

TEXTE

38/2019

Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Abschlussbericht

TEXTE 38/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3713 43 250
FB000064

Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Abschlussbericht

von

Dr. Lina Neunhäuserer, Volker Diegmann, Florian Pfäfflin, Dr. Rainer Stern
IVU Umwelt GmbH, Freiburg

Dr. Jörg Lange
solares bauen GmbH, Freiburg

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

IVU Umwelt GmbH
Emmy-Noether-Straße 2
79110 Freiburg

solares bauen GmbH
Emmy-Noether-Straße 2
79110 Freiburg

Abschlussdatum:

April 2018

Redaktion:

Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung
Frank Hoffmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2019

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

Kurzbeschreibung

Ziel des Projektes war es, die Auswirkungen des Einsatzes von BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ („Mini-BHKW“) auf die Luftqualität in Ballungsräumen abzuschätzen. Dazu wurden im ersten Schritt aus Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten die BHKW-bedingten Emissionsänderungen für die Luftschadstoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 und NMVOC für das Zieljahr 2020 berechnet, und zwar auf nationaler Ebene für Deutschland und auf lokaler Ebene für drei städtische Modellgebiete (Berlin, Bremen, Köln). Dabei wurden verschiedene Szenarien für das Zieljahr 2020 betrachtet, die u. a. unterschiedlich hohe Substitutionsgrade (Zubau von BHKW) mit unterschiedlich hohen Emissionsfaktoren kombinieren. Im zweiten Schritt wurde für die berechneten Emissionsszenarien die aus dem Einsatz von Mini-BHKW resultierende Immissionsänderung sowohl auf nationaler als auch auf lokaler Ebene modelliert. Auf nationaler Ebene wurde dazu das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG) eingesetzt, auf lokaler Ebene das Lagrange'sche Partikelmodell LASAT. Zur Bewertung der erzielten Ergebnisse wurde die Wahrscheinlichkeit der zugrunde gelegten Szenarien in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht diskutiert.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass auf nationaler Ebene die durch den Einsatz von Mini-BHKW bedingten Emissions- und Immissionsänderungen vernachlässigbar klein sind, auch im Hinblick auf die von der 39. BImSchV für Deutschland vorgegebenen Emissionshöchstmengen. Auf der lokalen Ebene können für hohe Substitutionsgrade mit Mini-BHKW für NO_2 durchaus BHKW-bedingte Immissionsänderungen auftreten, die wesentlich zu einer Überschreitung der in der 39. BImSchV vorgegebenen Grenzwerte beitragen. Unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird jedoch davon ausgegangen, dass bis 2020 ein niedriger Substitutionsgrad mit Mini-BHKW sehr viel wahrscheinlicher ist. In diesem Fall ist kein relevanter Beitrag der Mini-BHKW zur NO_2 -Gesamtbelastung auf lokaler Ebene zu erwarten. Für PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ sind durch den Einsatz von Mini-BHKW ausschließlich Minderbelastungen zu erwarten.

Abstract

The aim of the project was to assess the effects of using CHPs $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ („Mini-CHP“) on air quality in urban agglomerations. In the first step, emission changes due to the use of Mini-CHPs were calculated for the air pollutants NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 and NMVOC in the reference year 2020. The calculations were based on emission factors and activity rates. They were carried out on the national scale for Germany and on the local scale for three urban modelling areas (Berlin, Bremen, Köln). Several scenarios were considered for the reference year 2020, combining i. a. differing levels of substitution (number of installed CHPs) with differing emission factors. In the second step, concentration changes due to the use of Mini-CHPs were modelled based on the emission scenarios, both on the national and the local scale. On the national scale, the chemical transport model REM-CALGRID (RCG) was used while on the local scale the Lagrangian particle model LASAT was used. To evaluate the modelled results, the likelihood of the considered scenarios was discussed with respect to technological and economical aspects.

The results show on the national scale negligibly small changes in emissions and concentrations due to the use of Mini-CHPs. This also is the case if the emission changes are compared with the national emission ceilings given for Germany by EU Directive 2001/81/EC. On the local scale, a high level of CHP substitution may result in NO_2 concentration changes that can contribute substantially to limit value exceedances according to EU Directive 2008/50/EC. However, with the economical conditions given it is assumed that up to 2020 a low level of CHP substitution is much more likely than a high level. In this case, no relevant contribution of Mini-CHPs to the NO_2 pollutant load is expected on the local scale. For PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, the use of Mini-CHPs solely leads to reductions of pollutant loads.

Danksagung

Herzlich gedankt sei

- der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin,
- dem Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen und
- dem Umwelt- und Verbraucherschutzamt der Stadt Köln

für die Freigabe und Bereitstellung ihrer Daten für das hier beschriebene Projekt und die gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	17
Abkürzungen.....	23
1 Zusammenfassung	25
2 Summary	40
3 Einführung und Aufgabenstellung	55
4 Vorgehensweise.....	57
5 Nationale Emissionsszenarien	61
5.1 Allgemeines	61
5.2 Berechnung der im Jahr 2020 erzeugten Strom- und Wärmemengen	62
5.2.1 Grundlagen	62
5.2.2 Ergebnisse Minimalszenario	63
5.2.3 Ergebnisse Maximalszenario	71
5.2.4 Zusammenstellung der Strom- und Wärmemengen	81
5.3 Berechnung der Emissionen im Jahr 2020	81
5.3.1 BHKW-Emissionen	81
5.3.2 Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung	84
5.3.3 Vermiedene Emissionen der Wärmeerzeugung	84
5.3.4 Zusammenstellung der Emissionsszenarien im Jahr 2020	87
5.4 Downscaling	96
5.4.1 Vorgehensweise.....	96
5.4.2 Verteilung der Mini-BHKW in Deutschland bis 2013	96
5.4.3 Prognose der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW in Deutschland im Jahr 2020	122
5.4.4 Downscaling der Prognose 2020 auf Modellgebietsebene	135
6 Lokale Emissionsberechnung.....	139
6.1 Auswahl der Modellgebiete	139
6.1.1 Allgemeines.....	139
6.1.2 Modellgebiet für niedrige Windgeschwindigkeiten: Berlin	140
6.1.3 Modellgebiet für hohe Windgeschwindigkeiten: Bremen	143
6.1.4 Modellgebiet für mittlere Windgeschwindigkeiten: Köln	145
6.2 Aufbereitung der Bebauungsdaten für die Modellgebiete	147
6.3 Meteorologische Daten.....	152
6.4 Berechnung des Wärmebedarfs in den Modellgebieten	155

6.4.1	Methodik.....	155
6.4.2	Ergebnisse.....	157
6.5	Berechnung der BHKW-bedingten Emissionsänderungen in den Modellgebieten	158
6.5.1	Vorgehensweise.....	158
6.5.2	BHKW-Emissionen	160
6.5.3	Emissionen der Spitzenlastkessel	162
6.5.4	Vermiedene Emissionen	164
6.5.5	Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau	167
6.6	Abschätzung des Anteils der direkten NO ₂ -Emissionen.....	171
6.7	Erstellung von Jahresganglinien für die BHKW-Emissionen.....	171
6.7.1	Methodik.....	171
6.7.2	Ergebnisse.....	172
6.7.3	Vergleich mit den Ergebnissen einer thermischen Simulation.....	176
6.8	Berechnung von typischen Straßenverkehrsemissionen für die Modellgebiete	184
7	Immissionsmodellierung auf nationaler Ebene	185
7.1	Verwendeter Modellansatz.....	185
7.2	Verortung und Verteilung der Emissionen in Deutschland.....	187
7.2.1	Emissionen Basisszenario APS 2020	187
7.2.2	BHKW-Emissionen	188
7.2.3	Einarbeitung der BHKW-Szenarien in die Emissionsdatenbasis APS2020.....	193
7.3	Ergebnis der Immissionsmodellierung	194
8	Immissionsmodellierung auf lokaler Ebene.....	209
8.1	Vorgehensweise Modellierung	209
8.1.1	Windfeldmodellierung mit MISKAM.....	209
8.1.2	Ausbreitungsmodellierung mit LASAT	210
8.2	Verortung und Verteilung der Emissionen in den Modellgebieten	211
8.3	Definition der Auswertungsflächen	216
8.3.1	Bestimmung des Flächenmittels.....	216
8.3.2	Methodik zur Festlegung der maximal beaufschlagten Fläche (MBF)	220
8.4	Einfluss der Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets auf das Untersuchungsgebiet	224
8.5	Abschätzung des Beitrags der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau.....	234
8.5.1	Allgemeines.....	234
8.5.2	Ausbreitungsrechnungen mit LASAT	235

8.5.3	Ausbreitungsrechnungen mit RCG.....	235
8.5.4	Vergleich und Bewertung der Ergebnisse.....	237
8.6	Berechnung der durch BHKW verursachten Immissionsänderung für PM10, PM2.5 und NO _x	240
8.6.1	Methodik.....	240
8.6.2	Ergebnisse und Vergleich mit der durch Kfz verursachten Zusatzbelastung.....	241
8.7	Berechnung der durch BHKW verursachten Immissionsänderung für NO ₂	250
8.7.1	Allgemeines.....	250
8.7.2	Berechnung der NO _x -Gesamtbelastung	250
8.7.3	Reaktionsmechanismus zur Berechnung der NO ₂ -Gesamtbelastung	253
8.7.4	Modellkonzept zur NO ₂ -Berechnung	257
8.7.5	Ergebnisse	261
9	Beurteilung und Bewertung des BHKW-Einsatzes.....	266
9.1	Variation der Emissionsszenarien	266
9.2	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	267
9.2.1	Allgemeines.....	267
9.2.2	NO _x -Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau	268
9.2.3	NO ₂ -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau	274
9.2.4	NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau.....	279
9.2.5	PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau	284
9.3	Diskussion der Wahrscheinlichkeit der Szenarien	289
9.3.1	Allgemeines.....	289
9.3.2	Substitutionsgrade (Zubau von BHKW-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 50 kW bis 2020)	289
9.3.3	Emissionsfaktoren.....	291
9.3.4	Nationale und lokale Szenarien	294
9.4	Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf Luftqualitätsziele.....	295
10	Quellenverzeichnis.....	298

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Übersicht über die Emissionsszenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene.....	29
Abbildung 4-1:	Belastungsregime im urbanen Raum nach Lenschow et al. (2001).....	58
Abbildung 5-1:	Minimalszenario, Anzahl der zugebauten Mini-BHKW pro Jahr (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	65
Abbildung 5-2:	Minimalszenario, Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten).....	66
Abbildung 5-3:	Minimalszenario, durch zugebaute BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	69
Abbildung 5-4:	Minimalszenario, durch installierte BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	70
Abbildung 5-5:	Maximalszenario, Anzahl der zugebauten Mini-BHKW pro Jahr (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	74
Abbildung 5-6:	Maximalszenario, Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten).....	75
Abbildung 5-7:	Maximalszenario, durch zugebaute BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	79
Abbildung 5-8:	Maximalszenario, durch installierte BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)	80
Abbildung 5-9:	NO _x -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020	88
Abbildung 5-10:	SO ₂ -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020	89
Abbildung 5-11:	PM ₁₀ -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020	89
Abbildung 5-12:	PM _{2.5} -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020	90
Abbildung 5-13:	NM _{VOC} -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020	90
Abbildung 5-14:	NO _x -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020.....	92
Abbildung 5-15:	SO ₂ -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020.....	93
Abbildung 5-16:	PM ₁₀ -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020.....	93

Abbildung 5-17:	PM2.5-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020.....	94
Abbildung 5-18:	NM VOC-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Maximalszenario im Jahr 2020.....	94
Abbildung 5-19:	Anzahl der installierten BHKW < 2 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene.....	98
Abbildung 5-20:	Anzahl der installierten BHKW 2-10 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene	99
Abbildung 5-21:	Anzahl der installierten BHKW 10-20 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene	100
Abbildung 5-22:	Anzahl der installierten BHKW 20-50 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene	101
Abbildung 5-23:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene.....	102
Abbildung 5-24:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Berlin	103
Abbildung 5-25:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Bremen.....	104
Abbildung 5-26:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Köln	105
Abbildung 5-27:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene	107
Abbildung 5-28:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene	108
Abbildung 5-29:	Durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugte Strommenge im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene.....	109
Abbildung 5-30:	Durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugte Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene	110
Abbildung 5-31:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene.....	112
Abbildung 5-32:	Anteile der einzelnen BHKW-Leistungsklassen an der Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene	113
Abbildung 5-33:	Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} pro 10 000 Einwohner im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene	114
Abbildung 5-34:	Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene	115
Abbildung 5-35:	Durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugte Strommenge im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene	116
Abbildung 5-36:	Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugten Strommenge im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene.....	117
Abbildung 5-37:	Durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugte Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene	118
Abbildung 5-38:	Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der durch BHKW < 50 kW _{el} erzeugten Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene.....	119

Abbildung 5-39:	Entwicklung der installierten BHKW < 50 kW _{el} nach Bundesland, Anzahl (oben) und Anzahl pro 10 000 Einwohner (unten)	120
Abbildung 5-40:	Entwicklung der installierten BHKW < 50 kW _{el} nach Bundesland, erzeugte Strommenge (oben) und erzeugte Strommenge pro 10 000 Einwohner (unten).....	121
Abbildung 5-41:	Beispielhafte Darstellung der Lage von Postleitzahl-Grenzen, Gemeindegrenzen und Siedlungsflächen zueinander	123
Abbildung 5-42:	Anzahl installierte BHKW 2013 zu Wohnfläche, Leistungsklasse 10-20 kW (grüne Kreise) sowie lineares Modell (schwarze Linie)	130
Abbildung 5-43:	Zubau BHKW von 2012 nach 2013 zu Einwohnerzahl, Leistungsklasse < 2 kW (rote Kreise) sowie lineares Modell (schwarze Linie)	131
Abbildung 5-44:	Prognostizierte Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2020 auf PLZ-Ebene im Minimalszenario	133
Abbildung 5-45:	Prognostizierte Anzahl der installierten BHKW < 50 kW _{el} im Jahr 2020 auf PLZ-Ebene im Maximalszenario	134
Abbildung 5-46:	Übersicht über die Emissionsszenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene.....	138
Abbildung 6-1:	Lage der Messstation Karl-Marx-Straße und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets	142
Abbildung 6-2:	Lage der Messstation Bremen Verkehr 1 (Dobbenweg) und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets.....	144
Abbildung 6-3:	Lage der Messstation Clevischer Ring und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets	146
Abbildung 6-4:	Modellgebiet Berlin mit Grundriss und Höhe der Gebäude	149
Abbildung 6-5:	Modellgebiet Bremen mit Grundriss und Höhe der Gebäude	150
Abbildung 6-6:	Modellgebiet Köln mit Grundriss und Höhe der Gebäude	151
Abbildung 6-7:	Zeitreihe der Heizgradtage für die Modellgebiete 2000 – 2014 nach IWU (2017)	152
Abbildung 6-8:	Windrichtungsverteilung der Windgeschwindigkeiten (links) und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Ausbreitungsklassen (AKL, rechts). Die Zahlen am äußeren Rand der Windrichtungsverteilung geben die mittlere Windgeschwindigkeit der jeweiligen Windrichtung wieder. Oben: Berlin-Tempelhof. Mitte: Bremen. Unten: Köln-Bonn.....	154
Abbildung 6-9:	Beispiel für die Betriebsstunden (Bh) pro Tag eines typisch ausgelegten BHKWs, das etwa 70 % der Wärmemenge eines Gebäudes erzeugt.....	172
Abbildung 6-10:	Jahresganglinie für Modellgebiet Berlin gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten).....	173
Abbildung 6-11:	Jahresganglinie für Modellgebiet Bremen gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards	

	Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten).....	174
Abbildung 6-12:	Jahresganglinie für Modellgebiet Köln gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten).....	175
Abbildung 6-13:	Stündlicher Heizendenergiebedarf im Januar 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten des Nutzerverhaltens (oben: Mittelwert, unten: obere Abschätzung)	179
Abbildung 6-14:	Stündlicher Heizendenergiebedarf im März 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten des Nutzerverhaltens (Mittelwert).....	180
Abbildung 6-15:	Stündlicher Heizendenergiebedarf im Januar 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten der Verschattungssituation (Mittelwert).....	181
Abbildung 6-16:	Jahresganglinie der zwei Wärmeerzeuger (BHKW, Spitzenlastkessel) im Energiestandard „Mittelwert“ bei Verwendung der dynamischen Simulation (oben) und des Heizgradstunden-Verfahrens (Mitte) sowie Abweichung der Jahresganglinien des Heizgradstunden-Verfahren im Vergleich zur dynamischen Simulation (unten)	183
Abbildung 7-1:	Räumliche Verteilung der BHKW-NO _x -Emissionen in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene, Minimalszenario mit niedrigen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 3 und 4)	189
Abbildung 7-2:	Räumliche Verteilung der BHKW-NO _x -Emissionen in der Prognose 2020 im RCG-Gitter, Minimalszenario mit niedrigen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 3 und 4)	190
Abbildung 7-3:	Räumliche Verteilung der BHKW-NO _x -Emissionen in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene, Maximalszenario mit hohen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 5 und 6)	191
Abbildung 7-4:	Räumliche Verteilung der BHKW-NO _x -Emissionen in der Prognose 2020 im RCG-Gitter, Maximalszenario mit hohen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 5 und 6)	192
Abbildung 7-5:	Berechnete NO ₂ -Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Emissionsszenario APS2020	195
Abbildung 7-6:	Berechnete NO _x -Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Emissionsszenario APS2020	196
Abbildung 7-7:	Berechnete PM10-Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Emissionsszenario APS2020	196
Abbildung 7-8:	Berechnete PM2.5-Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Emissionsszenario APS2020	197
Abbildung 7-9:	Berechnete SO ₂ -Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Emissionsszenario APS2020	197
Abbildung 7-10:	Absolute (oben, µg/m ³) und relative Änderungen (unten, in %) der NO ₂ -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.	198

Abbildung 7-11:	Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der NO_x -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.....	200
Abbildung 7-12:	Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der PM_{10} -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.....	202
Abbildung 7-13:	Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der $\text{PM}_{2.5}$ -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.....	204
Abbildung 7-14:	Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der SO_2 -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.....	206
Abbildung 8-1:	Verortung der Emissionen im Modellgebiet Berlin.....	213
Abbildung 8-2:	Verortung der Emissionen im Modellgebiet Bremen	214
Abbildung 8-3:	Verortung der Emissionen im Modellgebiet Köln.....	215
Abbildung 8-4:	Lage des Auswertungsgebiets am Beispiel des Modellgebiets Berlin	218
Abbildung 8-5:	Auszuwertende Gitterzellen im Auswertungsgebiet am Beispiel des Modellgebiets Berlin	219
Abbildung 8-6:	Auswahl der maximal beaufschlagten Fläche (MBF) am Beispiel Köln.....	222
Abbildung 8-7:	Auswahl der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum (MBF Straße) am Beispiel Köln	223
Abbildung 8-8:	BHKW-bedingte NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Berlin, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand.....	226
Abbildung 8-9:	BHKW-bedingte NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Bremen, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand.....	228
Abbildung 8-10:	BHKW-bedingte NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Köln, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand.....	230
Abbildung 8-11:	NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen im Auswertungsgebiet Berlin, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand.....	232
Abbildung 8-12:	Mit RCG und mit LASAT ermittelter Beitrag der lokalen NO_x -Emissionen (Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau und Kfz-Emissionen) zur regionalen NO_x -Hintergrundbelastung für die drei Modellgebiete.....	238

Abbildung 8-13:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22.....	259
Abbildung 8-14:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22.....	260
Abbildung 8-15:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22.....	260
Abbildung 9-1:	NO _x -Immissionsänderungen durch BHKW und NO _x -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	270
Abbildung 9-2:	NO _x -Immissionsänderungen durch BHKW und NO _x -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	271
Abbildung 9-3:	NO _x -Immissionsänderungen durch BHKW und NO _x -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	272
Abbildung 9-4:	Zusammenfassung der NO _x -Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)	273
Abbildung 9-5:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	275
Abbildung 9-6:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	276
Abbildung 9-7:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	277
Abbildung 9-8:	Zusammenfassung der NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)	278
Abbildung 9-9:	NM VOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	280
Abbildung 9-10:	NM VOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	281
Abbildung 9-11:	NM VOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	282

Abbildung 9-12:	Zusammenfassung der NMVOC-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links).....	283
Abbildung 9-13:	PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	285
Abbildung 9-14:	PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	286
Abbildung 9-15:	PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten).....	287
Abbildung 9-16:	Zusammenfassung der PM10-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)	288

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Emissionsszenarien auf nationaler Ebene.....	25
Tabelle 1-2:	Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020 auf nationaler Ebene	26
Tabelle 1-3:	BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 auf nationaler Ebene	27
Tabelle 1-4:	Liste der untersuchten Zusammenhänge (Parameter und abhängige Größen)	28
Tabelle 1-5:	Durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugte Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf	28
Tabelle 1-6:	Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser in den drei Untersuchungsgebieten	29
Tabelle 1-7:	Modellgebiet Berlin, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	31
Tabelle 1-8:	Modellgebiet Bremen, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	31
Tabelle 1-9:	Modellgebiet Köln, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	32
Tabelle 1-10:	Emissionen des Kfz-Verkehrs im Untersuchungsgebiet, Bezugsjahr 2020	32
Tabelle 1-11:	Immissionsänderung durch BHKW für ausgewählte Szenarien und Auswertungsflächen.....	36
Tabelle 1-12:	Verhältnis des Endenergiebedarfs in den drei Modellgebieten zum Ausgangsszenario bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtagen; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios	37
Tabelle 1-13:	Ergebnisse der Bewertung der BHKW-bedingten Emissions- und Immissionsänderungen im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV	38
Tabelle 5-1:	Emissionsszenarien auf nationaler Ebene.....	61
Tabelle 5-2:	Minimalszenario, Zubauten Mini-BHKW pro Jahr.....	63
Tabelle 5-3:	Minimalszenario, installierte Mini-BHKW pro Jahr	64
Tabelle 5-4:	Minimalszenario, durch zugebaute Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)	67
Tabelle 5-5:	Minimalszenario, durch installierte Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)	68
Tabelle 5-6:	Anteile der Stückzahlen bzw. der erzeugten Strommengen der einzelnen Leistungsklassen an der Summe der zugebauten Mini-BHKW bzw. der dadurch erzeugten Strommenge für 2013.....	71
Tabelle 5-7:	Maximalszenario, Zubauten Mini-BHKW pro Jahr	72
Tabelle 5-8:	Maximalszenario, installierte Mini-BHKW pro Jahr	73
Tabelle 5-9:	Maximalszenario, durch zugebaute Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)	77

