzlich die Herstellung der benötigten Baumaterialien und den Baustellenbetrieb zur erstmaligen Neuerrichtung der zusätzlichen Gebäudegeschossfläche. Kontinuierlich anfallende Instandhaltungs- oder -setzungsmaßnahmen sind nicht innerhalb der Systemgrenze. Ausschließlich Gebäude, die in den Nutzungen Wohnbau, Mischnutzung und besondere funktionale Prägung errichtet werden, sind Teil der Systemgrenze. Für solche Gebäude wird zunächst bestimmt, wie viele Treibhausgasemissionen im Zuge von Außenentwicklungsmaßnahmen mit tendenziell kleineren Gebäudeeinheiten – d. h. mit einer geringeren Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude und einem schlechteren A:V-Verhältnis – entstehen und anschließend mit den Treibhausgasemissionen verglichen, die im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen mit tendenziell größeren Gebäudeeinheiten – d. h. mit einer größeren Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude und einem besseren A:V-Verhältnis – entstehen. Für alle anderen Nutzungen, insbesondere für Industrie- und Gewerbegebiete, erfolgt keine Quantifizierung der Emissionen, die mit der Gebäudeerrichtung verbunden sind, da keine veränderte Gebäudekubatur bei Innenentwicklungsmaßnahmen angenommen wird bzw. keine Literaturquellen für eine fundierte Quantifizierung vorliegen.

7.2.2 Bestimmung der errichteten Gebäudegeschossfläche

Den Modellen „Außenentwicklung“ und „Innenentwicklung“ (siehe Kapitel 2 und 3) lässt sich die Information entnehmen, wie viele Quadratmeter Geschossfläche in den unterschiedlichen Gemeinden voraussichtlich bei einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in der Außenentwicklung vermieden bzw. in der Innenentwicklung realisiert werden. Diese Quadratmeterzahl wird mithilfe von Tabelle 34 sowohl für Außen- als auch für Innenentwicklungsmaßnahmen in einen Einfamilienhaus- und einen Mehrfamilienhausanteil aufgetrennt.

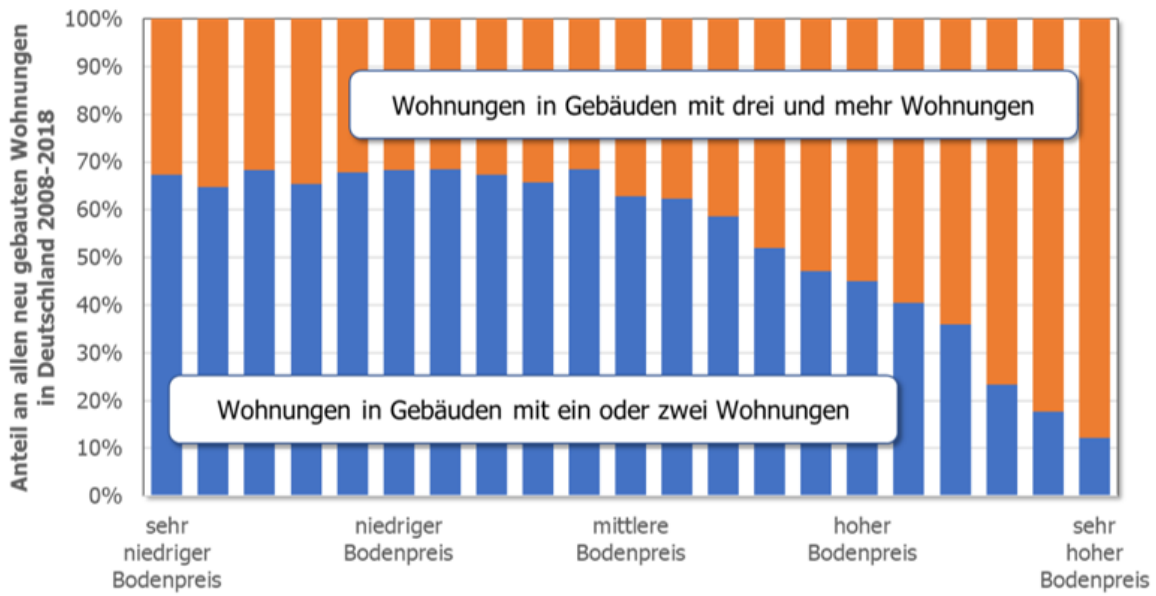
Tabelle 34: EFH- und MFH-Anteile bei Außen- bzw. Innenentwicklungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Bodenpreisniveau der Gemeinden

Bodenpreisniveau der Gemeinden	Außenentwicklung		Innenentwicklung	
	Anteil EFH	Anteil MFH	Anteil EFH	Anteil MFH
Stufe 1 (geringstes Preisniveau)	72%	28%	62%	38%
Stufe 2	72%	28%	62%	38%
Stufe 3	72%	28%	62%	38%
Stufe 4	72%	28%	62%	38%
Stufe 5	65%	35%	55%	45%
Stufe 6	55%	45%	45%	55%
Stufe 7	38%	62%	28%	72%
Stufe 8 (höchstes Preisniveau)	20%	80%	10%	90%

Quelle: Eigene Abschätzung, Öko-Institut / GGR

Dass der Mehrfamilienhausanteil mit dem Bodenpreisniveau steigt, ist empirisch gut belegt und unter anderem in Abbildung 50 auf Basis von Zahlen vom Statistischen Bundesamt (Destatis 2022) anschaulich dargestellt. Die Differenz zwischen den Gebäudeerrichtungen in der Außen- bzw. der Innenentwicklung hingegen ist aus Mangel an dezidierten Quellen zu dem Thema abgeschätzt.

Abbildung 50: Zusammenhang zwischen dem Bodenpreis und der Anzahl an Wohnungen in Neubauten



Quelle: eigene Darstellung, GGR auf Basis von Destatis (2022)

7.2.3 Bestimmung der Treibhausgasemissionen pro m² Gebäudegeschossfläche

Die Treibhausgasemissionen pro m² Geschossfläche sind mithilfe einer Literaturrecherche bestimmt. Ökobilanzbasierte Studien aus dem deutschsprachigen Raum, die vor weniger als 20 Jahre erstellt wurden, die die Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von Gebäuden untersuchen und einen Vergleich von Mehrfamilienhäusern und Einfamilienhäusern umfassen, sind für die Zusammenstellung ausgewählt. Die Tabelle stellt ganz unten auch die publizierten bzw. in den Studien enthaltenen Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter dar. Eine Umlegung der Errichtungs-bedingten Emissionen auf den Gebäudelebenszyklus ist nicht vorgenommen.

Tabelle 35: Methodische Randbedingungen und Treibhausgasemissionen für die Errichtung von Gebäuden ausgewählter Literaturstudien

	Nemry et al. (2008)	Hafner et al. (2017)	Mair am Tinkhof et al. (2017)	Pohl (2018)	Mahler et al. (2019a & 2019b)
Referenzjahr	2006	2009 bzw. 2011	2013 bzw. 2015	Ca. 2010 bis 2015	Ca. 2015
Geographischer Raum	Mitteleuropa	DE	AT	DE	DE

	Nemry et al. (2008)	Hafner et al. (2017)	Mair am Tinkhof et al. (2017)	Pohl (2018)	Mahler et al. (2019a & 2019b)
Repräsentativität	Modellierung charakteristischer Gebäudetypen	Marktrepräsentative Gebäude (mineralisch / Holz)	möglichst repräsentative Gebäude	Typengebäude nach ARGE e.V.	repräsentativ für ca. 20%
Datenbank	Gabi 4	Ökobaudat 2015	Baubook, EPD, ecoinvent	Ökobaudat 2018	Ökobaudat 2015, EPD
Betrachtungszeitraum [a]	40	50	100	50	50
Gebäude	EFH: 1-2VG MFH: 4 VG	EFH: 2-3 VG MFH: 3-8 VG		EFH: 2 VG MFH: 4,5 VG	EFH: 2,5 VG MFH: 4,5 VG
NRF [m ²]	EFH: 157 MFH: 1 336	EFH: 153 MFH: 1 768	EFH: 137 MFH: 1 565	EFH: 274 MFH: 1 091	EFH: 135 MFH: 1 731
GWP [kg CO ₂ e/m ²]	EFH: 600 MFH: 320	EFH: 350 MFH: 275	EFH: 1 000 MFH: 750	EFH: 450 MFH: 400	EFH: 550 MFH: 650

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR, auf Basis der genannten Quellen

In vier von fünf Studien sind die Errichtungs-bedingten Emissionen pro Quadratmeter bei Mehrfamilienhäusern niedriger als bei Einfamilienhäusern. Die relativen Einsparungen von Mehrfamilienhäusern liegen zwischen -10 % und -45 %. Lediglich die Publikationen von Mahler et al. (2019 a und 2019 b) stellen höhere Emissionen für Mehrfamilienhäuser dar. Auf Nachfragen des Projektteams erklärten die Autoren das Ergebnis u. a. dadurch, dass das modellierte Einfamilienhaus keinen Keller umfasst, dass das Dach beim Einfamilienhaus in Holzbauweise und beim Mehrfamilienhaus in Stahlbetonbauweise realisiert ist und dass die Außenwände beim Einfamilienhaus schmaler als beim Mehrfamilienhaus sind.