Tabelle 5-10:	Maximalszenario, durch installierte Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)	78
Tabelle 5-11:	Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020.....	81
Tabelle 5-12:	Emissionsfaktoren Erdgas-BHKW, Bezugsjahr 2011	81
Tabelle 5-13:	Eingangsgrößen und Emissionen der Erdgas-BHKW im Jahr 2020 im Minimalszenario.....	83
Tabelle 5-14:	Eingangsgrößen und Emissionen der Erdgas-BHKW im Jahr 2020 im Maximalszenario	83
Tabelle 5-15:	Emissionsfaktoren deutscher Strommix, Bezugsjahr 2011.....	84
Tabelle 5-16:	Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2020 im Minimalszenario.....	84
Tabelle 5-17:	Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2020 im Maximalszenario	84
Tabelle 5-18:	Emissionsfaktoren Erdgas und Heizöl leicht (für Heizkessel im Geltungsbereich der 1. BImSchV)	85
Tabelle 5-19:	Eingangsgrößen und vermiedene Emissionen der Wärmeherzeugung durch Gas- und Ölheizkessel im Jahr 2020 im Minimalszenario	86
Tabelle 5-20:	Eingangsgrößen und vermiedene Emissionen der Wärmeherzeugung durch Gas- und Ölheizkessel im Jahr 2020 im Maximalszenario	86
Tabelle 5-21:	BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 im Minimalszenario	87
Tabelle 5-22:	BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 im Maximalszenario	91
Tabelle 5-23:	Liste der untersuchten Zusammenhänge (Parameter und abhängige Größen)	122
Tabelle 5-24:	Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse < 2 kW.....	125
Tabelle 5-25:	Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 2-10 kW.....	126
Tabelle 5-26:	Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 10-20 kW	127
Tabelle 5-27:	Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 20-50 kW	128
Tabelle 5-28:	Verteilung der BHKW < 50 kW _{el} auf Bundesland-Ebene in der Prognose 2020 für das Minimal- und das Maximalszenario	132
Tabelle 5-29:	Durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugte Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf.....	135
Tabelle 5-30:	Minimalszenario, Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Anzahl BHKW, am Erdgaseinsatz und an der Leistung, für städtische und andere Postleitzahl-Bereiche	137

Tabelle 5-31:	Maximalszenario, Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Anzahl BHKW, am Erdgaseinsatz und an der Leistung, für städtische und andere Postleitzahl-Bereiche	137
Tabelle 5-32:	Verteilungen „A“ und „B“ der durch BHKW erzeugten Wärmemengen auf die einzelnen Leistungsklassen	138
Tabelle 6-1:	Messstationen in Regionen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten.....	140
Tabelle 6-2:	Messstationen in Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten.....	143
Tabelle 6-3:	Messstationen in Regionen mit mittleren Windgeschwindigkeiten.....	145
Tabelle 6-4:	Nutzungsarten „Nicht emissionsrelevante Gebäude“	148
Tabelle 6-5:	Kenndaten der emissionsrelevanten Gebäude in den drei Untersuchungsgebieten	148
Tabelle 6-6:	Mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere Temperatur für 2010.....	153
Tabelle 6-7:	Flächenbezogener Endenergieverbrauch (Energieträger Gas/Öl)	156
Tabelle 6-8:	Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Berlin	157
Tabelle 6-9:	Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Bremen	158
Tabelle 6-10:	Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Köln	158
Tabelle 6-11:	Aufteilung des Endenergiebedarfs nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)	159
Tabelle 6-12:	Bestimmung des Erdgaseinsatzes nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)	159
Tabelle 6-13:	Berechnung der Emissionen nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)	160
Tabelle 6-14:	Modellgebiet Berlin, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	161
Tabelle 6-15:	Modellgebiet Bremen, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	161
Tabelle 6-16:	Modellgebiet Köln, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	162
Tabelle 6-17:	Modellgebiet Berlin, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	163
Tabelle 6-18:	Modellgebiet Bremen, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	163
Tabelle 6-19:	Modellgebiet Köln, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen	164

Tabelle 6-20:	Modellgebiet Berlin, durch Gas- /Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen.....	166
Tabelle 6-21:	Modellgebiet Bremen, durch Gas-/Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen.....	166
Tabelle 6-22:	Modellgebiet Köln, durch Gas-/Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen.....	167
Tabelle 6-23:	Modellgebiet Berlin, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	169
Tabelle 6-24:	Modellgebiet Bremen, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	169
Tabelle 6-25:	Modellgebiet Köln, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet	170
Tabelle 6-26:	Konzentrationen von Stickoxiden im Abgas Modul EC-Power XRG1 15 (Messreihe der Fachhochschule Nürtingen)	171
Tabelle 6-27:	Geometriedaten des simulierten Gebäudes.....	176
Tabelle 6-28:	Bauphysikalische Eigenschaften des simulierten Gebäudes.....	177
Tabelle 6-29:	Ergebnisse der dynamischen Simulation	177
Tabelle 6-30:	Standardabweichungen des stündlichen Heizendenergiebedarfs für unterschiedliche Berechnungsmethoden	181
Tabelle 6-31:	Emissionen des Kfz-Verkehrs im Untersuchungsgebiet, Bezugsjahr 2020	184
Tabelle 7-1:	In Deutschland durch BHKW erzeugte Emissionsänderungen im Jahr 2020 und Gesamtemissionen gemäß APS2020	193
Tabelle 7-2:	Relativer Anteil der in Deutschland durch BHKW erzeugten Emissionsänderungen im Jahr 2020 an den Gesamtemissionen gemäß APS2020	194
Tabelle 7-3:	Bandbreite der absoluten und relativen NO ₂ -und NO _x -Immissionsänderungen (Jahresmittelwerte) in Deutschland für BHKW-Szenarien 1 bis 8. Bezug APS2020-Szenario.....	207
Tabelle 7-4:	Bandbreite der absoluten und relativen PM10-, PM2.5- und SO ₂ -Immissionsänderungen (Jahresmittelwerte) in Deutschland für BHKW-Szenarien 1 bis 8. Bezug APS2020-Szenario.....	208
Tabelle 8-1:	Minimale und maximale Anteile der durch den BHKW-Ausbau außerhalb des Untersuchungsgebiets hervorgerufenen NO _x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO _x -Immissionsänderung (Szenario 1a)	233
Tabelle 8-2:	Minimale und maximale Anteile der NO _x -Zusatzbelastung im Auswertungsgebiet durch Kfz-Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets an der durch alle Kfz-Quellen im Modellgebiet hervorgerufenen NO _x -Zusatzbelastung (Szenario 1a)	234
Tabelle 8-3:	BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Berlin	236

Tabelle 8-4:	BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Bremen	236
Tabelle 8-5:	BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Köln.....	237
Tabelle 8-6:	Übersicht über die mit RCG und mit LASAT ermittelten Beiträge der lokalen NO _x -Emissionen zur regionalen NO _x -Hintergrundbelastung für die drei Modellgebiete (Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau und Kfz-Emissionen)	239
Tabelle 8-7:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Berlin	243
Tabelle 8-8:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Bremen.....	243
Tabelle 8-9:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Köln	244
Tabelle 8-10:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Berlin.....	246
Tabelle 8-11:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Bremen	246
Tabelle 8-12:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Köln	247
Tabelle 8-13:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Berlin	248
Tabelle 8-14:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Bremen	249
Tabelle 8-15:	Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Köln.....	249
Tabelle 8-16:	Verwendete Hintergrundwerte zur Bestimmung der NO _x -Gesamtbelastung	250
Tabelle 8-17:	NO _x -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	252
Tabelle 8-18:	NO _x -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	252
Tabelle 8-19:	NO _x -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	253
Tabelle 8-20:	Charakteristische Zeiten und kritische Verweildauer in Abhängigkeit von den Eingangsparametern am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin.....	256
Tabelle 8-21:	Charakteristische Zeiten und kritische Verweildauer in Abhängigkeit von den Eingangsparametern am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin, Variation der NO ₂ -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau	257
Tabelle 8-22:	Möglichkeiten der Parametrisierung des Romberg-Ansatzes	258

Tabelle 8-23:	Verwendete O ₃ -Hintergrundwerte zur Bestimmung der NO ₂ -Gesamtbelastung	258
Tabelle 8-24:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	262
Tabelle 8-25:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	262
Tabelle 8-26:	NO ₂ -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm	263
Tabelle 8-27:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin	264
Tabelle 8-28:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen	264
Tabelle 8-29:	NO ₂ -Immissionsänderungen durch BHKW und NO ₂ -Zusatzbelastung durch Kfz für Köln	265
Tabelle 9-1:	Ausgangsszenario und Variationen	266
Tabelle 9-2:	Endenergiebedarf in [MWh] im Bezugsjahr 2020 für die drei Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtage HGT; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios	267
Tabelle 9-3:	Verhältnis des Endenergiebedarfs in den drei Modellgebieten zum Ausgangsszenario bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtagen; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios	267
Tabelle 9-4:	Anzahl der beim BAFA zugelassenen neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen nach Größenklassen und Inbetriebnahmejahren (BAFA, 2017, Datenstand: 16.01.2017)	290
Tabelle 9-5:	Emissionsfaktoren für NO _x in der Übersicht	291
Tabelle 9-6:	Angaben zu Anzahl und Leistung von vier wesentlichen Herstellern im Jahr 2015 (E&M 2016, BHKW Ranking)	292
Tabelle 9-7:	Angaben zu Anzahl und Leistung von vier wesentlichen Herstellern im Jahr 2015 (E&M 2016)	293
Tabelle 9-8:	Emissionshöchstmengen in Deutschland gemäß 39. BImSchV	295
Tabelle 9-9:	Ergebnisse der Bewertung der BHKW-bedingten Emissions- und Immissionsänderungen im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV	296

Abkürzungen

AKL	Ausbreitungsklasse; Stabilität der atmosphärischen Schichtung
AKS	Ausbreitungsklassenstatistik; Häufigkeitsverteilung der klassifizierten meteorologischen Größen Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stabilität der atmosphärischen Schichtung (Klug/Manier Stabilitätsklassen) nach VDI 3782 Blatt 1 (KRdL, 2009) und Blatt 6 (KRdL, 2015)
AKTerm	Ausbreitungsklassen-Zeitreihen; Zeitreihe der meteorologischen Größen Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stabilität der atmosphärischen Schichtung (Klug/Manier Stabilitätsklassen)
APS2020	Aktuelle Politik Szenario, Szenario für 2020 gemäß UBA (2014), welches bereits beschlossene energie- und klimapolitische Maßnahmen berücksichtigt
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGF	Bruttogrundfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Bundes-Immissionsschutzverordnung)
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CMAQ	Community Multiscale Air Quality Modeling System; dreidimensionales chemisches Transportmodell der US EPA
CHP	combined heat and power plant (s. BHKW)
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEB	Endenergiebedarf
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
EEV	Endenergieverbrauch
EnEV	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung)
EU	Europäische Union
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs; Datenbank mit Informationen zu Flottenzusammensetzungen, Verkehrssituationen und Emissionsfaktoren in Deutschland und weiteren Ländern
HDD	heating degree days (s. HGT)
HGT	Heizgradtage
H _i	Heizwert
KF	Klimafaktor

Kfz	Kraftfahrzeug
kW _{el}	Kilowatt elektrischer Leistung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MLA	maximum loaded area (s. MBF)
MLA Street	maximum loaded area in the street (s. MBF Straße)
MBF	maximal beaufschlagte Fläche
MBF Straße	maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum
Mini-BHKW	BHKW kleiner 50 kW elektrischer Leistung (50 kW _{el})
MISKAM	MISKAM (Mikroskaliges Strömungs- und Ausbreitungsmodell) ist ein dreidimensionales nicht-hydrostatisches numerisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell zur kleinräumigen Berechnung von Windverteilungen und Immissionskonzentrationen in bebauten Gebieten
m _n ³	Normkubikmeter
NGF	Nettogrundfläche
NMVOG	Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide mit den Komponenten NO und NO ₂
O ₃	Ozon
PLZ	Postleitzahl
PM10	Partikel, die einen gröÑenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.
R ²	Bestimmtheitsmaß
R _{corr} ²	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes; numerisches Simulationsverfahren zur Approximation turbulenter Strömungen als Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen
RCG	REM-CALGRID (RCG), dreidimensionales chemisches Transportmodell
SO ₂	Schwefeldioxid
TRAMPER	Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research
TRNSYS	TRaNsient SYstem Simulation program
UBA	Umweltbundesamt
US EPA	United States Environmental Protection Agency
WMO	World Meteorological Organisation

1 Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW) lassen sich der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen aus der Strom- und Wärmebereitstellung senken. Aus Klimaschutzgründen ist daher ein weiterer Ausbau des BHKW-Einsatzes wünschenswert, ein negativer Aspekt ist allerdings, dass beim Betrieb von BHKW gesundheitsgefährdende Stoffe (u. a. NO_x, Staub, Formaldehyd) direkt in den Aufenthaltsbereichen der Menschen freigesetzt werden.

Vom Umweltbundesamt (UBA) wurde daher das hier beschriebene Projekt „Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen“ initiiert. Im Rahmen dieses Projektes waren die durch BHKW verursachten Luftschadstoffemissionen auf nationaler Ebene für Deutschland und auf lokaler Ebene für ausgewählte städtische Ballungsräume abzuschätzen und die Ausbreitung dieser Schadstoffe zu modellieren. Dabei waren nur die Emissionen von BHKW kleiner 50 kW elektrischer Leistung (kW_{el}), sogenannte Mini-BHKW, zu berücksichtigen. Neben den Emissions- und Immissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW waren auf lokaler Ebene auch Kfz-Emissionen und -Immissionen zu berechnen, um sie zum einen mit den Emissions- und Immissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW vergleichen zu können und zum anderen zu untersuchen, welchen Beitrag die Emissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW zu Grenzwertüberschreitungen im Straßenraum leisten könnten. Dazu wurden drei Modellgebiete mit einer Fläche von jeweils ca. 1 x 1 km² betrachtet.

Im ersten Schritt wurden auf nationaler Ebene die durch Mini-BHKW erzeugten Emissionen sowie die bedingt durch den Einsatz von Mini-BHKW bei der Stromerzeugung bzw. durch Gas- bzw. Ölheizkessel nicht mehr erzeugten, d. h. vermiedenen Emissionen für das Bezugsjahr 2020 für Deutschland berechnet.

Betrachtet wurden die Luftschadstoffe NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC. Dabei wurden die NMVOC-Emissionen als Ersatz für die ursprünglich vorgesehenen Formaldehyd-Emissionen bestimmt, da die Datengrundlage für NMVOC-Emissionsfaktoren etwas besser ist als für Formaldehyd-Emissionsfaktoren. Die Emissionen wurden auf nationaler Ebene für insgesamt acht Szenarien ermittelt (Tabelle 1-1), die sich hinsichtlich des Substitutionsgrads mit Mini-BHKW, der Emissionsfaktoren der Mini-BHKW sowie des Brennstoffs der ersetzten Heizkessel (Öl oder Gas) unterscheiden. Der hohe Substitutionsgrad mit Mini-BHKW wird im Folgenden als Maximalszenario bezeichnet, der niedrige Substitutionsgrad als Minimal-szenario.

Tabelle 1-1: Emissionsszenarien auf nationaler Ebene

Name	Beschreibung
im Rahmen des Minimalszenarios (niedriger BHKW-Einsatz):	
Szenario 1:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 2:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
Szenario 3:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 4:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
im Rahmen des Maximalszenarios (hoher BHKW-Einsatz):	
Szenario 5:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 6:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
Szenario 7:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 8:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel

Um die Emissionen im Bezugsjahr 2020 abschätzen zu können, wurden zunächst die im Jahr 2020 durch Mini-BHKW erzeugten Strom- und Wärmemengen für das Minimal- und das Maximalszenario

prognostiziert. Grundlage der Prognose war eine Liste des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zur Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Darin werden vier Leistungsklassen der Mini-BHKW unterschieden (bis 2 kW_{el}, 2-10 kW_{el}, 10-20 kW_{el} und 20-50 kW_{el}). Die Liste erfasst den Zubau von Anlagen mit Inbetriebnahmedatum und Standort nach Postleitzahl (PLZ) sowie die mittleren elektrischen Leistungen der zugebauten Anlagen je Leistungsklasse. Für das Minimalszenario wurde angenommen, dass der Zubau für die Jahre 2014-2019 dem Zubau im Jahr 2013 entspricht. Für das Maximalszenario wurde von der in der Leitstudie von Nitsch et al. (2012) für das Jahr 2020 angenommenen Strommenge von 9 100 GWh durch erdgasbetriebene Mini-BHKW ausgegangen. Weiterhin wurde von einer Laufzeit von 16 Jahren für alle BHKW ausgegangen. In Tabelle 1-2 sind die berechneten Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020 aufgeführt.

Tabelle 1-2: Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020 auf nationaler Ebene

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Minimalszenario (Zubau 2014-2019 wie 2013)						
Anzahl BHKW, Summe 2004-2019		14 289	34 941	12 152	7 378	68 760
Strommenge 2020	GWh	52.5	740.7	1 087.6	1 560.4	3 441.3
Wärmemenge 2020	GWh	150.0	1 677.2	2 491.2	3 098.8	7 417.1
Maximalszenario (nach Nitsch et al., 2012)						
Anzahl BHKW, Summe 2004-2019		47 983	80 540	33 436	19 970	181 929
Strommenge 2020	GWh	176.3	1 707.5	2 992.5	4 223.7	9 100.0
Wärmemenge 2020	GWh	503.8	3 865.9	6 854.3	8 387.5	19 611.6

Die Emissionsfaktoren für die betrachteten Stoffe wurden vom Auftraggeber bereitgestellt. Für die Mini-BHKW wurde mit dem Auftraggeber im Rahmen der Szenarienbetrachtung gemäß Tabelle 1-1 eine hohe und eine niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren abgestimmt. Dabei wurden ausschließlich Erdgas-BHKW betrachtet. Andere Gasarten als Erdgas (z. B. Klärgas, Biogas etc.) wurden in Absprache mit dem Auftraggeber vernachlässigt, da sie im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} auch zukünftig allenfalls eine unbedeutende Rolle spielen werden.

Basierend auf den berechneten Strom- und Wärmemengen bzw. den daraus resultierenden Brennstoffeinsätzen und den abgestimmten Emissionsfaktoren wurden die im Jahr 2020 durch Mini-BHKW erzeugten bzw. die dadurch in der Strom- und Wärmeerzeugung vermiedenen Emissionen für die verschiedenen Szenarien bestimmt. Als zusammenfassende Größe wurden abschließend die BHKW-bedingten Emissionsänderungen als Differenz aus den BHKW-Emissionen und der Summe der vermiedenen Emissionen aus Strom- und Wärmeerzeugung ermittelt.

In Tabelle 1-3 sind die BHKW-bedingten Emissionsänderungen auf nationaler Ebene für die acht Szenarien nach Tabelle 1-1 und die betrachteten Schadstoffe zusammengefasst. Negative Werte zeigen durch den Einsatz von BHKW bedingte Minderemissionen an. Da für die Stoffe SO₂, PM₁₀ und PM_{2.5} bei den Erdgas-BHKW keine Emissionen angesetzt wurden, ergeben sich hier ausschließlich Minderemissionen durch vermiedene Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung. Für NO_x ergeben sich durch BHKW bedingte Mehremissionen, wenn für die BHKW die hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren angesetzt wird. Wird die niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren angesetzt, so ergeben sich Minderemissionen. Für NMVOC ergeben sich in der Regel durch BHKW bedingte Mehremissionen. Minderemissionen ergeben sich

nur, wenn niedrige Emissionsfaktoren für BHKW angesetzt und gleichzeitig Ölheizkessel durch BHKW ersetzt werden.

Tabelle 1-3: BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 auf nationaler Ebene

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [t/a]	SO ₂ [t/a]	PM10 [t/a]	PM2.5 [t/a]	NM VOC [t/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1	1018.60	-1215.85	-77.73	-70.84	145.81
	Öl	2	454.37	-3071.39	-109.98	-103.10	113.23
niedrig	Gas	3	-1395.70	-1215.85	-77.73	-70.84	16.51
	Öl	4	-1959.93	-3071.39	-109.98	-103.10	-16.08
Maximalszenario							
hoch	Gas	5	2659.82	-3215.12	-205.53	-187.33	383.19
	Öl	6	1167.96	-8121.34	-290.81	-272.61	297.04
niedrig	Gas	7	-3702.15	-3215.12	-205.53	-187.33	42.47
	Öl	8	-5194.01	-8121.34	-290.81	-272.61	-43.69

Mit den Ergebnissen in Tabelle 1-3 liegen die BHKW-bedingten Emissionsänderungen im Jahr 2020 als Prognose auf nationaler Ebene vor. Zur Abschätzung der durch BHKW erzeugten Wärmemengen und damit der Emissionsänderungen auf lokaler Ebene für die drei zu betrachtenden Modellgebiete sowie für die Immissionsmodellierung auf nationaler Ebene mussten sinnvolle Annahmen zur räumlichen Verteilung der Anwendungsdichte von Mini-BHKW in der Prognose getroffen werden.

Dazu wurde ein Downscaling-Ansatz entwickelt. Als Ausgangsbasis wurden die räumlichen Verteilungen und zeitlichen Entwicklungen der Daten der BAFA-Liste bis 2013 untersucht. Es zeigte sich, dass sowohl die Anzahl der installierten Mini-BHKW als auch deren Verteilung auf die einzelnen Leistungsklassen bis zu einem gewissen Grad abhängig vom Bundesland ist. Grund dafür ist zum einen, dass sich auf Bundesland-Ebene die Förderpolitik der Länder hinsichtlich Mini-BHKW widerspiegelt. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Bebauungsstruktur (z. B. Anteil der Ein- und Zwei-Familienhäuser gegenüber dem Anteil an Mehrfamilienhäusern und Wohnblocks) die Verteilung auf die einzelnen Leistungsklassen beeinflusst, wie die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen zeigen.

Darauf aufbauend wurde die Abhängigkeit der Daten der BAFA-Liste (Anzahl installierte Mini-BHKW 2013, Zubau Mini-BHKW von 2012 nach 2013) von allgemein verfügbaren, leicht zugänglichen Parametern wie Einwohnerzahl, Anzahl Wohnungen, Wohnfläche etc. auf PLZ-Ebene analysiert. Tabelle 1-4 gibt eine Übersicht über die untersuchten Zusammenhänge. Ergebnis der Analyse ist, dass sowohl die Anzahl der installierten BHKW als auch deren Zubau keinerlei Abhängigkeit von den untersuchten Parametern zeigt. Aus diesem Grund wurde ein alternativer Ansatz zur Prognose der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW auf PLZ-Ebene im Jahr 2020 gewählt. Der Ansatz berücksichtigt den Einfluss der Bundesland-Ebene (Förderpolitik), indem er die Anzahl der jährlich von 2014 bis 2019 zugebauten Mini-BHKW pro Bundesland prognostiziert auf Basis des prognostizierten jährlichen Zubaus auf nationaler Ebene im Minimal- und im Maximalszenario und des bekannten Zubaus der Mini-BHKW pro Bundesland im Jahr 2013. Damit wurde implizit angenommen, dass sich die Förderpolitik der einzelnen Bundesländer bezüglich Mini-BHKW bis 2020 nicht ändert. Die jedem Bundesland zugewiesene Anzahl Mini-BHKW wurde entsprechend den Anteilen 2013 nach Leistungsklassen differenziert. Innerhalb des jeweiligen Bundeslandes wurde die zugewiesene Anzahl zugebauter Mini-BHKW für jedes Jahr von 2014 bis 2019 zufällig auf die einzelnen PLZ-

Bereiche verteilt. Damit lag eine PLZ-feine Verteilung der im Jahr 2020 installierten Mini-BHKW im Minimal- und im Maximalszenario differenziert nach Leistungsklassen vor.

Tabelle 1-4: Liste der untersuchten Zusammenhänge (Parameter und abhängige Größen)

abhängige Größe	Parameter
Anzahl installierte Mini-BHKW 2013 Zubau Mini-BHKW von 2012 nach 2013	Einwohnerzahl Anzahl Wohnungen Wohnfläche Anzahl Gebäude mit Wohnraum Anzahl Gebäude mit 1 und 2 Wohnungen Anzahl Gebäude mit 3 und mehr Wohnungen

Im nächsten Schritt wurde ein Downscaling von der PLZ-Ebene auf die Modellgebietsebene vorgenommen. Dazu wurden die durch Mini-BHKW im jeweiligen Modellgebiet erzeugten Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf des Modellgebiets in Abhängigkeit vom Szenario festgelegt. Die Abschätzung der Anteile erfolgte auf der Grundlage von bundesmittleren Zahlen und von Werten auf PLZ-Ebene. Auf Bundesebene wurde abgeschätzt, dass der Anteil der durch Mini-BHKW erzeugten Wärmemenge im Jahr 2020 im Minimalszenario 1 % und im Maximalszenario 4 % des für 2020 prognostizierten Wärmebedarfs in Deutschland beträgt. Auf PLZ-Ebene wurden auf Basis der prognostizierten Verteilung der installierten BHKW die durch diese BHKW erzeugten Wärmemengen für 1720 städtische PLZ-Bereiche in Gemeinden > 50 000 Einwohner ausgewertet und auf den Wärmebedarf des Modellgebiets Berlin bezogen. Daraus ergab sich auf PLZ-Ebene im Minimalszenario ein Anteil von 4 % und im Maximalszenario von 6 % der durch BHKW erzeugten Wärmemengen am Wärmebedarf des Modellgebiets.

Die durch Mini-BHKW erzeugten Strom- und Wärmemengen sowie Schadstoffemissionen auf lokaler Ebene waren laut Aufgabenstellung für städtische Quartiere mit einem hohen und mit einem mittleren Anteil an Mini-BHKW zu ermitteln. Dazu wurden basierend auf den oben ausgeführten Auswertungen die durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugten Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf entsprechend Tabelle 1-5 festgelegt. Die Werte für städtische Quartiere mit einem mittleren Anteil an Mini-BHKW entsprechen den bundesmittleren Werten im Minimal- und Maximalszenario. Die Werte für städtische Quartiere mit einem hohen Anteil an Mini-BHKW orientieren sich an den auf PLZ-Ebene ermittelten maximalen Werten.

Tabelle 1-5: Durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugte Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf

Szenario	Deckung des Wärmebedarfs durch BHKW im Modellgebiet	Anteil an Wärmebedarf
Minimalszenario	mittel	1 %
	hoch	2 %
Maximalszenario	mittel	4 %
	hoch	8 %

Damit lassen sich auf lokaler Ebene 16 Emissionsszenarien definieren, die zusammen mit den Szenarien auf nationaler Ebene in Abbildung 1-1 dargestellt sind. Zudem wurde den Szenarien mit einem mittleren Anteil an Mini-BHKW eine andere Verteilung der Anlagen auf die Leistungsklassen zugewiesen als den Szenarien mit einem hohen Anteil an Mini-BHKW. Die beiden Verteilungen der Anlagen auf die Leistungsklassen wurden aus den entsprechenden Verteilungen für städtische Postleitzahlen-Bereiche in Gemeinden > 50 000 Einwohner abgeleitet.

Abbildung 1-1: Übersicht über die Emissionsszenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene

	Emissionen BHKW	vermiedene Emissionen Strom	vermiedene Emissionen Wärme	Anteil am Wärmebedarf, der durch BHKW gedeckt wird	Szenario Name
Minimalszenario: Substitutionsgrad BHKW niedrig	Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 1a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 1b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 2a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 2b
	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 3a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 3b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 4a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 4b
Maximalszenario: Substitutionsgrad BHKW hoch	Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 5a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 5b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 6a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 6b
	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 7a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 7b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 8a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 8b
Nationale Ebene				Lokale Ebene	

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Für die Emissionsberechnungen auf lokaler Ebene und die nachfolgende Modellierung der Schadstoffausbreitung wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber je ein Modellgebiet in Berlin, Bremen und Köln mit einer Fläche von jeweils ca. 1 x 1 km² ausgewählt. Um die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für diese drei Modellgebiete abschätzen zu können, wurde zunächst der Wärmebedarf für den jeweils auszuwertenden Bereich des Modellgebiets, im Folgenden Untersuchungsgebiet genannt, in Abhängigkeit der vorhandenen Bebauung aus statistischen Erhebungen abgeleitet. Um potenziell sich verstärkende negative Auswirkungen von gleichzeitig auftretendem hohen Wärmebedarf und ungünstigen Ausbreitungsbedingungen zu berücksichtigen, wurde der Wärmebedarf in den Untersuchungsgebieten für das meteorologische Bezugsjahr 2010 ermittelt, das sowohl deutschlandweit als auch lokal das kälteste Jahr innerhalb der Periode 2000 bis 2014 darstellt. Dabei wurde als Energiestandard der Gebäude der Mittelwert über alle Sanierungszustände angesetzt. Tabelle 1-6 zeigt den für die drei Untersuchungsgebiete berechneten Wärmebedarf.

Tabelle 1-6: Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser in den drei Untersuchungsgebieten

	Berlin	Bremen	Köln
Endenergiebedarf [MWh/a]	177 729	141 039	101 056

Aufbauend auf dem berechneten Endenergiebedarf wurden die zur Deckung des Endenergiebedarfs in den drei Untersuchungsgebieten erzeugten Emissionen bestimmt. Üblicherweise wird die Leistung einer wärmegeführten BHKW-Anlage aus wirtschaftlichen Gründen so ausgelegt, dass sie auch im Volllastbetrieb

nur einen Teil des maximalen Heizenergiebedarfes der angeschlossenen Abnehmer deckt, die benötigte Restwärme liefert ein Spitzenlastkessel. Daher wurden, im Gegensatz zur nationalen Ebene, auf lokaler Ebene neben den Emissionen aus Mini-BHKW auch die Emissionen von Spitzenlastkesseln berücksichtigt. Hingegen wurden bei den vermiedenen Emissionen nur die Emissionen aus Wärmeerzeugung betrachtet, da im Regelfall davon auszugehen ist, dass die vermiedene Stromerzeugung nicht lokal in den Modellgebieten stattfindet. Die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau in den drei Modellgebieten wurden demnach auf lokaler Ebene als Summe der BHKW- und der Spitzenlastkessel-Emissionen abzüglich der vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung bestimmt. Für die zeitliche Verteilung dieser Emissionen in den Ausbreitungsrechnungen wurden für jedes Untersuchungsgebiet Jahresganglinien in Abhängigkeit vom Jahresgang der Temperatur erzeugt, getrennt nach den Quellgruppen BHKW, Spitzenlastkessel und vermiedene Emissionen. Die Emissionen des Kfz-Verkehrs wurden für die relevanten Straßen im jeweiligen Modellgebiet auf Basis des HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) berechnet. Die Jahresganglinie des Verkehrs beruht auf Verkehrsganglinien des Bayerischen Emissionskatasters (IER, 2005).

In Tabelle 1-7 bis Tabelle 1-9 sind die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau auf lokaler Ebene für die drei betrachteten Untersuchungsgebiete und die 16 betrachteten Szenarien zusammengestellt. Da für die Stoffe SO₂, PM₁₀ und PM_{2.5} bei den Erdgas-BHKW keine Emissionen angesetzt wurden und die Emissionsmengen der Spitzenlastkessel deutlich geringer sind als die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung, ergeben sich hier ausschließlich Minderemissionen. Tabelle 1-10 gibt die ermittelten Kfz-Emissionen für die drei Untersuchungsgebiete wieder, die angegebenen NO₂-Emissionen sind die auf Basis des HBEFA 3.2 ermittelten NO₂-Direktemissionen.

Tabelle 1-7: Modellgebiet Berlin, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	684.6	-3.6	-2.1	-2.1	57.0
		1b	1 382.6	-7.1	-4.3	-4.3	114.9
	Öl	2a	491.5	-638.7	-13.2	-13.2	45.8
		2b	996.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	92.6
niedrig	Gas	3a	108.1	-3.6	-2.1	-2.1	26.1
		3b	220.9	-7.1	-4.3	-4.3	52.7
	Öl	4a	-85.0	-638.7	-13.2	-13.2	15.0
		4b	-165.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	30.4
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	2 738.5	-14.2	-8.5	-8.5	227.9
		5b	5 530.5	-28.4	-17.1	-17.1	459.7
	Öl	6a	1 966.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	183.3
		6b	3 985.4	-5 109.8	-105.4	-105.4	370.4
niedrig	Gas	7a	432.6	-14.2	-8.5	-8.5	104.4
		7b	883.5	-28.4	-17.1	-17.1	210.8
	Öl	8a	-340.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	59.8
		8b	-661.6	-5 109.8	-105.4	-105.4	121.5

Tabelle 1-8: Modellgebiet Bremen, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	543.3	-2.8	-1.7	-1.7	45.2
		1b	1 097.2	-5.6	-3.4	-3.4	91.2
	Öl	2a	390.0	-506.9	-10.5	-10.5	36.4
		2b	790.7	-1 013.7	-20.9	-20.9	73.5
niedrig	Gas	3a	85.8	-2.8	-1.7	-1.7	20.7
		3b	175.3	-5.6	-3.4	-3.4	41.8
	Öl	4a	-67.5	-506.9	-10.5	-10.5	11.9
		4b	-131.3	-1 013.7	-20.9	-20.9	24.1
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	2 173.2	-11.3	-6.8	-6.8	180.9
		5b	4 388.9	-22.6	-13.5	-13.5	364.8
	Öl	6a	1 560.1	-2 027.5	-41.8	-41.8	145.5
		6b	3 162.7	-4 055.0	-83.6	-83.6	294.0
niedrig	Gas	7a	343.3	-11.3	-6.8	-6.8	82.9

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
		7b	701.1	-22.6	-13.5	-13.5	167.3
	Öl	8a	-269.8	-2 027.5	-41.8	-41.8	47.5
		8b	-525.0	-4 055.0	-83.6	-83.6	96.5

Tabelle 1-9: Modellgebiet Köln, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	389.3	-2.0	-1.2	-1.2	32.4
		1b	786.2	-4.0	-2.4	-2.4	65.3
	Öl	2a	279.5	-363.2	-7.5	-7.5	26.1
		2b	566.5	-726.4	-15.0	-15.0	52.7
niedrig	Gas	3a	61.5	-2.0	-1.2	-1.2	14.8
		3b	125.6	-4.0	-2.4	-2.4	30.0
	Öl	4a	-48.3	-363.2	-7.5	-7.5	8.5
		4b	-94.0	-726.4	-15.0	-15.0	17.3
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	1 557.1	-8.1	-4.9	-4.9	129.6
		5b	3 144.7	-16.2	-9.7	-9.7	261.4
	Öl	6a	1 117.8	-1 452.7	-30.0	-30.0	104.2
		6b	2 266.1	-2 905.4	-59.9	-59.9	210.6
niedrig	Gas	7a	246.0	-8.1	-4.9	-4.9	59.4
		7b	502.4	-16.2	-9.7	-9.7	119.8
	Öl	8a	-193.3	-1 452.7	-30.0	-30.0	34.0
		8b	-376.2	-2 905.4	-59.9	-59.9	69.1

Tabelle 1-10: Emissionen des Kfz-Verkehrs im Untersuchungsgebiet, Bezugsjahr 2020

	Berlin	Bremen	Köln
NO _x [kg/a]	6 590.2	7 062.1	10 052.2
NO ₂ [kg/a]	1 474.7	1 688.9	2 292.8
SO ₂ [kg/a]	20.5	23.5	30.4
PM10 [kg/a]	1 017.9	1 271.5	2 037.6
PM2.5 [kg/a]	445.5	565.3	610.5
NMHC [kg/a]	4 982.7	2 183.2	2 723.4

Für die berechneten Emissionsszenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene wurden im zweiten Schritt die Beiträge der Mini-BHKW zur Immissionsbelastung berechnet. Im urbanen Raum setzt sich die Gesamtbelastung der Luftschadstoffkonzentration aus dem regionalen Hintergrund, dem urbanen

Hintergrund und – in Hot-Spot-Bereichen – der Zusatzbelastung zusammen. In Anlehnung daran wurden die Beiträge der Mini-BHKW zur Hintergrundbelastung und zur lokalen Zusatzbelastung im Modellgebiet getrennt erhoben.

Auf nationaler Ebene wurden die Berechnungen zur Immissionsbelastung durch BHKW mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID (RCG) durchgeführt. Die vom Modell benötigten dreidimensionalen meteorologischen Eingangsdaten für die RCG-Modellierung wurden mit dem diagnostischen Analysesystem TRAMPER erstellt. Als meteorologisches Bezugsjahr wurde 2010 verwendet. Mit RCG wurde zunächst ein Basislauf mit den auf Basis des „Aktuelle Politik Szenarios“ für das Bezugsjahr 2020 prognostizierten Emissionen (APS2020) durchgeführt. Anschließend wurden die für die acht nationalen Szenarien ermittelten Emissionen der BHKW, der Strom- und der Wärmeerzeugung in die Emissionsdatenbasis eingearbeitet. Dazu wurden die Emissionen entsprechend der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW gemäß dem oben beschriebenen Downscaling-Ansatz auf der PLZ-Ebene verteilt. Darauf aufbauend erfolgte die Umlegung der Emissionen auf das RCG-Raster mit einer Auflösung von ca. $7 \times 8 \text{ km}^2$ auf Basis der Anteile der PLZ-Flächen an den Rasterflächen. Der Anteil der BHKW-bedingten Emissionsänderungen an den Gesamtemissionen gemäß APS2020 ist dabei gering. Er liegt im Mittel über Deutschland für NO_x bei maximal 0.5 %, für SO_2 bei maximal 2.2 %, für PM_{10} bei maximal 0.1 %, für $\text{PM}_{2.5}$ bei maximal 0.3 % und für NMVOC deutlich unter 0.1 %.

Für die acht nationalen Szenarien mit den modifizierten Emissionsdaten wurden RCG-Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Der Einfluss der BHKW-bedingten Emissionsänderungen auf den Hintergrund wurde dann als Differenz zwischen dem jeweiligen Szenarienlauf und dem Basislauf bestimmt. Es ergaben sich für die Stickoxide je nach Szenario Zu- oder Abnahmen der Konzentrationsbelastung. Für PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ ergaben sich durchweg Abnahmen. Insgesamt sind die absoluten Änderungen der Konzentrationsbelastung mit Werten größtenteils deutlich unter $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als gering zu betrachten.

Auf lokaler Ebene wurden die Ausbreitungsrechnungen mit dem Lagrange'schen Partikelmodell LASAT für die Stoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC durchgeführt. Als meteorologische Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung mit LASAT wurden Wind- und Turbulenzfelder in Form einer Windfeldbibliothek verwendet, die mit dem mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM erstellt wurden, sowie als Antrieb die meteorologischen Zeitreihen (AKTerm) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die drei Stationen Berlin-Tempelhof, Bremen und Köln-Bonn für das meteorologische Bezugsjahr 2010.

Bei der Ausbreitungsmodellierung mit LASAT wurden die Emissionen durch BHKW, Spitzenlastkessel und zu ersetzende Gas- bzw. Ölheizkessel sowie durch den Kfz-Verkehr jeweils als eigenständige Quellgruppen berücksichtigt. Die Emissionen der BHKW und der Kessel wurden an den Schornsteinen der emissionsrelevanten Gebäude verortet. Es wurde im Hinblick auf die Skalierbarkeit der Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen davon ausgegangen, dass jeder Schornstein die anteilig gleiche Zusammensetzung aus BHKW-, Spitzenlast- und vermiedenen Emissionen ausstößt.

Die Ausbreitungsrechnungen wurden für jedes der drei Modellgebiete mit jeweils drei unterschiedlichen AKTerm für eins der 16 lokalen Szenarien explizit durchgeführt. Die drei unterschiedlichen AKTerm dienten dazu, den Einfluss der Meteorologie auf die Modellergebnisse zu untersuchen. Für die Auswertung wurden Flächenmittelwerte der Modellergebnisse zum einen über das gesamte auszuwertende Gebiet und zum anderen über zwei maximal beaufschlagte Flächen (MBF und MBF Straße) bestimmt. Als MBF wurde für jedes Modellgebiet diejenige zusammenhängende Fläche von 200 m^2 definiert, die die höchste BHKW-bedingte Immissionsbelastung aufweist. Die so bestimmte MBF liegt in der Regel in einem Innenhof. Da sich kritische Gesamtkonzentrationen eher im Straßenraum ergeben, wurde eine zweite MBF im Straßenraum definiert und als MBF Straße bezeichnet.

Für die übrigen 15 Szenarien wurden die Mittelwerte dieser drei Auswertungsflächen quellgruppenspezifisch über das Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum explizit berechneten Szenario skaliert, so dass am Ende für alle drei Modellgebiete, alle drei AKTerm und alle 16 lokalen Szenarien

Flächenmittelwerte über die drei definierten Auswertungsflächen vorlagen. Die Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur lokalen Zusatzbelastung wurden dann als Summe der lokalen Immissionsbelastung durch BHKW- und Spitzenlastkessel-Emissionen abzüglich der lokalen Immissionsbelastung durch die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung bestimmt.

Als Nebenaspekt war im Rahmen der Modellierung auf lokaler Ebene zu untersuchen, wie Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets die Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet beeinflussen bzw. wie weit Quellen um das Untersuchungsgebiet mit dem Modellgebiet erfasst werden müssen, damit deren Einfluss auf die Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet selbst vernachlässigbar klein ist. Dazu wurden gesonderte Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle betrachteten Quellgruppen das Modellgebiet in jede Richtung mindestens 200 m, besser 300 m größer sein sollte als das Untersuchungsgebiet. Weiter außen liegende Emissionen zeigen keinen nennenswerten Einfluss mehr auf das Untersuchungsgebiet, der nicht auch durch die (über das Modellgebiet konstante) Hintergrundbelastung erfasst würde.

Die Beiträge der Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau zur Hintergrundbelastung und zur lokalen Zusatzbelastung im Modellgebiet wurden zur gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau aggregiert. Bei der Aggregation ist grundsätzlich zu beachten, dass die lokal im Modellgebiet angesetzten Emissionen bereits auf nationaler Ebene in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt wurden. Um eine Doppelzählung dieser Emissionsbeiträge zu vermeiden, wurde daher zunächst der Beitrag der lokalen Emissionen zur Hintergrundbelastung abgeschätzt. Dazu wurden für sechs ausgewählte lokale Szenarien RCG-Ausbreitungsrechnungen mit modifizierten Emissionsdatensätzen durchgeführt. Die lokal im jeweiligen Modellgebiet angesetzten BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen wurden für die ausgewählten Szenarien in die Emissionsdaten des RCG-Modells in den Gitterzellen Berlin, Bremen und Köln eingearbeitet. Der Beitrag der lokalen Emissionen zur Hintergrundbelastung ergab sich dann für jedes der sechs ausgewählten lokalen Szenarien aus der Differenz zu den RCG-Modellergebnissen des jeweils zugehörigen unveränderten Szenarienlaufs.

Es zeigte sich, dass der Beitrag der lokalen BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur regionalen BHKW-bedingten Immissionsänderung als sehr gering einzustufen ist. Er wurde daher für die weiteren Betrachtungen zu Null angesetzt. Desgleichen wurde der mit Werten von größtenteils deutlich unter $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ebenfalls als gering eingestufte Beitrag der BHKW-bedingten Emissionsänderungen auf regionaler Ebene für die weiteren Betrachtungen zu Null angesetzt. Damit wurde für die weiteren Auswertungen die gesamte Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau gleich der lokalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau gesetzt.

Das für die lokalen Modellgebiete verwendete Ausbreitungsmodell LASAT wurde für die Simulation der Ausbreitung nicht-reaktiver Substanzen entwickelt und kann nur chemische Umsetzungen erster Ordnung für Einzelstoffe simulieren. Da NO_2 eine chemisch reaktive Substanz ist, die in der Atmosphäre einer Reihe von Reaktionen mit unterschiedlichen Stoffen unterliegt, wurden die Ausbreitungsrechnungen mit LASAT zunächst für NO_x durchgeführt. Diese lieferten als Ergebnis die durch die BHKW-bedingten Emissionsänderungen und die Kfz-Emissionen hervorgerufene NO_x -Zusatzbelastung.