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter wird das arithmetische Mittel aus den 5 oben genannten Studien gewählt, d. h. aufgrund der plausiblen Argumente umfasst das arithmetische Mittel auch die Publikationen von Mahler et al. (2019 a und 2019 b) mit dem kontraintuitiven Ergebnis. Pro Quadratmeter werden für Einfamilienhäuser 590 kg CO₂-Äquivalente, für Mehrfamilienhäuser 480 kg CO₂-Äquivalente angesetzt.

Die Emissionen werden vollständig im Jahr der Nutzungsänderung verbucht. Im Standardfall wird ein starres Hintergrundsystem angesetzt, d. h. die Emissionsfaktoren von 590 bzw. 480 kg CO₂-Äquivalente pro m² gelten unabhängig davon, wann die Nutzungsänderung stattfindet.

7.3 Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden

Im Fokus des vorliegenden Projekts stehen die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen von Flächenneuanspruchnahme. Darüber hinaus werden die mit der Errichtung von Infrastruktur und Gebäuden verbundenen Treibhausgaswirkungen in einem nachrangigen aber soliden Detailgrad untersucht. Die mit der Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden verbundenen Treibhausgaswirkungen werden lediglich qualitativ bzw. in Form eines Exkurses untersucht.

7.3.1 Nutzung von Infrastruktur

Eine Abschätzung der mit der Nutzung der neu errichteten Infrastruktur verbundenen Emissionen wird nicht vorgenommen. Hierzu müssten Annahmen zur räumlichen Lage der Flächen getroffen werden, zum Nutzungsgrad, zu Verkehrsverschiebungen, usw.

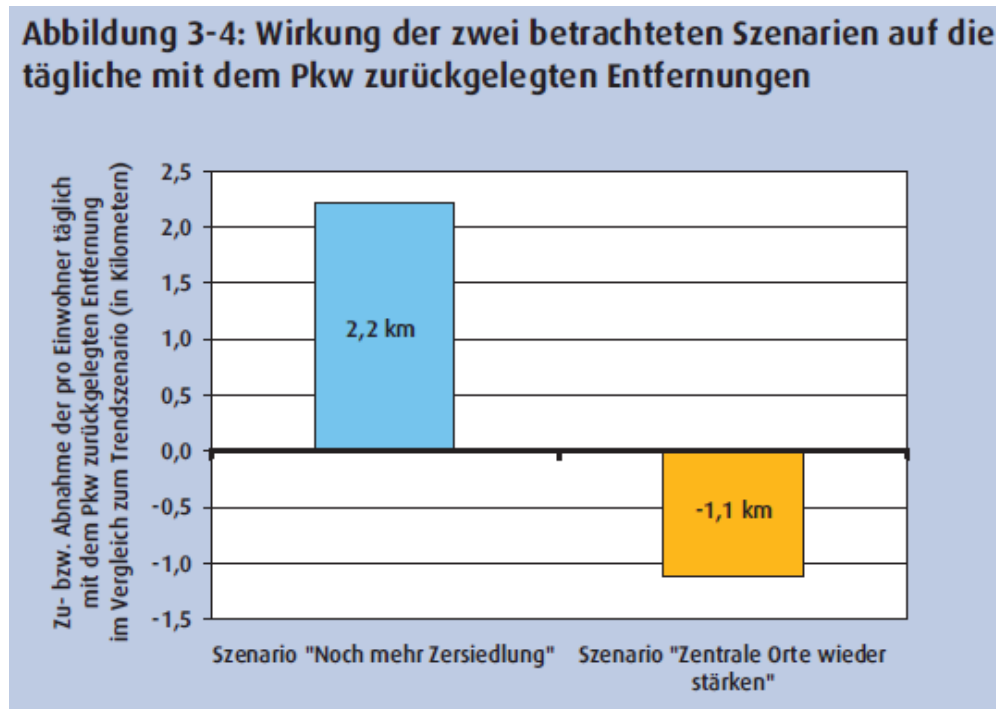
Dennoch wird eine Abschätzung der Einsparpotenziale vorgenommen, die sich durch eine reduzierte Außenentwicklung und eine verstärkte Innenentwicklung erschließen lassen. Mit Gutsche (2003) und Gutsche et al. (2007) liegen Studien vor, die die Verkehrsleistung unterschiedlicher Siedlungsentwicklungsszenarien (Gutsche et al. 2007) bzw. die Verkehrsleistung von Personen, die neu gebaute Wohnungen in unterschiedlichen Lagen beziehen (Gutsche 2003), untersuchen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Abbildung 51. Auf Basis dieser Untersuchungen wird in grober Vereinfachung angesetzt, dass pro Person, für die eine Wohnung nicht in der Außenentwicklung, sondern in der Innenentwicklung realisiert wird, täglich 2 Personenkilometer Verkehrsleistung eingespart werden. Bei einer durchschnittlichen Wohnfläche von 47 m² pro Person (UBA 2023b) und einem Emissionsfaktor von 80 g CO₂-Äq. pro Personenkilometer, der grob die Elektrifizierung des Verkehrs bis 2050 und einen Modal Split mit Dominanz des Motorisierten Individualverkehrs repräsentieren soll, ergeben sich etwa 35.000 t CO₂-Äq., die pro Jahr hinsichtlich der Nutzung der Infrastruktur eingespart werden können. Die Einsparpotenziale werden kontinuierlich und im Betrachtungszeitraum unbegrenzt jährlich verbucht, sodass eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme im Jahr 2025 im Betrachtungszeitraum bis 2050 25 mal 35.000 t CO₂-Äq. einspart, eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme im Jahr 2026 im Betrachtungszeitraum bis 2050 24 mal 35.000 t CO₂-Äq. einspart, usw.