Die Ableitung der NO_2 -Zusatzbelastung fand dann extern in einem Postprocessing-Schritt statt. Dafür wurde zunächst nach VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) der für die vorliegende Fragestellung erforderliche Reaktionsmechanismus ermittelt. Durch Bestimmung der kritischen Verweilzeiten der Luft im Modellgebiet für drei typische Belastungssituationen ließ sich zeigen, dass der einfache Reaktionsmechanismus M1, der die Reaktionen zwischen NO , NO_2 und O_3 beschreibt, für das vorliegende Belastungsniveau ausreichend ist.

Für den Reaktionsmechanismus M1 stehen verschiedene Modellkonzepte zur Abschätzung der NO_2 -Gesamtbelastung zur Verfügung. Zur Festlegung eines geeigneten Modellkonzeptes auf Jahresmittelwertbasis wurden Testrechnungen mit dem Ansatz nach Düring & Bächlin (2009) und mit dem Ansatz nach Romberg et al. (1996) in drei verschiedenen Parametrisierungen durchgeführt. Im Hinblick auf

das in den Modellgebieten vorliegende NO_x -Gesamtbelastungsniveau von im Mittel $40 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit Maximalwerten bis $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde als Ergebnis der Testrechnungen der Romberg-Ansatz in der Parametrisierung nach IVU Umwelt (2002) zur Berechnung der NO_2 -Gesamtbelastung ausgewählt. Mit diesem Ansatz wurde dann auf Basis der NO_x -Gesamtbelastung in den Modellgebieten die NO_2 -Gesamtbelastung sowie die durch die BHKW-bedingten NO_2 -Emissionsänderungen und die durch Kfz-Emissionen erzeugte NO_2 -Zusatzbelastung bestimmt. In Tabelle 1-11 sind die BHKW-bedingten Immissionsänderungen für NO_2 zusammen mit den BHKW-bedingten Immissionsänderungen für NO_x , PM_{10} und NMVOC für ausgewählte Szenarien und die Auswertungsflächen MBF und MBF Straße zusammengefasst. Dabei ist das Szenario 5b dasjenige mit den höchsten BHKW-bedingten Zunahmen für die Stoffe NO_x , NO_2 und NMVOC. Für die Szenarien 3a und 3b wird davon ausgegangen, dass es bis 2020 die wahrscheinlichsten Szenarien sind, wie weiter unten beschrieben.

Insgesamt sind für alle Szenarien die Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau betragsmäßig am größten im Untersuchungsgebiet Berlin und am kleinsten im Untersuchungsgebiet Köln. Innerhalb eines Untersuchungsgebietes ergeben sich aufgrund des Verhältnisses der Windgeschwindigkeiten zueinander die höchsten Immissionsänderungen für die AKTerm Köln, während die Immissionsänderungen für die AKTerm Berlin und Bremen ähnlich hoch sind. Für NO_x und NO_2 sind fast durchgängig (bis auf die Szenarien 4 und 8) und für NMVOC ausschließlich Zunahmen der Immissionsbelastung durch den BHKW-Ausbau zu verzeichnen, für PM_{10} und dem in Tabelle 1-11 nicht aufgeführten $\text{PM}_{2.5}$ hingegen nur Abnahmen. Die geringsten Zunahmen bzw. die größten Abnahmen treten im Szenario 8b auf.

Tabelle 1-11: Immissionsänderung durch BHKW für ausgewählte Szenarien und Auswertungsflächen

Szenario	MBF				MBF Straße			
	NO _x [µg/m³]	NO ₂ [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	NO ₂ [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
Untersuchungsgebiet Berlin								
AKTerm Berlin								
3a	0.22	0.1	0.00	0.05	0.12	0.1	0.00	0.03
3b	0.45	0.3	-0.01	0.11	0.25	0.1	0.00	0.06
5b	11.37	6.1	-0.04	0.94	6.18	3.1	-0.02	0.51
AKTerm Bremen								
3a	0.19	0.1	0.00	0.04	0.13	0.1	0.00	0.03
3b	0.38	0.2	-0.01	0.09	0.26	0.1	0.00	0.06
5b	9.47	5.1	-0.03	0.79	6.38	3.1	-0.02	0.53
AKTerm Köln								
3a	0.40	0.2	-0.01	0.10	0.19	0.1	0.00	0.05
3b	0.81	0.5	-0.02	0.19	0.39	0.2	-0.01	0.09
5b	20.27	10.0	-0.06	1.68	9.79	4.6	-0.03	0.81
Untersuchungsgebiet Bremen								
AKTerm Berlin								
3a	0.11	0.1	0.00	0.03	0.09	0.0	0.00	0.02
3b	0.21	0.1	0.00	0.05	0.18	0.1	0.00	0.04
5b	5.36	3.1	-0.02	0.44	4.58	2.4	-0.01	0.38
AKTerm Bremen								
3a	0.11	0.1	0.00	0.03	0.10	0.1	0.00	0.02
3b	0.23	0.1	0.00	0.05	0.20	0.1	0.00	0.05
5b	5.74	3.3	-0.02	0.48	5.04	2.6	-0.02	0.42
AKTerm Köln								
3a	0.14	0.1	0.00	0.03	0.12	0.1	0.00	0.03
3b	0.28	0.2	-0.01	0.07	0.24	0.1	0.00	0.06
5b	7.23	4.1	-0.02	0.60	6.14	3.1	-0.02	0.51
Untersuchungsgebiet Köln								
AKTerm Berlin								
3a	0.07	0.0	0.00	0.02	0.05	0.0	0.00	0.01
3b	0.13	0.1	0.00	0.03	0.09	0.0	0.00	0.02
5b	3.37	1.5	-0.01	0.28	2.34	1.0	-0.01	0.19
AKTerm Bremen								
3a	0.08	0.0	0.00	0.02	0.05	0.0	0.00	0.01
3b	0.16	0.1	0.00	0.04	0.10	0.0	0.00	0.02
5b	3.88	1.7	-0.01	0.32	2.50	1.1	-0.01	0.21
AKTerm Köln								
3a	0.10	0.0	0.00	0.02	0.07	0.0	0.00	0.02
3b	0.20	0.1	0.00	0.05	0.15	0.1	0.00	0.04
5b	5.10	2.2	-0.02	0.42	3.72	1.6	-0.01	0.31

Die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau erreicht als Flächenmittel über das Untersuchungsgebiet in Berlin und Bremen ca. 50 %, in Köln etwa ein Viertel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die MBF Straße erreicht sie in allen drei Untersuchungsgebieten etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung, und für die MBF ist sie in allen drei Untersuchungsgebieten deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle.

Insgesamt muss bei der Höhe der berechneten NO_x - bzw. NO_2 -Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen berücksichtigt werden, dass die Kfz-Emissionen auf der Grundlage des HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) für das Jahr 2020 berechnet wurden und mittlerweile davon auszugehen ist, dass die im HBEFA 3.2 hinterlegte Prognose der Emissionen für das Jahr 2020 zu optimistisch ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die berechneten NO_x -Emissionen des Kfz-Verkehrs die tatsächlichen NO_x -Emissionen im Jahr 2020 unterschätzen und somit bei NO_x bzw. NO_2 das Verhältnis der Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zur Zusatzbelastung aus Kfz-Emissionen an dieser Stelle überschätzt wird.

Für die abschließende Bewertung der Ergebnisse wurde zunächst durch Variation des Energiestandards der Gebäude und durch Variation der Temperaturverhältnisse in den Modellgebieten die Bandbreite der Emissionsszenarien noch einmal erweitert. Bei den bisher berechneten 16 Szenarien nach Abbildung 1-1 wurde als Energiestandard der Mittelwert über alle Sanierungszustände definiert, und für die Temperaturverhältnisse wurde von einem kalten Jahr mit einer hohen Anzahl Heizgradtage (2 400 Kd bis 2 700 Kd, Fall „max HGT“) ausgegangen. Diese Szenarien wurden unter dem Begriff „Ausgangsszenario“ zusammengefasst. Bei der abschließend durchgeführten Variation wurde als „untere Abschätzung“ des Energiestandards der Gebäude in den Modellgebieten der Mittelwert für Neubauten nach EnEV (2002) angesetzt, als „obere Abschätzung“ wurde der Mittelwert für komplett unsanierte Gebäude verwendet. Als untere Grenze für die Temperaturverhältnisse wurde mit 1 500 Kd die niedrigste Anzahl Heizgradtage in den drei Modellgebieten angesetzt (Fall „min HGT“). Damit ergeben sich zusammen mit dem Ausgangsszenario insgesamt sechs übergeordnete Szenarien, die jeweils aus den 16 Szenarien nach Abbildung 1-1 bestehen.

Die Heizgradtage und der Energiestandard wirken sich auf den für 2020 berechneten Endenergiebedarf der Gebäude in den Modellgebieten aus. Tabelle 1-12 zeigt, wie sich bei Variation der beiden Größen der Endenergiebedarf in den drei Modellgebieten zum Endenergiebedarf im Ausgangsszenario verhält. Die grau markierten Felder entsprechen dem Ausgangsszenario.

Tabelle 1-12: Verhältnis des Endenergiebedarfs in den drei Modellgebieten zum Ausgangsszenario bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtagen; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios

		Berlin		Bremen		Köln	
Energiestandard	Einheit	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT
Mittelwert	[%]	63.2%	100.0%	62.8%	100.0%	68.1%	100.0%
untere Abschätzung	[%]	46.5%	72.7%	43.3%	67.7%	46.5%	67.5%
obere Abschätzung	[%]	77.4%	124.9%	73.2%	118.5%	82.1%	122.0%

Da der Endenergiebedarf linear in die Berechnung der Emissionen eingeht, resultiert eine Änderung des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten in einer gleich hohen Änderung der Emissionen sowohl der einzelnen Quellgruppen (BHKW, Spitzenlastkessel, vermiedene Emissionen) als auch insgesamt der BHKW-bedingten Emissionsänderungen. Dies gilt mit geringen Genauigkeitseinbußen auch für NO_2 . Entsprechend konnten die Werte der Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau, die für das Ausgangsszenario bestimmt wurden (Tabelle 1-11), mit Hilfe der in Tabelle 1-12 angegebenen Verhältniszahlen auf die

übergeordneten Szenarien übertragen werden. Der maximal ungünstige Fall ergibt sich bei der Annahme komplett unsanierter Gebäude im Modellgebiet („obere Abschätzung“) und der oberen Grenze der Heizgradtage. In diesem Fall erhöht sich die Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau um 19% bis 25%. Im günstigsten Fall bei Annahme eines mittleren Energiestandards entsprechend dem von Neubauten nach EnEV (2002) („untere Abschätzung“) und der unteren Grenze der Heizgradtage reduziert sich die BHKW-bedingte Immissionsänderung um mehr als die Hälfte. Diese beiden Grenzen geben die Spannbreite der BHKW-bedingten Immissionsänderung durch Variation des Endenergiebedarfs vor, in die sich die Ergebnisse der anderen Variationen einsortieren.

In den Szenarien wurden jeweils unterschiedlich hohe Substitutionsgrade (Zubau von BHKW) mit unterschiedlich hohen Emissionsfaktoren kombiniert. Zur Bewertung der erzielten Ergebnisse wurde daher die Wahrscheinlichkeit für die Substitutionsgrade, für die Emissionsfaktoren und für die zugrunde gelegten Szenarien diskutiert. Hinsichtlich des Substitutionsgrades wird unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ein Zubau von Mini-BHKW über das Minimalszenario hinaus als sehr unwahrscheinlich angesehen. Aus der Diskussion der Emissionsfaktoren geht hervor, dass diese letztlich von den technischen Anforderungen abhängen, die man für die Mini-BHKW formuliert. Spätestens mit dem Grenzwert nach EU-Verordnung (813/2013) von 240 mg/kWh ab 2018 sind hohe Emissionsfaktoren für NO_x von 327.6 mg/kWh, wie im Maximalszenario vorgegeben, im Mittel bis 2020 sehr unwahrscheinlich. Unter der weiteren Annahme, dass Mini-BHKW auch zukünftig überwiegend dort zugebaut werden, wo auch heute schon Erdgas verfügbar ist, und damit vor allem auch die Wärme aus erdgasbetriebenen Heizkesseln verdrängt wird, ergibt sich, dass auf nationaler Ebene das Szenario 3 und auf lokaler Ebene die Szenarien 3a und 3b am wahrscheinlichsten sind.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde eine Bewertung der Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Hinblick auf die z. Zt. gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der 39. BImSchV vorgenommen. Für SO₂ wurden für alle untersuchten Szenarien ausschließlich Minderemissionen ermittelt. Für PM₁₀ und PM_{2.5} wurden für alle untersuchten Szenarien ausschließlich Abnahmen der Immissionsbelastung durch den Einsatz von BHKW ermittelt. Daher wurden emissionsseitig nur NO_x und NMVOC und immissionsseitig nur NO₂ als grenzwertrelevante Größe betrachtet.

Die 39. BImSchV legt für die Bundesrepublik Deutschland Emissionshöchstmengen u. a. für NO_x und NMVOC fest. Diese Höchstmengen dürfen ab dem Jahr 2011 nicht mehr überschritten werden. Im ungünstigsten Fall des Szenarios 5 liegen die berechneten Mehremissionen durch den BHKW-Ausbau auf nationaler Ebene für NO_x bei 0.25% und für NMVOC deutlich unter 0.1% der vorgegebenen Emissionshöchstmengen, sie können damit als nicht relevant eingestuft werden.

Immissionsseitig wurde auf lokaler Ebene für den NO₂-Jahresmittelwert der Grenzwert von 40 µg/m³ gemäß 39. BImSchV betrachtet. Im ungünstigsten Fall des Szenarios 5b ergeben sich sowohl für die MBF als auch für die MBF Straße BHKW-bedingte Emissionsänderungen, die zusammen mit einer hohen Hintergrundbelastung bzw. einer entsprechenden Belastung im Straßenraum durchaus wesentlich zu Grenzwertüberschreitungen betragen können. Wie zuvor diskutiert, ist das Eintreten der Szenarios 5 bis 8 (Maximalszenario des Zubaus von Mini-BHKW) jedoch sehr unwahrscheinlich. Im Rahmen der wahrscheinlichsten Szenarien 3a und 3b bzw. insgesamt im Rahmen der Szenarien 1 bis 4 (Minimalszenario des Zubaus von BHKW) ist kein relevanter Beitrag der Mini-BHKW zur NO₂-Gesamtbelastung für die MBF oder die MBF Straße zu erwarten. Tabelle 1-13 fasst die Ergebnisse der Bewertung im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV zusammen.

Tabelle 1-13: Ergebnisse der Bewertung der BHKW-bedingten Emissions- und Immissionsänderungen im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV

	Szenarien 1 - 4	Szenarien 5 - 8
--	-----------------	-----------------

	Szenarien 1 - 4	Szenarien 5 - 8
Wahrscheinlichkeit	hoch	sehr gering
Emissionsänderungen NO _x , NMVOC nationale Ebene	nicht relevant	nicht relevant
Immissionsänderungen NO ₂ MBF	nicht relevant	zusammen mit einer hohen Hintergrundbelastung ggf. relevant
Immissionsänderungen NO ₂ MBF Straße	nicht relevant	zusammen mit einer hohen Belastung im Straßenraum ggf. relevant

2 Summary

The use of combined heat and power plants (CHP) may reduce the primary energy demand and the CO₂ emissions caused by power and heat supply. Further extension of the use of CHP systems is desirable for climate protection. But the use of CHPs has also negative aspects, as they emit harmful substances (NO_x, dust, formaldehyde) directly into people's living zones.

For this reason, the project „Effects of a decentralised energy supply by means of combined heat and power plants on air quality in urban agglomerations“ was initiated by the Federal Environment Agency (UBA). Within the framework of this project, the emission of air pollutants produced by CHPs was to be estimated on a national scale for Germany and on a local scale for selected urban agglomerations, and the dispersion of those substances was to be modelled. Only CHPs with an electric power of less than 50 kW (kW_{el}), so called Mini-CHPs, were to be considered. On the local scale, the traffic-induced emissions and concentration loads were to be calculated as well in order to compare them with the changes in emissions and concentrations due to the use of Mini-CHPs. Emissions and concentration loads of both source groups were then combined to assess the extent to which the use of Mini-CHPs could possibly contribute to the exceedance of limit values for air pollutants in street areas. For these purposes, each three local modelling domains of 1 x 1 km² were considered.

The first step covered the calculation of the emissions due to the use of Mini-CHPs and of those emissions not being produced anymore in power generation or by conventional gas or oil boilers due to implementation of Mini-CHPs (“avoided emissions”). This was done on national scale for the reference year 2020. The air pollutants NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, and NMVOC were considered. NMVOC is replacing the originally designated formaldehyde here since the base data on emission factors were slightly better for NMVOC than for formaldehyde. Emissions were calculated on a national scale for eight scenarios in total (Table 2-1). The scenarios differ in their level of substitution with Mini-CHPs, their estimate of the CHP emission factors and the fuel for the replaced heating systems (fuel oil or fuel gas). The high level of CHP substitution is referred to as “maximum scenario”, the low level of CHP substitution as “minimum scenario”.

Table 2-1: Emission scenarios on the national scale

Name	Description
minimum scenario (low CHP implementation):	
Scenario 1:	high estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional gas boilers
Scenario 2:	high estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional oil boilers
Scenario 3:	low estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional gas boilers
Scenario 4:	low estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional oil boilers
maximum scenario (high CHP implementation):	
Scenario 5:	high estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional gas boilers
Scenario 6:	high estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional oil boilers
Scenario 7:	low estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional gas boilers
Scenario 8:	low estimate of CHP emission factors, CHP replacing conventional oil boilers

To assess the emissions in the reference year 2020, the amount of power and heat produced by the Mini-CHPs in 2020 according to the maximum and the minimum scenario was predicted first. The prediction was based on a list by the Federal Office for Economic Affairs and Export Control (BAFA) on CHP permits according to the law on combined heat and power generation (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz KWKG). The list distinguishes four different power ranges in Mini-CHPs (up to 2 kW_{el}, 2-10 kW_{el}, 10-20 kW_{el} and 20-50 kW_{el}). It lists the installed CHP units with start-up date, location (postal code) and mean electrical power for each power range. For the minimum scenario, the increase of installed CHP units in 2014-2019 is presumed to be the same as in 2013. For the maximum scenario, the amount of power produced with Mini-CHPs in 2020 was set to be 9 100 GWh according to Nitsch et al. (2012). The runtime of a Mini-CHP was presumed to be 16 years. Table 2-2 shows the calculated amounts of electric power and heat for the year 2020.

Table 2-2: Amounts of power and heat on the national scale calculated for 2020

power range (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	sum
minimum scenario (increase of installed CHP units in 2014-2019 as in 2013)						
number of CHP units, sum 2004-2019		14 289	34 941	12 152	7 378	68 760
amount of power 2020	GWh	52.5	740.7	1 087.6	1 560.4	3 441.3
amount of heat 2020	GWh	150.0	1 677.2	2 491.2	3 098.8	7 417.1
maximum scenario (according to Nitsch et al., 2012)						
number of CHP units, sum 2004-2019		47 983	80 540	33 436	19 970	181 929
amount of power 2020	GWh	176.3	1 707.5	2 992.5	4 223.7	9 100.0
amount of heat 2020	GWh	503.8	3 865.9	6 854.3	8 387.5	19 611.6

The emission factors of the considered substances were provided by the contracting authority. A high and a low estimate of the CHP emission factors were set in compliance with the contracting authority to account for the considered scenarios according to Table 2-1. Only natural gas-powered Mini-CHP were included. Other types of gases remained disregarded, according to prior agreement with the contracting authority, because they will prospectively play an insufficient role in numbers when speaking of power ranges up to 50 kW_{el}.

Based on the calculated amounts of power and heat, the resulting fuel input and the provided emission factors, the emissions induced by CHPs and the emissions not being produced anymore in power generation or by conventional gas or oil boilers due to implementation of Mini-CHPs ("avoided emissions") were calculated for the considered scenarios for the reference year 2020. Finally, the changes in emissions due to the use of CHPs were calculated as the difference between the emissions induced by CHPs and the avoided emissions.

Table 2-3 summarizes the changes in emissions due to the use of CHPs for the considered pollutants. It shows the results for the reference year 2020 for the eight scenarios on the national scale. Negative values represent savings of emissions. As it was specified that natural gas-powered Mini-CHPs do not emit SO₂, PM10 and PM2.5 (at least not in relevant amounts), only savings of emissions due to avoided emissions of power generation and conventional boilers were calculated for these pollutants. NO_x emissions increase due to the use of CHPs if the high estimate of CHP emission factors is applied while the low estimate of CHP emission factors leads to savings of NO_x emissions. NMVOC emissions increase in most scenarios due to the

use of CHPs. Savings in NMVOC emissions are solely calculated with the low estimate of CHP emission factors while replacing oil boilers with CHPs.

Table 2-3: Changes in emissions due to CHP implementation on the national scale calculated for 2020

estimate of CHP emission factors	avoided emissions	Scenario	NO _x [t/a]	SO ₂ [t/a]	PM10 [t/a]	PM2.5 [t/a]	NMVOC [t/a]
minimum scenario							
high	gas	1	1018.60	-1215.85	-77.73	-70.84	145.81
	oil	2	454.37	-3071.39	-109.98	-103.10	113.23
low	gas	3	-1395.70	-1215.85	-77.73	-70.84	16.51
	oil	4	-1959.93	-3071.39	-109.98	-103.10	-16.08
maximum scenario							
high	gas	5	2659.82	-3215.12	-205.53	-187.33	383.19
	oil	6	1167.96	-8121.34	-290.81	-272.61	297.04
low	gas	7	-3702.15	-3215.12	-205.53	-187.33	42.47
	oil	8	-5194.01	-8121.34	-290.81	-272.61	-43.69

The results in Table 2-3 represent the predicted changes in emissions due to the use of CHPs for the year 2020 on the national scale. To assess the changes in emissions due to the use of CHPs on the local scale for the three modelling domains and for dispersion modelling on the national scale, reasonable assumptions regarding the spatial distribution of Mini-CHPs in Germany in 2020 were to be made.

A downscaling approach was developed for that purpose. As a starting point, the spatial distribution and temporal development of Mini-CHPs in Germany until 2013 according to the BAFA list was analysed. Results showed that the number of Mini-CHP in use as well as their distribution to the power ranges depend to some extent on the federal state. This is i. a. due to the fact that the federal states differ in their policies to support Mini-CHPs. Additionally, city states like Berlin, Hamburg and Bremen indicate that the structure of building types (e.g. the proportion of the amount of 1- and 2-flat houses to the amount of housing blocks) has some influence on the distribution of Mini-CHPs to the power ranges.

Based on these findings, the dependency of the data provided by the BAFA list (number of installed Mini-CHP units in 2013, increase of installed Mini-CHP units 2012 to 2013) on commonly available and easily accessible parameters like the number of inhabitants, the number of flats, living floor space etc. was analysed on a postal code level. An overview on the investigated relationships is given in Table 2-4. The analysis' results revealed no dependencies on the tested parameters neither for the number of installed Mini-CHPs nor for the increase of the installed Mini-CHPs. Hence, an alternative approach for the spatial distribution of Mini-CHPs on a postal code level was chosen for the year 2020. This approach accounts for the dependency on the federal state (support policies) by predicting the number of annually installed Mini-CHPs per federal state for each year between 2014 and 2019 based on the predicted number of annually installed Mini-CHPs between 2014 and 2019 on the national scale according to the minimum and the maximum scenario and on the known increase in Mini-CHPs per federal state in 2013. Thus, it was implicitly assumed that the support policies of the federal states concerning Mini-CHPs will not change until 2020. The number of Mini-CHPs assigned to each federal state was distributed to the power ranges according to their original distribution in 2013. Within each federal state, the annually assigned number of installed Mini-CHPs was randomly distributed to the postal code areas. As a result, a distribution of the Mini-CHPs installed in 2020 was available on a postal code level for the minimum and the maximum scenario.

Table 2-4: List of probed relationships (parameters und dependant quantities)

dependant quantity	parameters
number of installed Mini-CHP units in 2013 increase of installed Mini-CHP units 2012 to 2013	number of inhabitants number of flats living floor space number of buildings with residential space number of 1- and 2-flat houses number of houses with 3 and more flats

In the next step, the results on a postal code level were scaled further down to the desired level of the modelling domain. The amount of heat produced by CHPs in a modelling domain was calculated as a percentage of the heat requirement of the modelling domain with respect to the considered scenarios. The percentages were estimated based on national mean values and values at postal code level. At the national level, it has been estimated that the percentage of heat generated by CHPs in 2020 will amount to 1 % of the heat requirement in Germany predicted for 2020 in the minimum scenario and to 4 % in the maximum scenario. At postal code level, the amount of heat produced by CHPs was evaluated on the basis of the predicted distribution of the installed CHPs for 1 720 urban postal code areas in communities with more than 50 000 inhabitants and related to the heat requirement of the Berlin modelling domain. As a result, the amount of heat produced by CHPs at postal code level was calculated to 4 % of the heat requirement of the Berlin modelling domain for the minimum scenario and to 6 % for the maximum scenario.

The amount of power and heat as well as the pollutant emissions produced by Mini-CHPs on a local scale were to be assessed for urban areas with a high and with a medium proportion of Mini-CHPs. Based on the above evaluations, the amount of heat generated by Mini-CHPs in the modelling domain was defined as a percentage of the heat requirement according to Table 2-5. The values for urban areas with a medium proportion of Mini-CHPs correspond to the national mean values in the minimum and maximum scenario. The values for urban areas with a high proportion of Mini-CHPs are based on the maximum values determined at postal code level.

Table 2-5: Amount of heat produced by CHPs in a modelling domain as a percentage of the heat requirement

Scenario	proportion of heat produced by CHPs in a modelling domain	percentage of the heat requirement
minimum scenario	medium	1 %
	high	2 %
maximum scenario	medium	4 %
	high	8 %

This leads to 16 emission scenarios on the local scale that are displayed in Figure 2-1 along with the scenarios on the national scale. In addition, the distribution of the Mini-CHPs to the power ranges assigned to scenarios with a medium proportion of Mini-CHPs differs from the distribution assigned to scenarios with a high proportion of Mini-CHPs. Both distributions of the Mini-CHPs to the power ranges were derived from the respective distributions in postal code areas in communities with more than 50 000 inhabitants.

Figure 2-1: Summary of the emission scenarios on the national and on the local scale

	emissions CHP	avoided emissions power	avoided emissions heat	percentage of heat requirement covered with CHP	scenario name
Minimum scenario: low CHP implementation	emission factors high estimate	emission factors German fuel mix for power supply	emission factors gas boilers	medium percentage of CHP: 1 % power range distribution: A	Scenario 1a
				high percentage of CHP: 2 % power range distribution: B	Scenario 1b
			emission factors oil boilers	medium percentage of CHP: 1 % power range distribution: A	Scenario 2a
				high percentage of CHP: 2 % power range distribution: B	Scenario 2b
	emission factors low estimate	emission factors German fuel mix for power supply	emission factors gas boilers	medium percentage of CHP: 1 % power range distribution: A	Scenario 3a
				high percentage of CHP: 2 % power range distribution: B	Scenario 3b
			emission factors oil boilers	medium percentage of CHP: 1 % power range distribution: A	Scenario 4a
				high percentage of CHP: 2 % power range distribution: B	Scenario 4b
Maximum scenario: high CHP implementation	emission factors high estimate	emission factors German fuel mix for power supply	emission factors gas boilers	medium percentage of CHP: 4 % power range distribution: A	Scenario 5a
				high percentage of CHP: 8 % power range distribution: B	Scenario 5b
			emission factors oil boilers	medium percentage of CHP: 4 % power range distribution: A	Scenario 6a
				high percentage of CHP: 8 % power range distribution: B	Scenario 6b
	emission factors low estimate	emission factors German fuel mix for power supply	emission factors gas boilers	medium percentage of CHP: 4 % power range distribution: A	Scenario 7a
				high percentage of CHP: 8 % power range distribution: B	Scenario 7b
			emission factors oil boilers	medium percentage of CHP: 4 % power range distribution: A	Scenario 8a
				high percentage of CHP: 8 % power range distribution: B	Scenario 8b
national scale				local scale	

Source: Author's illustration (IVU Umwelt GmbH)

For emission calculations and dispersion modelling on a local scale, three modelling domains of about 1 x 1 km² each were chosen in compliance with the contracting authority. The modelling domains are located in Berlin, Bremen and Köln, respectively. To assess the changes in emissions due to the use of CHPs for the three modelling areas, first of all the heat requirement was estimated for that part of each modelling domain that was going to be analysed and that is referred to as analysis domain. The heat requirement was derived from the results of a statistical survey dependent on the structure of the buildings in each analyses domain. To account for potentially complementary effects of high heat requirement and adverse dispersion conditions, the heat requirement was calculated for the meteorological reference year 2010. This year was chosen because it was the coldest year between 2000 and 2014 on the local and the national scale. The energy standard of the buildings was set to the mean of all states of thermal insulation. Table 2-6 shows the calculated heat requirement for the three analysis domains.

Table 2-6: Final energy demand for heating and hot water within the three analysis domains

	Berlin	Bremen	Köln
final energy demand [MWh/a]	177 729	141 039	101 056

The amount of emissions induced by the calculated final energy demand was determined for the three analysis domains. For economic reasons, a CHP is usually designed such that it does not fully cover the heat demand of the attached consumers. The remaining energy demand is typically provided by a peak demand

boiler. Hence, in contrast to the national scale, emissions caused by peak demand boilers are taken into account on the local scale. For the avoided emissions, only emissions from heat production were taken into account on the local scale, considering that electrical power is usually not generated locally within the modelling area. The changes in emissions due to the use of CHPs on the local scale were then calculated by summing up the emissions induced with CHPs and with peak demand boilers and by subtracting the avoided emissions from heat production. The temporal distribution of the emissions for dispersion modelling was calculated for each analysis domain depending on the annual cycle of the temperature, separately for each of the source groups CHP, peak demand boiler and avoided emissions. Traffic-induced emissions were calculated for the relevant streets within each modelling domain according to HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014). The temporal distribution of the traffic emissions is based on traffic cycles provided by the Bavarian emission inventory (IER, 2005).

Table 2-7 to Table 2-9 compile the changes in emissions due to the use of CHPs on the local scale for the three analysis domains and the 16 scenarios considered. As it was specified that natural gas-powered Mini-CHPs do not emit SO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} and as the emissions avoided by replacing conventional boilers are considerably higher than those of the peak demand boilers, only savings of emissions due to the implementation of CHPs were calculated for these pollutants. Table 2-10 shows the traffic-induced emissions calculated for the three analysis domains. The NO₂ emissions displayed here represent the direct emissions of NO₂ determined with HBEFA 3.2.

Table 2-7: Berlin, emission changes due to CHP implementation in the analysis domain

estimate of CHP emission factors	avoided emissions	Scenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
minimum scenario							
high	gas	1a	684.6	-3.6	-2.1	-2.1	57.0
		1b	1 382.6	-7.1	-4.3	-4.3	114.9
	oil	2a	491.5	-638.7	-13.2	-13.2	45.8
		2b	996.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	92.6
low	gas	3a	108.1	-3.6	-2.1	-2.1	26.1
		3b	220.9	-7.1	-4.3	-4.3	52.7
	oil	4a	-85.0	-638.7	-13.2	-13.2	15.0
		4b	-165.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	30.4
maximum scenario							
high	gas	5a	2 738.5	-14.2	-8.5	-8.5	227.9
		5b	5 530.5	-28.4	-17.1	-17.1	459.7
	oil	6a	1 966.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	183.3
		6b	3 985.4	-5 109.8	-105.4	-105.4	370.4
low	gas	7a	432.6	-14.2	-8.5	-8.5	104.4
		7b	883.5	-28.4	-17.1	-17.1	210.8
	oil	8a	-340.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	59.8
		8b	-661.6	-5 109.8	-105.4	-105.4	121.5

Table 2-8: Bremen, emission changes due to CHP implementation in the analysis domain

estimate of CHP emission factors	avoided emissions	Scenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
minimum scenario							
high	gas	1a	543.3	-2.8	-1.7	-1.7	45.2
		1b	1 097.2	-5.6	-3.4	-3.4	91.2
	oil	2a	390.0	-506.9	-10.5	-10.5	36.4
		2b	790.7	-1 013.7	-20.9	-20.9	73.5
low	gas	3a	85.8	-2.8	-1.7	-1.7	20.7
		3b	175.3	-5.6	-3.4	-3.4	41.8
	oil	4a	-67.5	-506.9	-10.5	-10.5	11.9
		4b	-131.3	-1 013.7	-20.9	-20.9	24.1
maximum scenario							
high	gas	5a	2 173.2	-11.3	-6.8	-6.8	180.9
		5b	4 388.9	-22.6	-13.5	-13.5	364.8
	oil	6a	1 560.1	-2 027.5	-41.8	-41.8	145.5
		6b	3 162.7	-4 055.0	-83.6	-83.6	294.0
low	gas	7a	343.3	-11.3	-6.8	-6.8	82.9
		7b	701.1	-22.6	-13.5	-13.5	167.3
	oil	8a	-269.8	-2 027.5	-41.8	-41.8	47.5
		8b	-525.0	-4 055.0	-83.6	-83.6	96.5

Table 2-9: Köln, emission changes due to CHP implementation in the analysis domain

estimate of CHP emission factors	avoided emissions	Scenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
minimum scenario							
high	gas	1a	389.3	-2.0	-1.2	-1.2	32.4
		1b	786.2	-4.0	-2.4	-2.4	65.3
	oil	2a	279.5	-363.2	-7.5	-7.5	26.1
		2b	566.5	-726.4	-15.0	-15.0	52.7
low	gas	3a	61.5	-2.0	-1.2	-1.2	14.8
		3b	125.6	-4.0	-2.4	-2.4	30.0
	oil	4a	-48.3	-363.2	-7.5	-7.5	8.5
		4b	-94.0	-726.4	-15.0	-15.0	17.3
maximum scenario							
high	gas	5a	1 557.1	-8.1	-4.9	-4.9	129.6
		5b	3 144.7	-16.2	-9.7	-9.7	261.4
	oil	6a	1 117.8	-1 452.7	-30.0	-30.0	104.2
		6b	2 266.1	-2 905.4	-59.9	-59.9	210.6
low	gas	7a	246.0	-8.1	-4.9	-4.9	59.4
		7b	502.4	-16.2	-9.7	-9.7	119.8
	oil	8a	-193.3	-1 452.7	-30.0	-30.0	34.0
		8b	-376.2	-2 905.4	-59.9	-59.9	69.1

Table 2-10: Traffic emissions in the analysis domains, reference year 2020

	Berlin	Bremen	Köln
NO _x [kg/a]	6 590.2	7 062.1	10 052.2
NO ₂ [kg/a]	1 474.7	1 688.9	2 292.8
SO ₂ [kg/a]	20.5	23.5	30.4
PM10 [kg/a]	1 017.9	1 271.5	2 037.6
PM2.5 [kg/a]	445.5	565.3	610.5
NMHC [kg/a]	4 982.7	2 183.2	2 723.4

The second step was to calculate the contribution of the Mini-CHPs to the concentration load for the calculated emission scenarios on a national and on a local scale. In urban areas, the total concentration of air pollutants is defined as the sum of regional background concentration, urban background concentration and – in hot-spot areas – additional concentration. Following this scheme, the contributions of Mini-CHPs to the background and to the additional concentration in the modelling domain were determined separately.

On a national scale, the chemical transport model REM-CALGRID (RCG) was used to calculate the concentration load due to Mini-CHPs. TRAMPER, a system for meteorological analysis of observations, was used to process the meteorological data and provide the three-dimensional input fields for the RCG dispersion calculations. The meteorological reference year was set to 2010. As a start, a basic model run was performed using the predicted emission data for the reference year 2020 based on the “Current Policy

Scenario" (CPS2020). The emissions calculated for the eight national scenarios were then included in the CPS2020 emission data base. For this purpose, the scenario emissions were distributed on the postal code level according to the spatial distribution of the Mini-CHPs following the downscaling approach outlined above. The emissions were then reallocated to the RCG modelling grid with a resolution of about ca. 7 x 8 km² based on the fraction of the postal code areas in each modelling grid area. The share of the emission changes due to the use of Mini-CHPs in the total emissions according to CPS2020 is small. The maximum share for Germany depending on the scenario is 0.5 % for NO_x, 2.2 % for SO₂, 0.1 % for PM₁₀, 0.3 % for PM_{2.5} and less than 0.1 % for NMVOC.

RCG dispersion modelling was carried out for the eight national scenarios with modified emission data. The impact of the emission changes due to the use of CHPs on background concentrations was then calculated as the difference between each scenario run and the base run. For NO_x and NO₂, increases and decreases of the concentration load were calculated due to the use of CHPs, depending on the scenario. For PM₁₀ and PM_{2.5}, only decreases were calculated. The absolute changes in concentration on the national scale due to the use of CHPs are for the most part significantly below 0.5 µg/m³ and thus are considered to be negligibly small.

On a local scale, dispersion modelling was carried out with the Lagrangian particle model LASAT for the substances NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC. A library of wind and turbulence fields was calculated for each of the modelling domains with the microscale flow and dispersion modell MISKAM. The library was then used as meteorological input for LASAT, as well as meteorological time series for the three meteorological stations of Berlin-Tempelhof, Bremen and Köln-Bonn for the meteorological reference year 2010, provided by the German Weather Service (DWD).

For dispersion modelling, the emissions of CHPs, peak demand boilers and gas or oil fuelled boilers as well as the road traffic emissions were treated as independent emission source groups. Emissions of CHPs and boilers were placed at the chimney tops of all buildings producing emissions. With respect to the scalability of the dispersion modelling results it was assumed that each chimney emits the same proportion of CHP, peak demand boiler and avoided emissions.

Dispersion modelling was performed for each of the three modelling areas with each of the three meteorological time series for the first out of the 16 local scenarios. For analysis purposes, area mean values of the modelling results were calculated over the analysis domain as well as over two types of maximum loaded areas, MLA and MLA Street. A maximum loaded area (MLA) was defined as being a coherent area of 200 m² showing the highest concentration load due to the use of CHPs within the analysis domain. The MLA identified in such a way is usually located in an inner courtyard. Since critical total concentration values are more likely to occur in street areas, a second MLA has been defined in street areas and called MLA Street.

For the remaining 15 scenarios, the mean values of these three evaluation areas were scaled for each source group specifically with the ratio of the emissions of the respective scenario to the emissions of the explicitly calculated scenario. As a result, area mean values for the three defined evaluation areas were available for all three modelling domains, all three meteorological time series and all 16 local scenarios. The contribution of the emission changes due to the use of Mini-CHPs to the local additional concentration load was then calculated summing up the local concentration load due to Mini-CHPs and peak demand boilers and by subtracting the local concentration load due to the avoided emissions in heat production.

As a secondary aspect of local scale modelling it was to be analysed how emissions outside the analysis domain impact the concentration distribution within the analysis domain and how far sources around the analysis domain are to be included in the modelling domain, till their influence on the concentration distribution within the analysis domain itself is negligibly small. For this purpose, separate studies were carried out. The results show that for all source groups considered, the modelling domain should be at least 200 m, better 300 m larger in each direction than the analysis domain. Emission sources that are located

more than 300 m remote from the analysis domain do not show any impact on the concentration distribution within the analysis domain that could not be included with a background concentration value being constant throughout the modelling domain.

The contributions of the emission changes due to the implementation of CHPs to the background concentration and to the local additional concentration in the modelling domains were aggregated to the total change in concentration due to the implementation of CHPs. When aggregating, it should be considered that the emissions applied locally in the modelling domain have already been taken into account in dispersion modelling on the national scale. To avoid double counting of these emission, the contribution of the local emissions to the background concentration was assessed. For this purpose, RCG dispersion modelling with modified emission data sets was carried out for six selected local scenarios. The emissions of CHPs, peak demand boilers, conventional boilers and vehicle emissions locally set in each modelling domain were included in the RCG model's emissions data for the selected scenarios in the grid cells containing Berlin, Bremen and Köln, respectively. The contribution of the local emissions to the background concentration was then derived for each of the six selected local scenarios from the difference between the results of the modified and the corresponding unmodified scenario run.

Results showed that the contribution of the local emission changes due to the use of CHPs to the regional change in concentrations due to the use of CHPs can be considered to be very small. Thus, it was set to zero for further considerations. Similarly, the changes in concentration due to the use of CHPs on the national scale are for the most part significantly below $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and thus, were set to zero for further considerations as well. Hence, the total change in concentration due to the use of CHPs was set equal to the local change in concentrations due to the use of CHPs.

The LASAT dispersion model used for local modelling was developed for the simulation of the dispersion of non-reactive substances and thus only simulates first-order chemical reactions for single substances. Since NO_2 is a chemically reactive substance and subject to a series of reactions with different substances in the atmosphere, the dispersion modelling with LASAT was carried out for NO_x . Modelling results provided the local additional NO_x concentration due to CHP-induced emission changes and to traffic-induced emissions.

In a post processing step, the local additional NO_2 concentration was then calculated externally. For this purpose, the reaction mechanism relevant for the present problem was identified in accordance with VDI guideline 3783 part 19 (KRdL, 2017). By determining the critical residence times of the air in the modelling domains for three typical concentration situations, it was shown that the simple reaction mechanism M1, which describes the reactions between NO , NO_2 and O_3 , is sufficient for the concentration levels typical for the modelling domains.

For the reaction mechanism M1, several model concepts are available for estimating the total NO_2 concentration. In order to identify a suitable model concept on an annual average value basis, test calculations were carried out using the Düring & Bächlin (2009) approach and the approach according to Romberg et al. (1996) in three different parameterisations. With respect to the typical total NO_x concentration level of $40 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the modelling domains and maximum values of up to $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the Romberg approach using the parameterisation according to IVU Umwelt (2002) was selected as the result of the test calculations for estimating the total NO_2 concentration. This approach was then used to calculate the total NO_2 concentration in the modelling areas based on the total NO_x concentration as well as to estimate the NO_2 additional concentration due to CHP-induced emission changes and to traffic-induced emissions, respectively. Table 2-11 summarizes the changes in concentrations due to the use of CHPs for NO_2 along with NO_x , PM_{10} and NMVOC for selected scenarios and the evaluation areas MLA and MLA Street. Scenario 5b is the scenario with the highest increases due to the implementation of CHPs for the substances NO_x , NO_2 and NMVOC . Scenarios 3a and 3b are expected to be the most likely scenarios by 2020, as described below.

For all scenarios, the absolute changes in concentration due to the use of CHPs are largest in the Berlin analysis domain and the smallest in the Köln analysis domain. Within the analysis domain of each city, the largest changes in concentration are found when using the meteorological time series of Köln while the meteorological time series of Berlin and Bremen result in similar changes in concentration. This is due to the proportion of the wind speeds of the three meteorological time series to each other.

For NO_x and NO_2 , almost all scenarios (except for scenarios 4 and 8) and for NMVOC, all scenarios lead to increases in concentration load due to the implementation of CHPs whereas for PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, which is not listed in Table 2-11, all scenarios lead to decreases. The smallest increases and the largest decreases occur in scenario 8b.