Abbildung 51: Täglicher MIV-Aufwand in Personenkilometern von Bewohnerinnen und Bewohnern neu gebauter Wohnungen und Wohngebiete im Großraum Hamburg

ÖPNV-Intervall 1	Standortindikator „Nahraum“ (Intervall)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
„Regionale Lage“ (Intervall)	1	28,3	27,8	27,5	27,3	27,0	26,7	26,1	25,4	24,8	24,0
	2	27,7	27,5	27,2	27,0	26,8	26,5	26,0	25,4	24,7	24,0
	3	27,2	26,9	26,7	26,5	26,4	26,3	25,9	25,3	24,7	23,9
	4	26,3	26,1	25,9	25,9	25,9	25,8	25,7	25,2	24,6	23,8
	5	25,4	25,4	25,3	25,1	25,1	24,9	24,9	24,9	24,4	23,6
	6	24,4	24,2	24,2	23,8	23,8	23,8	23,5	23,5	23,4	23,2
	7	21,9	21,8	21,7	21,6	21,5	21,4	21,3	21,2	21,0	21,0
	8	19,0	18,7	18,7	18,7	18,7	18,6	18,4	18,4	18,2	18,2
	9	17,1	16,8	16,5	16,3	16,2	16,2	16,1	16,0	15,9	15,9
	10	15,9	15,6	15,3	15,0	14,8	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5

Quelle: Gutsche et al. (2007)

Abbildung 52: Reduktion der Verkehrsleistung durch unterschiedliche Siedlungsentwicklungen, Beispiel Hannover



Quelle: Gutsche et al. (2007)

7.3.2 Nutzung von Gebäuden

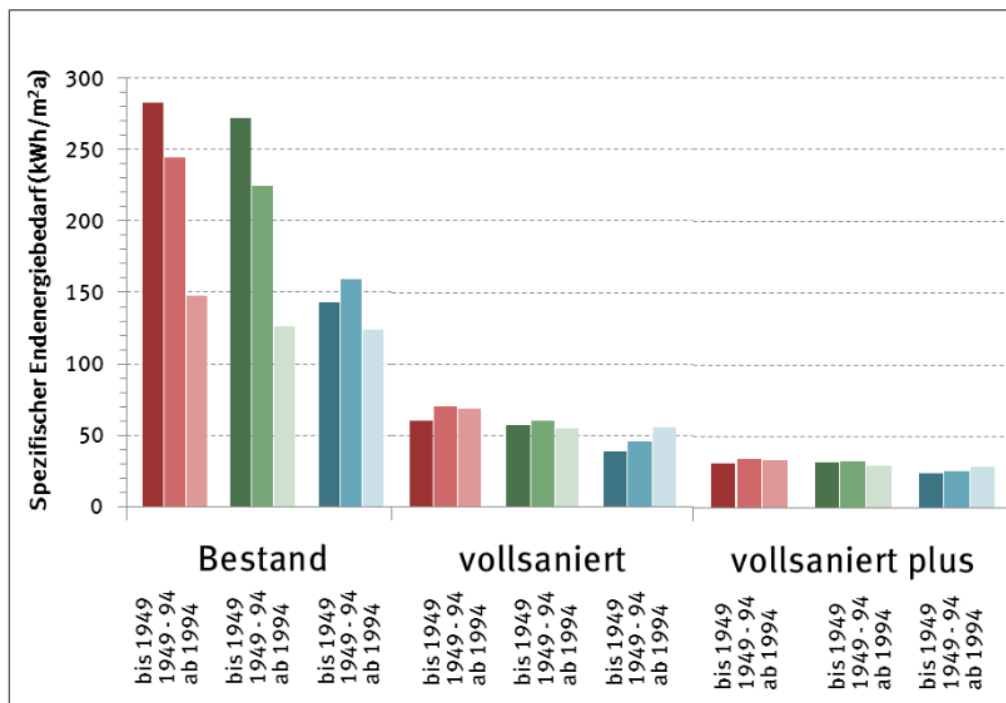
Die Emissionen aus der Nutzung der Gebäude wurden wie folgt abgeschätzt: Die Gesamtanzahl der jährlich neu geschaffenen Quadratmeter Geschossfläche im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ (55 Hektar pro Tag) lässt sich dem LULUCF-Modell entnehmen. Sie beträgt etwa 35 Mio. m² Geschossfläche. Darüber hinaus wurde angesetzt, dass 85 % der Geschossfläche beheizt ist, dass der Energieverbrauch im Neubau 45 kWh pro Quadratmeter und Jahr beträgt und ein Emissionsfaktor von 200 g CO₂-Äq. im Jahr 2025 anzusetzen ist, der bis zum Jahr 2050 linear auf 70 g CO₂-Äq. sinkt. Diese Kennwerte sind grobe Schätzungen. Detaillierte Untersuchungen zu dem Thema liegen beispielsweise in Veit et al. (2017) vor. Analog zur Nutzung von Infrastruktur werden diese Emissionen kontinuierlich und im Betrachtungszeitraum unbegrenzt jährlich verbucht. Gewerbebauten sind analog zur Herangehensweise hinsichtlich der Errichtung von Gebäuden nicht Teil der Betrachtung, da die Einsparpotenziale aufgrund von kompakterer Bauweise usw. bezüglich Gewerbebauten als unsicher und tendenziell sehr gering eingeschätzt werden. Auch hinsichtlich der Beleuchtung, der Bereitstellung von Trinkwarmwasser, usw. wird kein Unterschied quantifiziert, da dem vorliegenden Projekt stets die Annahme zugrunde liegt, dass jeder Quadratmeter Geschossfläche, der in der Außenentwicklung vermieden wird, stattdessen in der Innenentwicklung realisiert wird und in der Innenentwicklung keine geringeren Energieverbräuche pro m² für Beleuchtung oder Trinkwarmwasser erwartet werden.

Das Einsparpotenzial durch eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme und eine verstärkte Innenentwicklung wird hinsichtlich des kontinuierlichen Heizwärmebedarfs pro Quadratmeter pauschal mit 5 % abgeschätzt. Bezogen auf einen zu beheizenden Quadratmeter sind im Neubau die Unterschiede zwischen kompakteren Gebäuden (Innenentwicklung) und weniger kompakten Gebäuden (Außenentwicklung) gering bis inexistent (siehe Abbildung 53)

und werden in der Praxis voraussichtlich durch das individuelle Nutzungsverhalten deutlich überprägt.