Table 2-11: Concentration changes due to CHP implementation for chosen scenarios and evaluation areas

Scenario	MLA				MLA Street			
	NO _x [µg/m ³]	NO ₂ [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]	NO _x [µg/m ³]	NO ₂ [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]
Analysis domain: Berlin								
meteorological time series: Berlin								
3a	0.22	0.1	0.00	0.05	0.12	0.1	0.00	0.03
3b	0.45	0.3	-0.01	0.11	0.25	0.1	0.00	0.06
5b	11.37	6.1	-0.04	0.94	6.18	3.1	-0.02	0.51
meteorological time series: Bremen								
3a	0.19	0.1	0.00	0.04	0.13	0.1	0.00	0.03
3b	0.38	0.2	-0.01	0.09	0.26	0.1	0.00	0.06
5b	9.47	5.1	-0.03	0.79	6.38	3.1	-0.02	0.53
meteorological time series: Köln								
3a	0.40	0.2	-0.01	0.10	0.19	0.1	0.00	0.05
3b	0.81	0.5	-0.02	0.19	0.39	0.2	-0.01	0.09
5b	20.27	10.0	-0.06	1.68	9.79	4.6	-0.03	0.81
Analysis domain: Bremen								
meteorological time series: Berlin								
3a	0.11	0.1	0.00	0.03	0.09	0.0	0.00	0.02
3b	0.21	0.1	0.00	0.05	0.18	0.1	0.00	0.04
5b	5.36	3.1	-0.02	0.44	4.58	2.4	-0.01	0.38
meteorological time series: Bremen								
3a	0.11	0.1	0.00	0.03	0.10	0.1	0.00	0.02
3b	0.23	0.1	0.00	0.05	0.20	0.1	0.00	0.05
5b	5.74	3.3	-0.02	0.48	5.04	2.6	-0.02	0.42
meteorological time series: Köln								
3a	0.14	0.1	0.00	0.03	0.12	0.1	0.00	0.03
3b	0.28	0.2	-0.01	0.07	0.24	0.1	0.00	0.06
5b	7.23	4.1	-0.02	0.60	6.14	3.1	-0.02	0.51
Analysis domain: Köln								
meteorological time series: Berlin								
3a	0.07	0.0	0.00	0.02	0.05	0.0	0.00	0.01
3b	0.13	0.1	0.00	0.03	0.09	0.0	0.00	0.02
5b	3.37	1.5	-0.01	0.28	2.34	1.0	-0.01	0.19
meteorological time series: Bremen								
3a	0.08	0.0	0.00	0.02	0.05	0.0	0.00	0.01
3b	0.16	0.1	0.00	0.04	0.10	0.0	0.00	0.02
5b	3.88	1.7	-0.01	0.32	2.50	1.1	-0.01	0.21
meteorological time series: Köln								
3a	0.10	0.0	0.00	0.02	0.07	0.0	0.00	0.02
3b	0.20	0.1	0.00	0.05	0.15	0.1	0.00	0.04
5b	5.10	2.2	-0.02	0.42	3.72	1.6	-0.01	0.31

Considering the area mean values over the analysis domain, the NO_x changes in concentration due to the implementation of CHPs reach approx. 50 % of the corresponding traffic-induced additional concentration in Berlin and Bremen, while they reach approx. 25 % of the corresponding traffic-induced additional concentration in Köln. For the MLA Street, they reach about one third of the corresponding traffic-induced additional concentration in all three analysis domains, and for the MLA, they are significantly higher in all three analysis domains than the traffic-induced additional concentration at the same location.

However, when considering the level of the calculated traffic-induced NO_x and NO_2 additional concentration it should be kept in mind that the traffic-induced emissions have been calculated based on HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) for 2020. Meanwhile, there is some evidence that the values predicted for 2020 with HBEFA 3.2 may be too optimistic. Hence, it is to be assumed that the calculated traffic-induced NO_x emissions underestimate the actual NO_x emissions in 2020 and that the ratio of the CHP-induced changes in concentration to the traffic-induced additional concentration is overestimated for NO_x and NO_2 .

For the final evaluation of the results, the range of emission scenarios was extended again by varying the energy standard of the buildings and the temperature conditions in the modelling domains. In the 16 local scenarios calculated so far according to Figure 2-1, the energy standard was set to the mean of all states of thermal insulation, and the temperature conditions were based on a cold year with a high number of heating degree days (2 400 Kd to 2 700 Kd, case "max HDD"). These scenarios were summarised under the term "baseline scenario". In the final variation, the mean value for new buildings according to EnEV (2002) was used as the "lower estimate" of the energy standard of the buildings in the modelling domains; the mean value for completely unrenovated buildings was used as the "upper estimate". The lower limit for the temperature conditions was set to 1 500 Kd, the lowest number of heating degree days in the three modelling domains (case "min HGT"). Together with the baseline scenario, this results in a total of six superordinate scenarios, each one consisting of the 16 scenarios according to Figure 2-1.

The heating degree days and the energy standard impact on the final energy demand of the buildings in the modelling domains calculated for 2020. Table 2-12 shows for the varying quantities, how the final energy demand in the three modelling domains relate to the final energy demand in the baseline scenario. The values in Table 2-12 shaded in grey correspond to the baseline scenario.

Table 2-12: Ratio of the final energy demand of the three analysis areas to the baseline scenario when varying energy standards and heating degree days; values of the baseline scenario itself are shaded in grey

	Berlin		Bremen		Köln	
energy standard	min HDD	max HDD	min HDD	max HDD	min HDD	max HDD
mean	63.2%	100.0%	62.8%	100.0%	68.1%	100.0%
lower estimate	46.5%	72.7%	43.3%	67.7%	46.5%	67.5%
upper estimate	77.4%	124.9%	73.2%	118.5%	82.1%	122.0%

Since the final energy demand enters linearly in the calculation of the emissions, a change of the final energy demand in the modelling domains results in a corresponding change of emissions of the individual source groups (CHPs, peak demand boilers, avoided emissions) as well as of the total emission changes due to the implementation of CHPs. With a slight loss of accuracy, this also applies to NO_2 . Correspondingly, the values of the changes in concentration due to the implementation of CHPs determined for the baseline scenario (Table 2-11) could be transferred to the superordinate scenarios with the help of the ratios given in Table 2-12. The worst case results from the assumption of completely unrenovated buildings in the modelling domain ("upper estimate") and the upper limit of the heating degree days. In this case, the changes in

concentration due to the use of CHPs increase by 19 % to 25 %. In the best case scenario, assuming an average energy standard in line with that of new buildings according to EnEV (2002) ("lower estimate") and the lower limit of heating degree days, the change in concentration due to the use of CHPs is reduced by more than half. These two limits determine the range of CHP-induced changes in concentration due to the variation of the final energy demand, which the results of the other variations are included into.

In the scenarios, different levels of substitution (implementation of CHP) were combined with different emission factors. Therefore, the probability for the levels of substitution, the emission factors and the underlying scenarios was discussed in order to evaluate the results obtained. With regard to the level of substitution, it is considered highly unlikely that given the current economic conditions Mini-CHPs will be implemented beyond the minimum scenario. From the discussion of the emission factors it can be seen that the emission factors finally depend on the technical requirements formulated for the Mini-CHPs. At the latest from 2018 with the limit value of 240 mg/kWh according to the EU regulation (813/2013), high emission factors for NO_x of 327.6 mg/kWh, as specified in the maximum scenario, are very unlikely on average until 2020. Assuming that Mini-CHPs will continue to be built mainly where natural gas is already available today, and that accordingly the heat from natural gas-fired boilers will be replaced, it was concluded that scenario 3 on the national scale and scenario 3a and 3b on the local scale are the most likely scenarios.

Based on the results obtained, an assessment of the changes in emissions and concentration due to the use of the CHPs was carried out with regard to the currently legally prescribed limit values of EU Directives 2001/81/EC and 2008/50/EC. For SO₂, only savings of emissions were determined for all scenarios analysed. For PM10 and PM2.5, only decreases in the concentration load due to the implementation of CHPs were calculated for all scenarios analysed. Hence, only NO_x and NMVOC were considered to be relevant for the limit value concerning emissions and only NO₂ concerning concentrations.

EU Directive 2001/81/EC sets national emission ceilings for the Federal Republic of Germany for NO_x and NMVOC, among others. These quotas may not be exceeded after 2011. In the worst case scenario 5, the calculated additional emissions due to the implementation of the CHPs on the national scale are 0.25% for NO_x and well below 0.1% for NMVOC of the specified emission ceilings. Hence, the additional emissions due to the implementation of the CHPs were classified as not relevant on the national scale.

With respect to concentrations on the local scale, the limit value of 40 µg/m³ according to EU Directive 2008/50/EC was considered for the NO₂ annual mean value. In the worst case scenario 5b, both for the MLA and for the MLA Street, CHP-induced emission changes occur that may significantly contribute to exceeding the limit value when combined with a high background concentration or with high additional concentrations in street areas. As discussed above, however, the occurrence of scenarios 5 to 8 (maximum scenario for the implementation of Mini-CHPs) is very unlikely. In case of the most likely scenarios 3a and 3b or generally in case of the scenarios 1 to 4 (minimum scenario for the implementation of Mini-CHPs), no relevant contribution of the Mini-CHPs to the total NO₂ concentration is to be expected for the MLA or the MLA Street. Table 2-12 summarises the results of the evaluation with regard to EU Directives 2001/81/EC and 2008/50/EC.

Table 2-13: Evaluation of the changes in emissions and concentrations due to the use of CHPs with respect to the EU Directives 2001/81/EC and 2008/50/EC

	Scenarios 1 - 4	Scenarios 5 - 8
likelihood	high	very low
changes in emissions: NO _x , NMVOC national scale	not relevant	not relevant

	Scenarios 1 - 4	Scenarios 5 - 8
changes in concentration: NO ₂ MLA	not relevant	may be relevant in combination with high background concentrations
changes in concentration: NO ₂ MLA Street	not relevant	may be relevant in combination with high concentrations in street areas

3 Einführung und Aufgabenstellung

Durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kann in Blockheizkraftwerken (BHKW) auf umweltschonende und effiziente Art und Weise Elektrizität und Nutzwärme generiert werden. Ein Vorteil bei der verstärkten Verwendung dieser dezentralen Technologie ist der deutlich höhere Gesamtwirkungsgrad gegenüber der konventionellen, getrennten Bereitstellung von Wärme und Strom aus fossilen Energieträgern, denn die Abwärme der Stromerzeugung kann direkt am Ort der Entstehung genutzt werden, während sie bei der konventionellen Stromerzeugung ungenutzt bleibt. Durch den Einsatz von BHKW lassen sich der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen aus der Strom- und Wärmebereitstellung senken.

BHKW können mit einem Verbrennungsmotor (Diesel-, Pflanzenöl- oder Gasmotor) oder einer Gasturbine betrieben werden. Sie haben elektrische Leistungen von ca. 1 kW_{el} bis zu einigen zehn MW_{el}. Bei einer Leistung kleiner 50 kW_{el} spricht man von Mini-KWK bzw. Mini-BHKW.

Zwar ist ein weiterer Ausbau von KWK aus Klimaschutzgründen wünschenswert, ein negativer Aspekt ist allerdings, dass beim Betrieb von BHKW gesundheitsgefährdende Stoffe (u. a. NO_x, Staub, Formaldehyd) direkt in den Aufenthaltsbereichen der Menschen freigesetzt werden. Dieser Aspekt wurde in bisherigen Studien meist außer Acht gelassen.

Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von unter 1 MW sind zudem nicht nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftig (s. auch 4. BImSchV) und werden damit auch nicht überwacht.

Eine Abschätzung der von BHKW verursachten Luftschadstoffemissionen und eine Modellierung der Ausbreitung dieser Schadstoffe ist notwendig, um beurteilen zu können, welchen Einfluss diese Anlagen auf die Luftqualitätssituation in Städten haben. Vom Umweltbundesamt (UBA) wurde daher ein Vorhaben initiiert, das zu einem Erkenntnisgewinn in Bezug auf Einflüsse einer verstärkt dezentralen Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen führen soll. Dabei waren nur die Emissionen von BHKW kleiner 50 kW elektrischer Leistung (kW_{el}), sogenannten Mini-BHKW, zu berücksichtigen. Der vorliegende Text stellt den Endbericht zu diesem Vorhaben vor.

Im Rahmen des Vorhabens wurden aus Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten die durch Mini-BHKW verursachten Emissionen der Luftschadstoffe NO_x, Staub (PM₁₀ und PM_{2.5}), SO₂ und NMVOC für das Jahr 2020 auf nationaler Ebene für Deutschland und auf lokaler Ebene für städtische Ballungsräume berechnet. Dabei wurden verschiedene Szenarien für das Zieljahr 2020 betrachtet, um die Abschätzung der Emissionsbandbreite bei unterschiedlichen Eingangsparametern zu ermöglichen.

Darauf aufbauend wurde die aus dem Einsatz von Mini-BHKW resultierende Immissionsänderung sowohl auf der nationalen Ebene als auch auf der lokalen Ebene für die o. g. Luftschadstoffe mit Modellrechnungen ermittelt. Dabei wurde die Ausbreitung der Schadstoffe auf lokaler Ebene bei verschiedenen meteorologischen Einflüssen exemplarisch für drei unterschiedliche Bebauungsgeometrien modelliert. Die ermittelten Werte der Immissionsänderung wurden auf die betrachteten Emissionsszenarien übertragen, um auch hier die Bandbreite der Immissionsänderungen in Abhängigkeit der Eingangsparameter abschätzen zu können.

Neben den Emissions- und Immissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW wurden auf lokaler Ebene auch Kfz-Emissionen und -Immissionen berechnet, um sie zum einen mit den Emissions- und Immissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW vergleichen zu können und zum anderen zu untersuchen, welchen Beitrag die Emissionsänderungen durch den Einsatz von Mini-BHKW zu Grenzwertüberschreitungen im Straßenraum leisten könnten.

Anmerkung:

Anmerkung:

Im Text wird der Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet.

4 Vorgehensweise

Im ersten Schritt wurden auf nationaler Ebene die durch BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ ("Mini-BHKW") erzeugten Emissionen sowie die bedingt durch den Einsatz von Mini-BHKW bei der Stromerzeugung bzw. durch Gas- bzw. Ölheizkessel nicht mehr erzeugten, d. h. vermiedenen Emissionen für das Bezugsjahr 2020 für Deutschland berechnet. Betrachtet wurden die Luftschadstoffe NO_x , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC. Dabei wurden die NMVOC-Emissionen als Ersatz für die ursprünglich vorgesehenen Formaldehyd-Emissionen bestimmt, da die Datengrundlage für NMVOC-Emissionsfaktoren etwas besser ist als für Formaldehyd-Emissionsfaktoren. Die Emissionen wurden auf nationaler Ebene für insgesamt acht Szenarien ermittelt (Abschnitt 5.1), die sich hinsichtlich des Substitutionsgrads mit Mini-BHKW, der Emissionsfaktoren der Mini-BHKW sowie des Brennstoffs der ersetzten Heizkessel (Öl oder Gas) unterscheiden.

Um die Emissionen im Bezugsjahr 2020 abschätzen zu können, wurden zunächst die im Jahr 2020 durch BHKW erzeugten Strom- und Wärmemengen für die verschiedenen Szenarien prognostiziert (Abschnitt 5.2). Grundlage der Prognose war eine Liste des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zur Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) (BAFA, 2014). Darauf aufbauend wurden in Abschnitt 5.3 unter Verwendung der entsprechenden Emissionsfaktoren die im Jahr 2020 durch Mini-BHKW erzeugten bzw. die dadurch in der Strom- und Wärmeerzeugung vermiedenen Emissionen für die verschiedenen Szenarien bestimmt. Als zusammenfassende Größe wurden abschließend die BHKW-bedingten Emissionsänderungen als Differenz aus den BHKW-Emissionen und der Summe der vermiedenen Emissionen aus Strom- und Wärmeerzeugung ermittelt. Zur besseren Lesbarkeit wird diese Größe im Folgenden auch als „Emissionsänderung durch BHKW-Ausbau“ bezeichnet.

Zur Abschätzung der durch BHKW erzeugten Wärmemengen und damit der Emissionsänderungen auf lokaler Ebene für städtische Ballungsräume in Abschnitt 6 sowie für die Immissionsmodellierung auf nationaler Ebene in Abschnitt 7 mussten sinnvolle Annahmen zur räumlichen Verteilung der Anwendungsdichte von Mini-BHKW in der Prognose getroffen werden. Dazu wurde in Abschnitt 5.4 ein Downscaling-Ansatz entwickelt, der auf den bundesweiten Daten gemäß BAFA-Liste vom 09.04.2014 (BAFA, 2014) und auf den Prognosen der BHKW-Entwicklung gemäß Abschnitt 5.2 basiert. Dabei wurden die acht Emissionsszenarien auf nationaler Ebene weiter unterteilt, so dass auf lokaler Ebene 16 Emissionsszenarien vorlagen (Abschnitt 5.4.4).

Auf der Grundlage der auf nationaler Ebene berechneten Emissionsszenarien wurden in Abschnitt 6 die Emissionen für drei städtische Ballungsräume ermittelt. Dazu wurden in Abschnitt 6.1 in Abstimmung mit dem Auftraggeber die drei Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln ausgewählt. Die Modellgebiete haben eine Fläche von jeweils ca. $1 \times 1 \text{ km}^2$ und sind so lokalisiert, dass sie eine Verkehrsmessstation beinhalten. Grund dafür ist, dass neben den Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für diese Modellgebiete auch Kfz-Emissionen und -Immissionen berechnet wurden, um sie zum einen mit den Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau vergleichen zu können und zum anderen zu untersuchen, welchen Beitrag die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau zu Grenzwertüberschreitungen im Straßenraum leisten könnten.

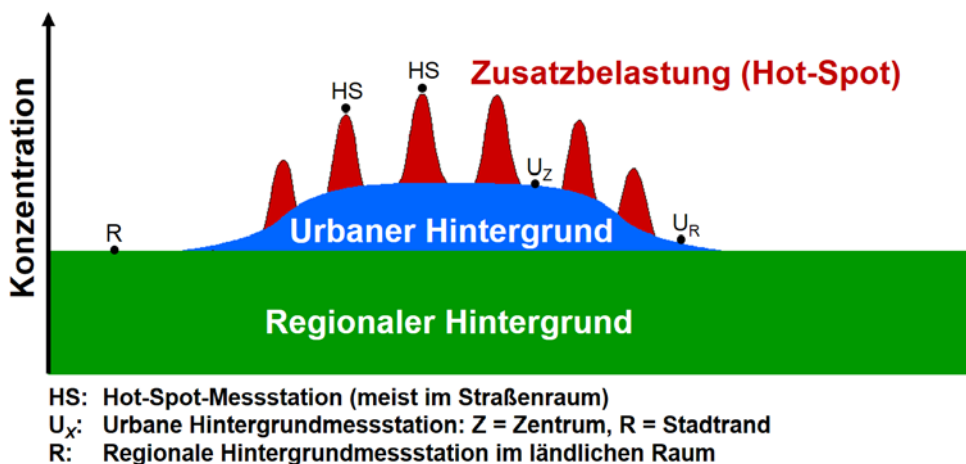
Um die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die drei Modellgebiete abschätzen zu können, wurde zunächst jeweils der Endenergiebedarf durch Heizung und Warmwassererzeugung, im Folgenden auch als Wärmebedarf bezeichnet, in Abhängigkeit der vorhandenen Bebauung und der Temperatur aus statistischen Erhebungen abgeleitet (Abschnitt 6.4). Dabei wurden zur Bildung weiterer Szenarien in Abschnitt 9.1 verschiedene Energiestandards der Gebäude betrachtet.

Aufbauend auf dem berechneten Endenergiebedarf wurden in Abschnitt 6.5 die zur Deckung des Endenergiebedarfs in den drei Modellgebieten erzeugten Emissionen bestimmt. Üblicherweise wird die Leistung einer wärmegeführten BHKW-Anlage aus wirtschaftlichen Gründen so ausgelegt, dass sie auch im

Volllastbetrieb nur einen Teil des maximalen Heizenergiebedarfes der angeschlossenen Abnehmer deckt, die benötigte Restwärme liefert ein Spitzenlastkessel. Daher wurden, im Gegensatz zur nationalen Ebene, auf lokaler Ebene neben den Emissionen aus Mini-BHKW auch die Emissionen von Spitzenlastkesseln berücksichtigt. Hingegen wurden bei den vermiedenen Emissionen nur die Emissionen aus Wärmeerzeugung betrachtet, da im Regelfall davon auszugehen ist, dass die vermiedene Stromerzeugung nicht lokal in den Modellgebieten stattfindet. Die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau in den drei Modellgebieten wurden demnach als Summe der BHKW- und der Spitzenlastkessel-Emissionen abzüglich der vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung bestimmt. Für die zeitliche Verteilung der Emissionen in den Modellgebieten in den Ausbreitungsrechnungen in Abschnitt 8 wurden Jahresganglinien in Abhängigkeit vom Jahresgang der Temperatur erzeugt (Abschnitt 6.7). Die Emissionen des Kfz-Verkehrs wurden in Abschnitt 6.8 für die relevanten Straßen im jeweiligen Modellgebiet auf Basis des HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) berechnet.

Die Gesamtbelastung der Schadstoffkonzentration im urbanen Raum setzt sich aus dem regionalen Hintergrund, dem urbanen Hintergrund und – in Hot-Spot-Bereichen – der Zusatzbelastung zusammen. Dies wird in Abbildung 4-1, zusammen mit der Lage entsprechender Messstationen, schematisch dargestellt.

Abbildung 4-1: Belastungsregime im urbanen Raum nach Lenschow et al. (2001)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH) nach Lenschow et al. (2001)

Für die in Abschnitt 5 und Abschnitt 6 berechneten Emissions-Szenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene wurden im zweiten Schritt die Beiträge der Mini-BHKW zur Immissionsbelastung berechnet. Dabei wurden in Anlehnung an Abbildung 4-1 die Beiträge zur regionalen und urbanen Hintergrundbelastung (Abschnitt 7) und die Beiträge zur lokalen Zusatzbelastung im Modellgebiet (Abschnitt 8) getrennt erhoben.