Abbildung 53: Vergleich der Energieeffizienz unterschiedlicher Gebäudetypen

Abbildung 12: Endenergiebedarf Heizwärme und TWW mit Brennwertkessel als Versorgungstechnik; bei den Wärmeschutzstandards „vollsaniiert“ und „vollsaniiert plus“ jeweils mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, ohne solarthermische Unterstützung



Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

Quelle: Veit et al. (2017)

8 Quellenverzeichnis

- Blum, A.; M. Atci, M.; Roscher, J.; Henger, R.; Schuster, F. (2022): Bauland- und Innenentwicklungspotenziale in deutschen Städten und Gemeinden. In: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) [Hrsg.]: BBSR-Online-Publikation 11/2022, Bonn. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-11-2022.html> (03.07.2024)
- Buchert, M.; Sutter, J.; Wagner, T.; Fischer, H.; Ruther-Mehlis, A. (2023): Ökologische Auswirkungen integrierter Innenentwicklungskonzepte auf die Infrastrukturen urbaner Wachstumsregionen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023-07-18_texte_68-2023_oekologische_auswirkungen_integrierter_0.pdf (03.07.2024)
- Buchert, M.; Sutter, J.; Wagner, T. (2022): Ermittlung von Kennwerten für die Berechnung von Treibhausgasemissionen beim Bau von Straßen. Dokumentation (Entwurf). Studie des Öko-Instituts im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr.
- BKG – Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (2022): Verwaltungsgebiete 1:5 000 000, Stand 31.12.2021 (VG5000 31.12.), verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete/verwaltungsgebiete-1-5-000-000-stand-31-12-vg5000-12-31.html> bzw. https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/vg/vg5000_1231/ (22.09.2025)
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2023): Schutzgebiete. Geodaten des BfN, bereitgestellt als WFS-Dienst unter <https://geodienste.bfn.de/ogc/wfs/schutzgebiet>. Verwendeter Datenstand: 2023; unter dem genannten WFS-Dienst werden durch das BfN inzwischen partiell aktualisierte Daten bereitgestellt.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021): Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR), <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html> (01.03.2023)
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2023): Baufertigstellungen im Hochbau: Deutschland, Jahre, Bautätigkeiten, Gebäudeart (Tabelle 31121-0001). Zeitraum 2017 bis 2021, Abruf 2023. Aktuelle Fassung kann heruntergeladen werden unter <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/31121-0001> (22.09.2025)
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2022): Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen u. a. nach Gebäudeart. Lange Reihen z. T. ab 1960. 2021. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publicationen/Downloads-Bautaetigkeit/baugenehmigungen-gebaeudeart-pdf-5311102.pdf> (15.09.2025)
- Drexler, S.; Gensior, A.; Don, A. (2021): Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. In: Springer [Hrsg.]: Regional Environmental Change, Volume 21, article number 74. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10113-021-01798-8.pdf> (03.07.2024)
- Ecoinvent (2023): ecoinvent v3.10 - ecoinvent database. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-10/> (03.07.2024)
- Eichhorn, S. (2023): Infilling in Germany. Estimating the extent of infilling in German municipalities between 1979 and 2011. In: Landscape and Urban Planning Volume 240, 2023, Elsevier Ltd, article 104895. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104895> (03.07.2024)
- Eichhorn, S.; Siedentop, S. (2022): Innen vor Außen? Eine Schätzung der Innenentwicklung nordrhein-westfälischen Gemeinden, 1979 bis 2011. In: Raumforschung und Raumordnung. Spatial research and planning [Hrsg.]: Bd. 80 Nr. 6 (2022), oekom – Gesellschaft für ökologische Kommunikation mit beschränkter Haftung, München. <https://rur.oekom.de/index.php/rur/article/view/178> (16.09.2025)
- Flessa, H.; Don, A.; Jacobs, A.; Dechow, R.; Tiemeyer, B.; Poeplau, C. (2019): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands - Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Bundesministerium für

Ernährung und Landwirtschaft (Hg.), Bonn.

https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf (02.07.2024)

Geobasis NRW (DOP): Digitale Orthophotos für Nordrhein-Westfalen. <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/luftbild-und-satellitenbildinformationen/aktuelle-luftbild-und-0> (05.09.2025)

Grade, J. (2023): Wohnungsleerstände zwischen Stadt und Land. https://www.empirica-regio.de/blog/230731_leerstand_wohnungsmarkt/ (03.07.2024)

Gutsche, J.-M.; Bohnet, M.; Menze, A.; Weiner, T. (2008): Auf den Standort kommt es an - Auswirkungen von kommunalen und privaten Planungsentscheidungen auf den Verkehr. In: Region Hannover [Hrsg.]: Beiträge zur regionalen Entwicklung, Nr. 111.