Auf nationaler Ebene wurden die Berechnungen zur Immissionsbelastung durch BHKW mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID (RCG) durchgeführt (Abschnitt 7.1). Die vom Modell benötigten dreidimensionalen meteorologischen Eingangsdaten für die RCG-Modellierung wurden mit dem diagnostischen Analysesystem TRAMPER erstellt (Abschnitt 7.1). Als meteorologisches Referenzjahr wurde 2010 verwendet (Abschnitt 6.3). Mit RCG wurde zunächst ein Basislauf mit den auf Basis des „Aktuelle Politik Szenarios“ für das Bezugsjahr 2020 prognostizierten Emissionen (APS2020) durchgeführt (Abschnitt 7.2). Anschließend wurden die in Abschnitt 5 für die acht nationalen Szenarien ermittelten Emissionen der BHKW, der Strom- und der Wärmeerzeugung in die Emissionsdatenbasis eingearbeitet und die RCG-Ausbreitungsrechnungen mit den modifizierten Emissionsdaten wiederholt. Der Einfluss der BHKW-bedingten Emissionsänderungen auf den regionalen und urbanen Hintergrund wurde dann als Differenz zwischen dem jeweiligen Szenarienlauf und dem Basislauf bestimmt (Abschnitt 7.3)

Auf lokaler Ebene wurden die Ausbreitungsrechnungen mit dem Lagrange'schen Partikelmodell LASAT durchgeführt, das die Grundlage des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 der TA Luft (2002) bildet (Abschnitt 8.1.2). Als meteorologische Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung mit LASAT wurden Wind- und Turbulenzfelder in Form einer Windfeldbibliothek verwendet, die mit dem mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM erstellt wurden (Abschnitt 8.1.1), sowie als Antrieb die in Abschnitt 6.3 beschriebenen meteorologischen Zeitreihen (AKTerm) des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Bei der Ausbreitungsmodellierung mit LASAT wurden die Emissionen durch BHKW, Spitzenlastkessel und zu ersetzende Gas- bzw. Ölheizkessel sowie durch den Kfz-Verkehr jeweils als eigenständige Quellgruppen mit eigener zeitlicher Ganglinie berücksichtigt. Die Ausbreitungsrechnungen wurden für jedes der drei Modellgebiete mit jeweils drei unterschiedlichen AKTerm für eins der 16 lokalen Szenarien explizit durchgeführt. Für die Auswertung wurden Flächenmittelwerte der Modellergebnisse zum einen über das gesamte auszuwertende Gebiet und zum anderen über eine maximal beaufschlagte Fläche (MBF bzw. MBF Straße) bestimmt (Abschnitt 8.3). Diese Flächenmittelwerte wurden quellgruppenspezifisch über das Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum explizit berechneten Szenario skaliert, so dass am Ende für alle drei Modellgebiete, alle drei AKTerm und alle 16 lokalen Szenarien Flächenmittelwerte über die in Abschnitt 8.3 definierten Auswertungsflächen vorlagen. Die Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur lokalen Zusatzbelastung wurden dann als Summe der lokalen Immissionsbelastung durch BHKW- und Spitzenlastkessel-Emissionen abzüglich der lokalen Immissionsbelastung durch die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung bestimmt.

Als Nebenaspekt war im Rahmen der Modellierung auf lokaler Ebene zu untersuchen, wie Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets die Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet beeinflussen bzw. wie weit Quellen um das Untersuchungsgebiet mit dem Modellgebiet erfasst werden müssen, damit dieser Einfluss im Untersuchungsgebiet selbst vernachlässigbar klein ist. Dazu wurden gesonderte Untersuchungen durchgeführt, die in Abschnitt 8.4 beschrieben werden.

Die Beiträge der Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau zur regionalen und urbanen Hintergrundbelastung gemäß Abschnitt 7 und zur lokalen Zusatzbelastung im Modellgebiet wurden zur gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau aggregiert (Abschnitt 8.6). Dabei war zu beachten, dass die lokal im Modellgebiet angesetzten BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen bereits auf nationaler Ebene in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt wurden. Um eine Doppelzählung dieser Emissionsbeiträge zu vermeiden, wurde der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung abgeschätzt (Abschnitt 8.5).

Das für die lokalen Modellgebiete verwendete Ausbreitungsmodell LASAT wurde für die Simulation der Ausbreitung nicht-reaktiver Substanzen entwickelt und kann nur chemische Umsetzungen erster Ordnung für Einzelstoffe simulieren. Da NO_2 eine chemisch reaktive Substanz ist, wurden die Ausbreitungsrechnungen mit LASAT zunächst für NO_x durchgeführt. Diese lieferten als Ergebnis die durch die BHKW-bedingten Emissionsänderungen und die Kfz-Emissionen hervorgerufene NO_x -Zusatzbelastung (Abschnitt 8.6). Die Ableitung der NO_2 -Zusatzbelastung fand dann extern in einem Postprocessing-Schritt statt. Dafür wurde in Abschnitt 8.7.3 zunächst nach VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) der für die vorliegende Fragestellung erforderliche Reaktionsmechanismus ermittelt und anschließend in Abschnitt 8.7.4 ein Modellkonzept zur Berechnung der NO_2 -Belastung festgelegt. In Abschnitt 8.7.5 wurde dann die NO_2 -Gesamtbelastung in den Modellgebieten sowie die durch die BHKW-bedingten Emissionsänderungen und die durch Kfz-Emissionen erzeugte NO_2 -Zusatzbelastung bestimmt.

Eine Bewertung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.1. Dabei wurde zunächst durch Variation des Energiestandards der Gebäude und durch Variation der Temperaturverhältnisse in den Modellgebieten die Bandbreite der Emissionsszenarien noch einmal erweitert. Die Werte der Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für diese Szenarien wurden analog zum bisherigen Vorgehen quellgruppenspezifisch durch Skalierung über das Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum explizit mit LASAT berechneten

Szenario bestimmt. In Abschnitt 9.2 werden die ermittelten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. In Abschnitt 9.3 wird die Wahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Szenarien diskutiert, und in Abschnitt 9.4 werden darauf aufbauend die Auswirkungen eines zunehmenden Einsatzes von BHKW in Ballungsräumen beurteilt und im Hinblick auf geltende und zukünftige Luftqualitätsziele bewertet.

Die Arbeiten zur Berechnung der im Jahr 2020 erzeugten Strom- und Wärmemengen auf nationaler Ebene (Abschnitt 5.2), zur Berechnung des Wärmebedarfs in den Modellgebieten (Abschnitt 6.4), zur Abschätzung des Anteils der direkten NO₂-Emissionen an den NO_x-Emissionen von Mini-BHKW (Abschnitt 6.6), zur Erstellung von Jahresganglinien für die BHKW-Emissionen (Abschnitt 6.7) und zur Diskussion der Wahrscheinlichkeit der Szenarien (Abschnitt 9.3) wurden federführend durch den Unterauftragnehmer solares bauen GmbH bearbeitet, die übrigen durch IVU Umwelt GmbH.

5 Nationale Emissionsszenarien

5.1 Allgemeines

Die durch BHKW < 50 kW_{el} ("Mini-BHKW") erzeugten NO_x-, SO₂-, PM₁₀-, PM_{2.5}- und NMVOC-Emissionen sowie die bedingt durch den Einsatz von Mini-BHKW bei der Stromerzeugung bzw. durch Gas- bzw. Ölheizkessel nicht mehr erzeugten, d. h. vermiedenen Emissionen dieser Schadstoffe wurden für das Bezugsjahr 2020 auf nationaler Ebene für Deutschland berechnet. Dabei wurden die NMVOC-Emissionen als Ersatz für die ursprünglich vorgesehenen Formaldehyd-Emissionen bestimmt, da die Datengrundlage für NMVOC-Emissionsfaktoren etwas besser ist als für Formaldehyd-Emissionsfaktoren.

Um abschätzen zu können, wie sich die durch den vermehrten Einsatz von BHKW verursachten Luftschadstoffbelastungen in Zukunft entwickeln, wurden die durch BHKW erzeugten Emissionen für folgende Szenarien ermittelt:

- Hohe Abschätzung für BHKW-Emissionsfaktoren kombiniert mit einem hohen BHKW-Einsatz (hoher Substitutionsgrad mit durchschnittlichen BHKW)
- Hohe Abschätzung für BHKW-Emissionsfaktoren kombiniert mit einem niedrigen BHKW-Einsatz (niedriger Substitutionsgrad mit durchschnittlichen BHKW)
- Niedrige Abschätzung für BHKW-Emissionsfaktoren kombiniert mit einem hohen BHKW-Einsatz (hoher Substitutionsgrad mit anspruchsvollen BHKW)
- Niedrige Abschätzung für BHKW-Emissionsfaktoren kombiniert mit einem niedrigen BHKW-Einsatz (niedriger Substitutionsgrad mit anspruchsvollen BHKW)

Der hohe BHKW-Einsatz wird im Folgenden als Maximalszenario bezeichnet, der niedrige BHKW-Einsatz als Minimalszenario.

Bei der Abschätzung der durch den Einsatz von Mini-BHKW bei der Wärmeerzeugung vermiedenen Emissionen wurden zwei alternative Szenarien betrachtet, nämlich dass die BHKW

1. Gasheizkessel
2. Ölheizkessel

ersetzen. Damit ergeben sich auf nationaler Ebene acht Emissionsszenarien gemäß Tabelle 5-1:

Tabelle 5-1: Emissionsszenarien auf nationaler Ebene

Name	Beschreibung
im Rahmen des Minimalszenarios (niedriger BHKW-Einsatz):	
Szenario 1:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 2:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
Szenario 3:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 4:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
im Rahmen des Maximalszenarios (hoher BHKW-Einsatz):	
Szenario 5:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 6:	hohe Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel
Szenario 7:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Gasheizkessel
Szenario 8:	niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren, BHKW ersetzen Ölheizkessel

5.2 Berechnung der im Jahr 2020 erzeugten Strom- und Wärmemengen

5.2.1 Grundlagen

Als Grundlage für alle weiteren Berechnungen wurden die im Jahr 2020 erzeugten Strom- und Wärmemengen durch Mini-BHKW als Grundlage für die Ermittlung der Emissionen in Abschnitt 5.3 bestimmt. Die Strom- und Wärmemengen wurden für das Minimal- und das Maximalszenario gemäß Tabelle 5-1 ermittelt.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber liegen der Berechnung folgende Festlegungen / Annahmen bezüglich des Minimal und Maximalszenario zu Grunde:

1. Als Grundlage dient die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte BAFA-Liste mit Stand vom 09.04.2014 (BAFA, 2014). Darin werden vier Leistungsklassen unterschieden (bis 2 kW_{el}, 2-10 kW_{el}, 10-20 kW_{el} und 20-50 kW_{el}). Die Liste erfasst lediglich den Zubau von Anlagen sowie die mittleren elektrischen Leistungen der Anlagen je Leistungsklasse.
2. Es wurde in den beiden Szenarien zur Berechnung der durch Mini-BHKW erzeugten Wärme und Strommengen im Jahr 2020 nur der angenommene Zubau bis zum 31.12.2019 berücksichtigt.
3. Minimalszenario: Für das Minimalszenario wurde angenommen, dass es für die Jahre 2014-2019 einen Zubau wie im Jahr 2013 gibt (Tabelle 5-2).
4. Maximalszenario: Für das Maximalszenario wurde von der in der Leitstudie von Nitsch et al. (2012) für das Jahr 2020 angenommene Strommenge von 9100 GWh durch erdgasbetriebene Mini-BHKW ausgegangen (Tabelle 5-10). Es wurde mangels anderer Informationen ein gleichmäßiger Zubau pro Jahr für die Jahre 2014-2019 (01.01.2014 bis 31.12.2019) angesetzt (Tabelle 5-9). Die Anteile des Zubaus an Mini-BHKW pro Leistungsklasse bzw. der dadurch erzeugten Strommenge an der Summe der zugebauten Mini-BHKW pro Jahr bzw. an der durch diese BHKW erzeugten Strommenge wurden denen für das Jahr 2013 gleich gesetzt, so dass sich die gleichen Anteile für Minimal- und Maximalszenario ergeben (Tabelle 5-6).
5. Andere Gasarten als Erdgas (z. B. Klärgas, Biogas etc.) wurden in Absprache mit dem Auftraggeber vernachlässigt, da sie im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} auch zukünftig allenfalls eine unbedeutende Rolle spielen werden.
6. Es liegen keine statistischen Zahlen darüber vor, wie viele der BHKW aus BAFA (2014) in Wohngebäuden (eher geringere Volllaststunden pro Jahr) oder in Gewerbetrieben (eher höhere Volllaststunden pro Jahr) installiert sind oder sein werden. Insofern wurden basierend auf Erfahrungswerten aus der Praxis folgende Annahmen für die durchschnittlichen Volllaststunden getroffen:
3.500 (bis 2 kW_{el})
4.000 (2-10 kW_{el})
5.000 (10-50 kW_{el})
7. Die mittlere thermische Leistung sowie der Erdgaseinsatz bezogen auf den Heizwert H_i (früher: unterer Heizwert H_u) wurden aufgrund von Erfahrungswerten entsprechend den mittleren elektrischen Leistungen aus BAFA (2014) für jede Leistungsklasse bestimmt (Tabelle 5-11).
8. Den Berechnungen der Strom und Wärmemengen liegt die Annahme zugrunde, dass im Jahr 2020 noch alle BHKW in Betrieb sind, die ab 2004 in Betrieb gegangen sind. Es wird damit in erster Näherung von einer Laufzeit von 16 Jahren für alle BHKW ausgegangen.

5.2.2 Ergebnisse Minimalszenario

Tabelle 5-2 enthält bis einschließlich 2013 die nach Leistungsklassen gegliederten Zubauten pro Jahr im Bereich < 50 kW_{el} gemäß BAFA (2014). Für den Zeitraum 2014-2019 zeigt Tabelle 5-2 die Zubauten im Minimalszenario unter den in Abschnitt 5.2.1 aufgeführten Annahmen. Tabelle 5-3 enthält die aufsummierten Zubauten aus Tabelle 5-2, d. h. die im jeweiligen Jahr in Deutschland installierten Mini-BHKW bei einer angenommenen Laufzeit von 16 Jahren.

Tabelle 5-2: Minimalszenario, Zubauten Mini-BHKW pro Jahr

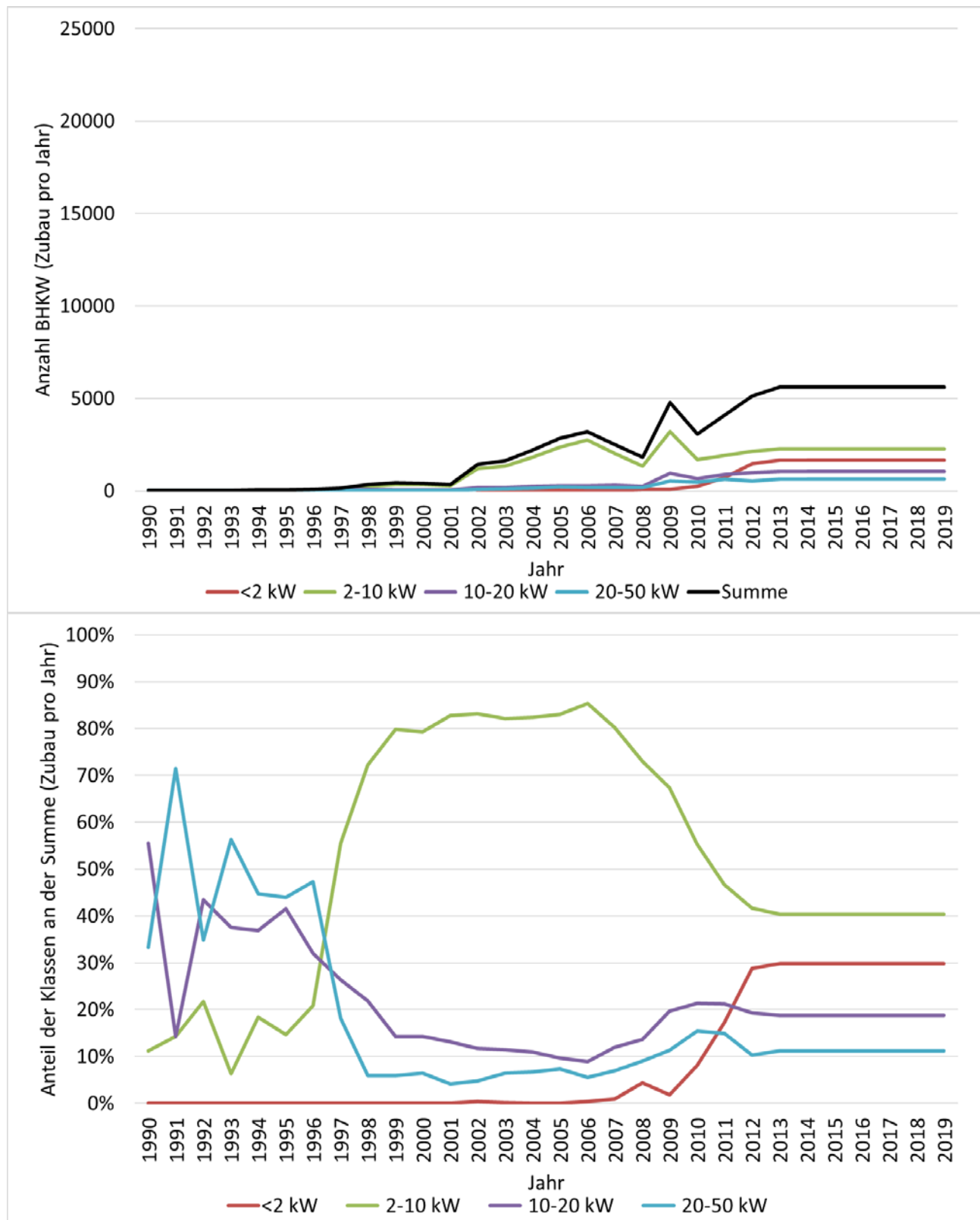
Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990		1	5	3	9
1991		1	1	5	7
1992		5	10	8	23
1993		1	6	9	16
1994		7	14	17	38
1995		6	17	18	41
1996		15	23	34	72
1997		80	38	26	144
1998		232	70	19	321
1999		335	60	25	420
2000		322	58	26	406
2001		278	44	14	336
2002	6	1187	167	68	1428
2003	1	1318	183	103	1605
2004	1	1799	238	145	2183
2005	1	2349	271	207	2828
2006	11	2738	283	177	3209
2007	23	2002	299	174	2498
2008	79	1317	247	163	1806
2009	83	3208	935	542	4768
2010	246	1692	652	472	3062
2011	706	1914	868	612	4100
2012	1470	2130	988	525	5113
2013	1667	2256	1053	623	5599
2014	1667	2256	1053	623	5599
2015	1667	2256	1053	623	5599
2016	1667	2256	1053	623	5599
2017	1667	2256	1053	623	5599
2018	1667	2256	1053	623	5599
2019	1667	2256	1053	623	5599

Tabelle 5-3: Minimalszenario, installierte Mini-BHKW pro Jahr

Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990	0	1	5	3	9
1991	0	2	6	8	16
1992	0	7	16	16	39
1993	0	8	22	25	55
1994	0	15	36	42	93
1995	0	21	53	60	134
1996	0	36	76	94	206
1997	0	116	114	120	350
1998	0	348	184	139	671
1999	0	683	244	164	1091
2000	0	1005	302	190	1497
2001	0	1283	346	204	1833
2002	6	2470	513	272	3261
2003	7	3788	696	375	4866
2004	8	5587	934	520	7049
2005	9	7936	1205	727	9877
2006	20	10673	1483	901	13077
2007	43	12674	1781	1070	15568
2008	122	13986	2018	1225	17351
2009	205	17193	2947	1758	22103
2010	451	18878	3585	2213	25127
2011	1157	20786	4436	2807	29186
2012	2627	22901	5401	3298	34227
2013	4294	25077	6416	3895	39682
2014	5961	27101	7399	4499	44960
2015	7628	29022	8392	5097	50139
2016	9295	30956	9387	5694	55332
2017	10962	32934	10396	6303	60595
2018	12623	34003	11282	6858	64766
2019	14289	34941	12152	7378	68760

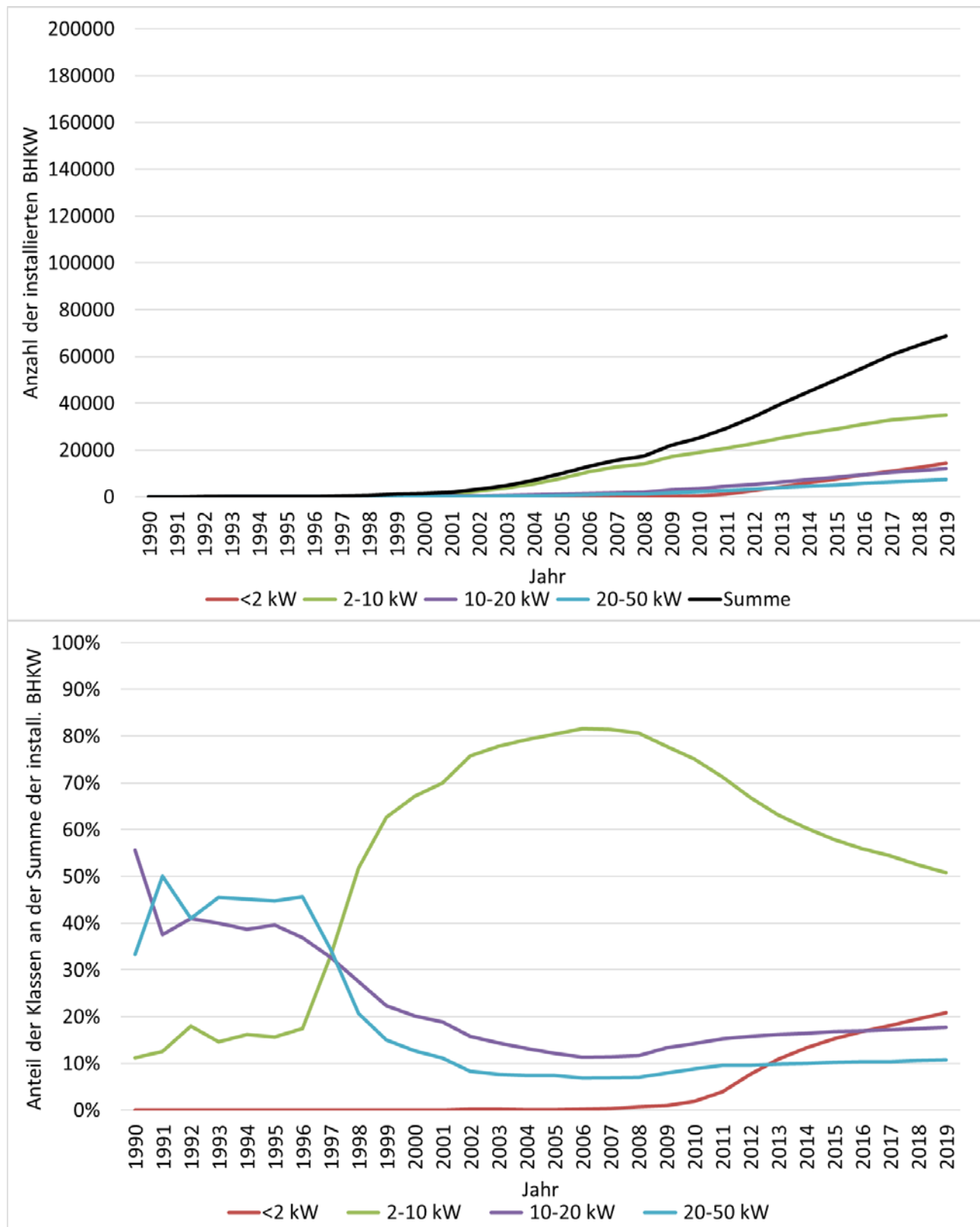
Abbildung 5-1 zeigt den Verlauf der Zubauten pro Jahr im Minimalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Abbildung 5-2 zeigt die Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW im Minimalszenario bei einer Laufzeit von 16 Jahren für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Die Einteilung der y-Achse wurde dabei in beiden Abbildungen so gewählt, dass sie mit der Einteilung für die entsprechenden Abbildungen im Maximalszenario (Abbildung 5-5, Abbildung 5-6) übereinstimmt. Auffällig ist der starke Anstieg der Leistungsklasse < 2 kW_{el} im Zeitraum 2010 bis 2013, d. h. in den letzten vier Jahren der BAFA-Liste (BAFA, 2014).