Gutsche, J.-M. (2003): Verkehrserzeugung potenzieller Standorte für neue Wohngebiete im Großraum Hamburg. In: Technische Universität Hamburg-Harburg, European Centre for Transportation and Logistics, Arbeitsbereich Verkehrssysteme und Logistik [Hrsg.]: ECTL Working Paper, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Technische Universität Hamburg, München, Band 23. https://media.tuhh.de/w8/ectl-wp/TUHH_W8_ECTL-Working-Paper-23_GESAMT_Gutsche.pdf (04.07.2024)

Hafner A.; Rüter S.; Ebert S.; Schäfer S.; König, H.; Cristofaro L.; Diederichs; S.; Kleinhenz, M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Ruhr-Universität Bochum, Bochum. https://www.ruhr-uni-bochum.de/reb/mam/content/thg_bericht-final.pdf (03.07.2024)

Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2023): 3D-Gebäudemodelle. Dreidimensionale Gebäudeinformationen: <https://hvbg.hessen.de/landesvermessung/geotopographie/3d-daten/3d-gebaeudemodelle> (09.09.2025)

Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.-M.; Collins, W.; Fuglestvedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J.-F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G.; Takemura, T.; Zhang, H. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf (28.05.2025)

IÖR – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2023): Sonderauswertung aus dem IÖR-Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung im Auftrag des Büros Gertz Gutsche Rümenapp

Kändler, G.; Adler, P.; Hellbach, A. (2011): Konzept zur Erfassung der Kohlenstoff-Speicherleistung von Stadtbäumen am Beispiel der Stadt Karlsruhe. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg Abt. Biometrie und Informatik, Freiburg. https://www.researchgate.net/publication/285375225_Wie_viel_Kohlenstoff_speichern_Stadtbaume_Eine_Faellstudie_am_Beispiel_der_Stadt_Karlsruhe (03.07.2024)

Krüger, T.; Schorcht, M.; Hartmann, A. (2019): Entwicklung der Nutzungsintensität baulich geprägter Siedlungsflächen in Deutschland. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. [Hrsg.]: IÖR-Schriften 77, Flächennutzungsmonitoring XI. Flächenmanagement – Bodenversiegelung – Stadtgrün, Rhombos-Verlag, Berlin, S. 199-208. <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A72287/attachment/ATT-0/> (15.09.2025)

LGLN - Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (2023): 3D-Gebäudemodelle (LoD1 und LoD2): https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten/karten/3d_geobasisdaten/3d_gebaudemodelle/3d-gebaeudemodelle-142891.html (01.03.2023)

Mahler, B.; Idler, S.; Gantner, J. (2019a): Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP und Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart.

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.pdf;jsessionid=DF5FDD09664B10A1415F076CC5DF7A34.live21323?_blob=publicationFile&v=1 (09.09.2025)

Mahler, B.; Idler, S.; Nusser, T.; Gantner, J. (2019b): Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus. Umweltbundesamt, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP und Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3715_41_111_energieaufwand_gebaeudekonzepte_bf.pdf (03.07.2024)

Mair am Tinkhof, O.; Strasser, H.; Prinz, T.; Herbst, S.; Schuster, M.; Tomschy, R.; Figl, H.; Fellner, M.; Ploß, M.; Roßkopf, T. (2017): Richt- und Zielwerte für Siedlungen zur integralen Bewertung der Klimaverträglichkeit von Gebäuden und Mobilitätsinfrastruktur in Neubausiedlungen. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie [Hrsg.]: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 39/2017, Wien, Salzburg, Dornbirn.

https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe_2017-39_richt-zielwerte-siedlungen.pdf (03.07.2024)

mundialis (2023): Oberflächenklassifizierung von etwa 2.000 ha Siedlungs- und Verkehrsfläche im Auftrag des Öko-Instituts sowie des Büros Gertz Gutsche Rümenapp

Müller-Herbers, S.; Rendant, C.; Meißner, S.; Jäger, M.; Kahl, A.; Gutsche, J. M. (2019): Evaluierung der Innenentwicklungsaktivitäten in der Interkommunalen Allianz Oberes Werntal. Ländliche Entwicklung Bayern und Interkommunale Allianz Oberes Werntal, München, Euerbach. https://oberes-werntal.de/fileadmin/media/dokumente/03-wohnen/04-bauen/09-film-zur-innenentwicklung/Abschlussbericht_Evaluierung_Innenentwicklungsaktivitaten_Allianz_OberesWerntal.pdf (03.07.2024)

Nemry, F.; Uihlein, A.; Colodel, C. M.; Wittstock, B.; Braune, A.; Wetzel, C.; Hasan, I.; Niemeier, S.; Frech, Y.; Kreißig, J.; Gallon, N. (2008): Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building). Joint Research Centre und Institute for Prospective Technological Studies, Luxemburg.

<https://data.europa.eu/doi/10.2791/38942> (04.07.2024)

Oles, B.; Bußfeld, C.; Don, A.; Rensner, S.; Freibauer, A. (2015): Optimierung von ökologischen Entwicklungsmaßnahmen hinsichtlich der Treibhausgasbindung/-freisetzung und Überprüfung von Möglichkeiten zur Implementierung in Bewertungssystematiken der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung. Uventus und Thünen-Institut, Gladbeck, Braunschweig. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-28479.pdf> (03.07.2024)

OpenStreetMap und Mitwirkende (2023): Gebäudedatensatz der OpenStreetMap-Geodaten, extrahiert aus dem Open-StreetMap-Gesamtdatensatz für Deutschland, Stand 3/2023. Die aktuelle Fassung des Open-StreetMap-Gesamtdatensatz für Deutschland kann z. B. heruntergeladen werden über

<https://download.geofabrik.de/europe/germany.html> (22.09.2025)

Osterhage, F.; Milde, Th.; Rönsch, J. (2022): Siedlungsflächenmonitoring Nordrhein-Westfalen - Ergebnisbericht, Erhebung der Siedlungsflächenreserven 2020. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf.

https://landesplanung.nrw.de/system/files/media/document/file/sfm_nrw_ergebnisbericht2020.pdf (03.07.2024)

Pohl, S. (2018): CO₂-Tonnagen und Wärmespeichereffekte über den Lebenszyklus von Gebäuden. Kurzstudie. Im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. Darmstadt. https://www.klb-klimaleichtblock.de/files/documents/Broschueren/2019/LCEE%20Kurzstudie%20CO2%20+%20W%C3%A4rmespeicher-SP_Rev%20n.%20Verifizierung%20C%2005-2018.PDF (04.04.2024)

Regionalstatistik der Statistikämter des Bundes und der Länder (2023): Fertigstellungen neuer Wohngebäude und Wohnungen in Wohngebäuden nach Zahl der Wohnungen - Jahressumme - regionale Tiefe: Gemeinden (Tabelle 31121-01-02-5). Zeitraum 2017 bis 2021, Abruf 2023. Aktuelle Fassung kann heruntergeladen werden unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis//online?operation=table&code=31121-01-02-5&bypass=true&levelindex=1&levelid=1758283558591#abreadcrumb> (22.09.2025)

Rötzer, T.; Rahman, M. A.; Moser-Reischl, A.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2019): Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. In: Science of The Total Environment, Volume 676, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235> (03.07.2024)

Tegetmeyer, C.; Barthelmes, K.-D.; Busse, S.; Barthelmes, A. (2021) Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. 2., überarbeitete Fassung. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/2021 (Selbstverlag, ISSN 2627-910X). https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf (16.09.2025)

Tiemeyer, B.; Freibauer, A.; Borrazb, E. A.; Augustinb, J.; Bechtold, M.; Beetz, S.; Beyer, C.; Ebli, M.; Eickenscheidt, T.; Fiedler, S.; Förster, C.; Gensior, A., et al. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. In: Ecological Indicators, Volume 109, Elsevier Ltd, Article 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838> (03.07.2024)

UBA – Umweltbundesamt (2023a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2021. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf (02.07.2024)

UBA – Umweltbundesamt (2023b): Wohnfläche. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#zahl-der-wohnungen-gestiegen> (04.07.2024)

UBA – Umweltbundesamt (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-05-31_climate-change_24-2022_nir-2022_de.pdf (03.07.2024)

Veit, B.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.; Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050, Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Umweltbundesamt und Öko-Institut e.V., Dessau-Roßlau, Freiburg. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf (04.07.2024)

Wagner, T.; Hennenberg, K.; Gutsche, J.-M. (2025): Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland. Ergebnisband. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ: 3721 15 103 0.

Wittnebel, M.; Frank, S.; Tiemeyer, B. (2023): Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland. Thünen-Institut für Agrarklimaschutz. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066303.pdf (02.07.2024)