Abbildung 5-1: Minimalszenario, Anzahl der zugebauten Mini-BHKW pro Jahr (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-2: Minimalszenario, Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Tabelle 5-4 enthält die nach Leistungsklassen gegliederten Strommengen, die durch die pro Jahr zugebauten BHKW entsprechend Tabelle 5-2 erzeugt werden. Die mittlere elektrische Leistung der BHKW pro Leistungsklasse wurde aus der BAFA-Statistik übernommen. Die mittleren Volllaststunden pro Jahr und Leistungsklasse wurden entsprechend den Annahmen in Abschnitt 5.2.1 angesetzt. Tabelle 5-5 enthält die aufsummierten Strommengen aus Tabelle 5-4, d. h. die im jeweiligen Jahr in Deutschland durch die insgesamt installierten Mini-BHKW erzeugten Strommengen.

Tabelle 5-4: Minimalszenario, durch zugebaute Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)

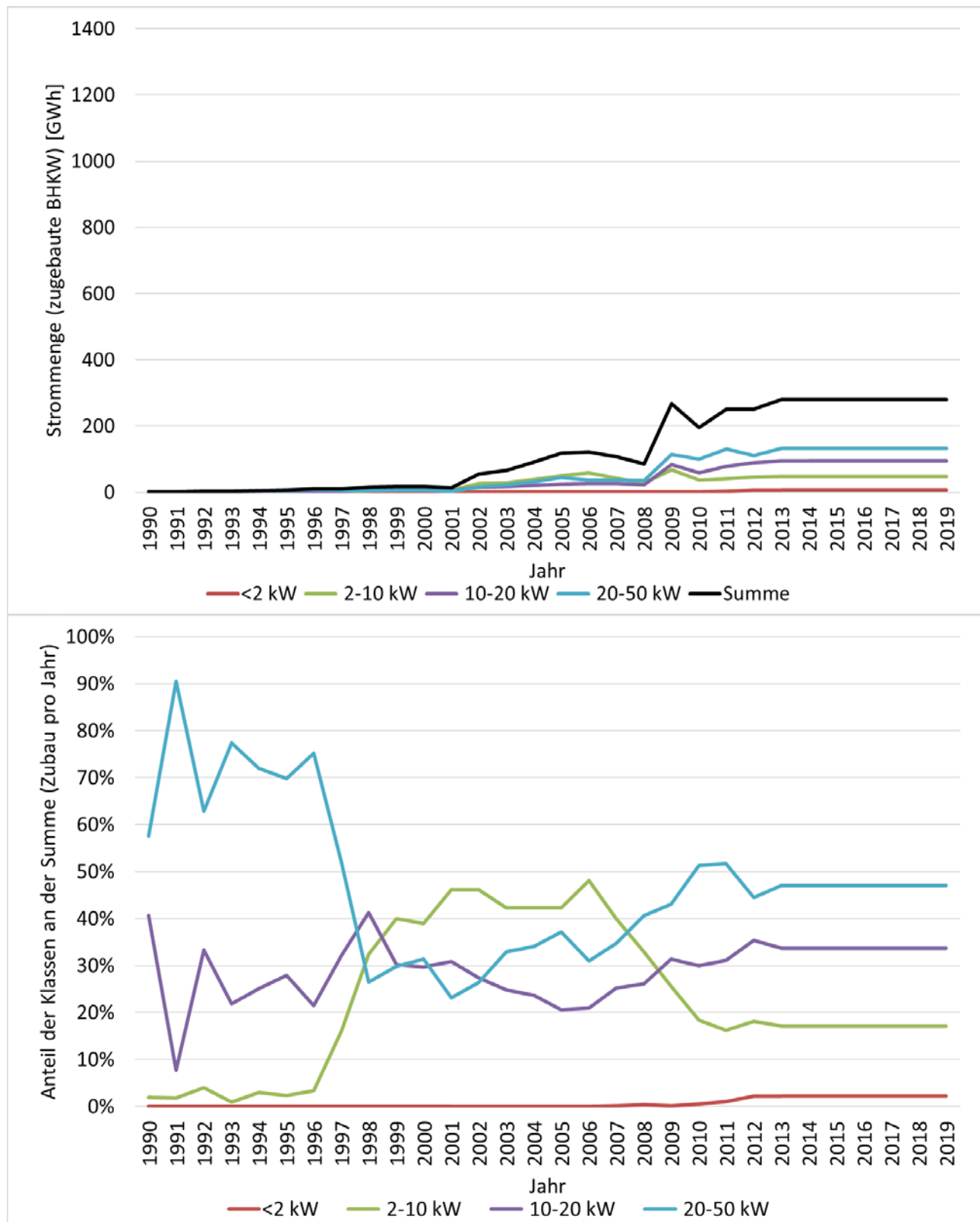
Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
mittlere elektrische Leistung (kW)	1.05	5.30	17.90	42.30	
mittlere Volllaststunden pro Jahr (h)	3500	4000	5000	5000	
1990	0.00	0.02	0.45	0.63	1.10
1991	0.00	0.02	0.09	1.06	1.17
1992	0.00	0.11	0.90	1.69	2.69
1993	0.00	0.02	0.54	1.90	2.46
1994	0.00	0.15	1.25	3.60	5.00
1995	0.00	0.13	1.52	3.81	5.46
1996	0.00	0.32	2.06	7.19	9.57
1997	0.00	1.70	3.40	5.50	10.60
1998	0.00	4.92	6.27	4.02	15.20
1999	0.00	7.10	5.37	5.29	17.76
2000	0.00	6.83	5.19	5.50	17.52
2001	0.00	5.89	3.94	2.96	12.79
2002	0.02	25.16	14.95	14.38	54.51
2003	0.00	27.94	16.38	21.78	66.11
2004	0.00	38.14	21.30	30.67	90.11
2005	0.00	49.80	24.25	43.78	117.84
2006	0.04	58.05	25.33	37.44	120.85
2007	0.08	42.44	26.76	36.80	106.09
2008	0.29	27.92	22.11	34.47	84.79
2009	0.31	68.01	83.68	114.63	266.63
2010	0.90	35.87	58.35	99.83	194.96
2011	2.59	40.58	77.69	129.44	250.30
2012	5.40	45.16	88.43	111.04	250.02
2013	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2014	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2015	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2016	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2017	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2018	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2019	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96

Tabelle 5-5: Minimalszenario, durch installierte Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)

Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990	0.00	0.02	0.45	0.63	1.10
1991	0.00	0.04	0.54	1.69	2.27
1992	0.00	0.15	1.43	3.38	4.96
1993	0.00	0.17	1.97	5.29	7.43
1994	0.00	0.32	3.22	8.88	12.42
1995	0.00	0.45	4.74	12.69	17.88
1996	0.00	0.76	6.80	19.88	27.45
1997	0.00	2.46	10.20	25.38	38.04
1998	0.00	7.38	16.47	29.40	53.24
1999	0.00	14.48	21.84	34.69	71.00
2000	0.00	21.31	27.03	40.19	88.52
2001	0.00	27.20	30.97	43.15	101.31
2002	0.02	52.36	45.91	57.53	155.83
2003	0.03	80.31	62.29	79.31	221.94
2004	0.03	118.44	83.59	109.98	312.05
2005	0.03	168.24	107.85	153.76	429.88
2006	0.07	226.27	132.73	190.56	549.63
2007	0.16	268.69	159.40	226.31	654.55
2008	0.45	296.50	180.61	259.09	736.65
2009	0.75	364.49	263.76	371.82	1000.82
2010	1.66	400.21	320.86	468.05	1190.78
2011	4.25	440.66	397.02	593.68	1435.62
2012	9.65	485.50	483.39	697.53	1676.07
2013	15.78	531.63	574.23	823.79	1945.44
2014	21.91	574.54	662.21	951.54	2210.20
2015	28.03	615.27	751.08	1078.02	2472.40
2016	34.16	656.27	840.14	1204.28	2734.84
2017	40.29	698.20	930.44	1333.08	3002.01
2018	46.39	720.86	1009.74	1450.47	3227.46
2019	52.51	740.75	1087.60	1560.45	3441.31

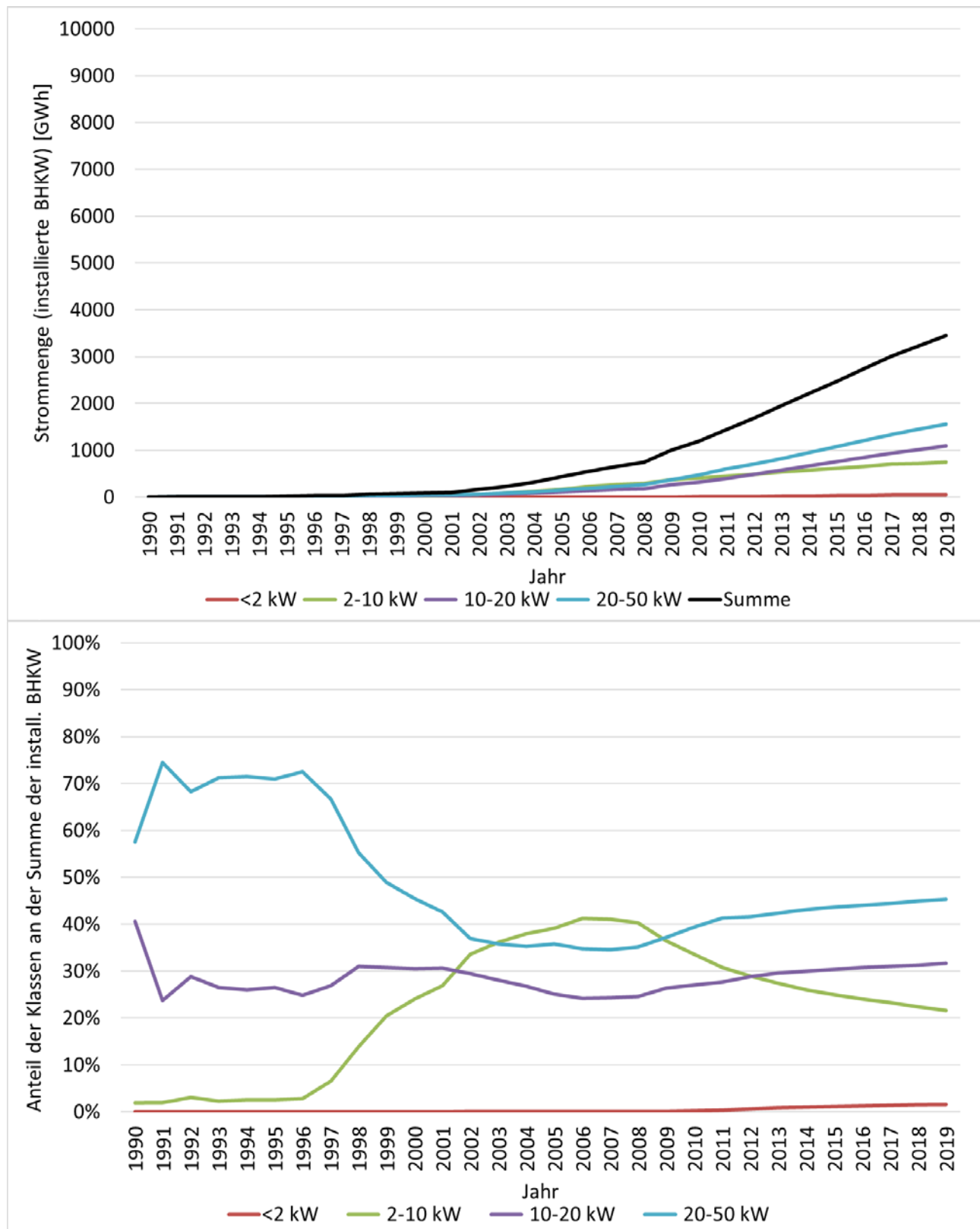
Abbildung 5-3 zeigt die Entwicklung der durch die zugebauten Mini-BHKW erzeugten Strommengen pro Jahr gemäß Tabelle 5-4 im Minimalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Abbildung 5-4 zeigt die durch die insgesamt installierten Mini-BHKW erzeugten Strommengen gemäß Tabelle 5-5 im Minimalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Die Einteilung der y-Achse wurde dabei in beiden Abbildungen so gewählt, dass sie mit der Einteilung für die entsprechenden Abbildungen im Maximalszenario (Abbildung 5-7, Abbildung 5-8) übereinstimmt. Demnach haben seit 2009 die BHKW der Leistungsklasse 20-50 kW_{el} den größten Anteil an den erzeugten Strommengen, während im Zeitraum 2003 bis 2008 die BHKW der Leistungsklasse 2-10 kW_{el} den größten Anteil hatten. Der Anteil der BHKW < 2 kW_{el} an der erzeugten Strommenge ist trotz der starken Zubauten seit 2010 gering.

Abbildung 5-3: Minimalszenario, durch zugebaute BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-4: Minimalszenario, durch installierte BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.2.3 Ergebnisse Maximalszenario

Da für das Maximalszenario nach Abschnitt 5.2.1 die im Jahr 2020 durch die installierten Mini-BHKW erzeugte Strommenge von 9100 GWh vorgegeben ist, wurden zunächst basierend auf den Vorgaben aus Abschnitt 5.2.1 die durch den jährlichen Zubau an Mini-BHKW zu produzierenden Strommengen bestimmt (Tabelle 5-9) und dann anteilig gemäß Tabelle 5-6 auf die Leistungsklassen verteilt. Daraus können mit Hilfe der mittleren elektrischen Leistung und den angenommenen Vollaststunden die erforderlichen BHKW-Zubauten ermittelt werden (Tabelle 5-7).

Tabelle 5-6: Anteile der Stückzahlen bzw. der erzeugten Strommengen der einzelnen Leistungsklassen an der Summe der zugebauten Mini-BHKW bzw. der dadurch erzeugten Strommenge für 2013

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Anteile Stückzahlen 2013	%	29.77%	40.29%	18.81%	11.13%	100%
Anteile Strommenge 2013	%	2.19%	17.08%	33.66%	47.07%	100%

Tabelle 5-7 enthält bis einschließlich 2013 die nach Leistungsklassen gegliederten Zubauten pro Jahr im Bereich < 50 kW_{el} gemäß der BAFA (2014). Sie unterscheidet sich bis 2013 daher nicht von Tabelle 5-2. Für den Zeitraum 2014-2019 zeigt Tabelle 5-7 die Zubauten im Maximalszenario entsprechend den in Abschnitt 5.2.1 aufgeführten Annahmen und der oben beschriebenen Vorgehensweise. Tabelle 5-8 enthält die aufsummierten Zubauten aus Tabelle 5-7, d. h. die im jeweiligen Jahr in Deutschland installierten BHKW < 50 kW_{el} bei einer angenommenen Laufzeit von 16 Jahren.

Tabelle 5-7: Maximalszenario, Zubauten Mini-BHKW pro Jahr

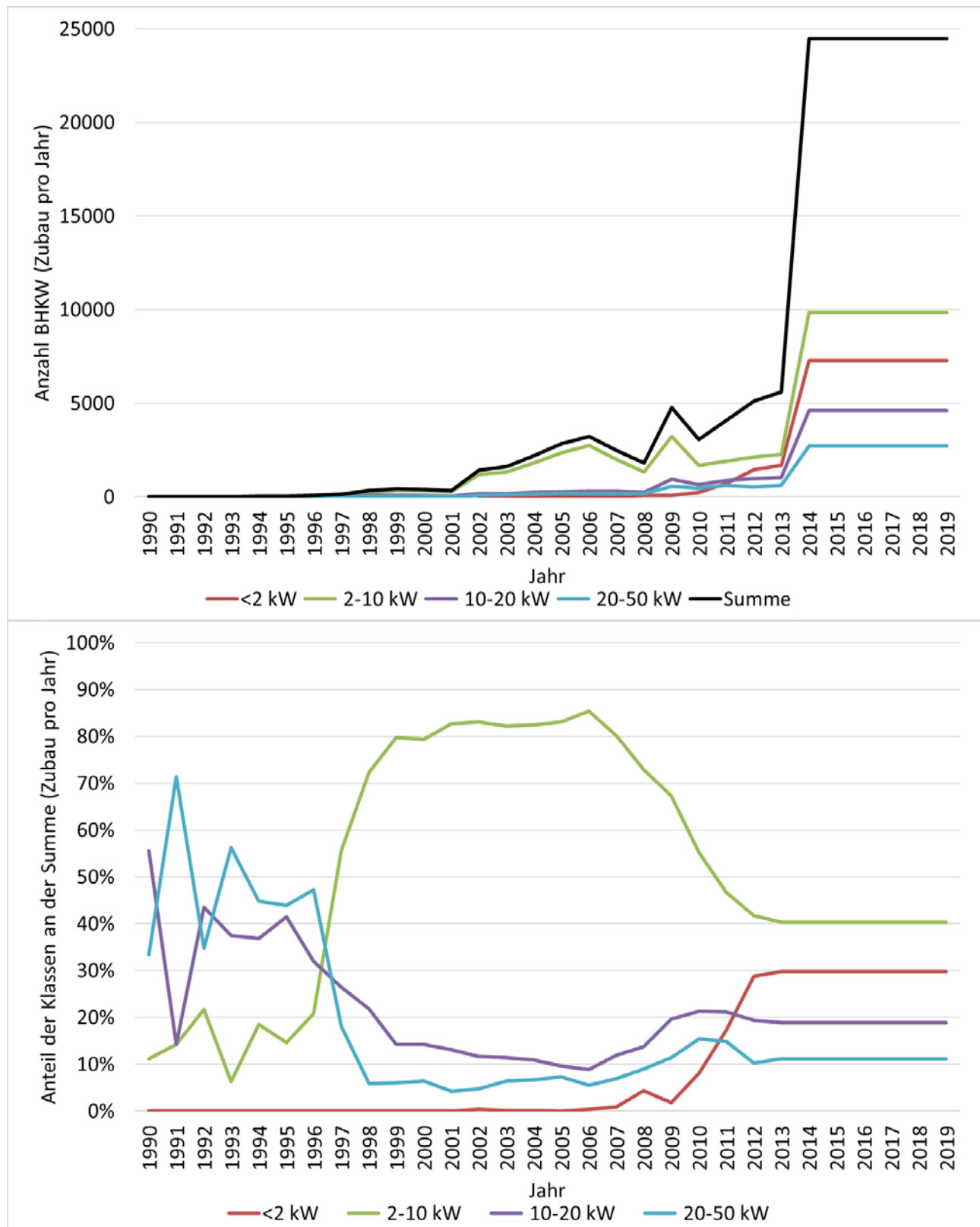
Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990		1	5	3	9
1991		1	1	5	7
1992		5	10	8	23
1993		1	6	9	16
1994		7	14	17	38
1995		6	17	18	41
1996		15	23	34	72
1997		80	38	26	144
1998		232	70	19	321
1999		335	60	25	420
2000		322	58	26	406
2001		278	44	14	336
2002	6	1187	167	68	1428
2003	1	1318	183	103	1605
2004	1	1799	238	145	2183
2005	1	2349	271	207	2828
2006	11	2738	283	177	3209
2007	23	2002	299	174	2498
2008	79	1317	247	163	1806
2009	83	3208	935	542	4768
2010	246	1692	652	472	3062
2011	706	1914	868	612	4100
2012	1470	2130	988	525	5113
2013	1667	2256	1053	623	5599
2014	7283	9856	4600	2722	24461
2015	7283	9856	4600	2722	24461
2016	7283	9856	4600	2722	24461
2017	7283	9856	4600	2722	24461
2018	7283	9856	4600	2722	24461
2019	7283	9856	4600	2722	24461

Tabelle 5-8: Maximalszenario, installierte Mini-BHKW pro Jahr

Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990	0	1	5	3	9
1991	0	2	6	8	16
1992	0	7	16	16	39
1993	0	8	22	25	55
1994	0	15	36	42	93
1995	0	21	53	60	134
1996	0	36	76	94	206
1997	0	116	114	120	350
1998	0	348	184	139	671
1999	0	683	244	164	1091
2000	0	1005	302	190	1497
2001	0	1283	346	204	1833
2002	6	2470	513	272	3261
2003	7	3788	696	375	4866
2004	8	5587	934	520	7049
2005	9	7936	1205	727	9877
2006	20	10673	1483	901	13077
2007	43	12674	1781	1070	15568
2008	122	13986	2018	1225	17351
2009	205	17193	2947	1758	22103
2010	451	18878	3585	2213	25127
2011	1157	20786	4436	2807	29186
2012	2627	22901	5401	3298	34227
2013	4294	25077	6416	3895	39682
2014	11577	34701	10946	6598	63822
2015	18859	44222	15487	9294	87862
2016	26142	53756	20029	11990	111917
2017	33425	63333	24585	14698	136041
2018	40701	72002	29018	17352	159074
2019	47983	80540	33436	19970	181929

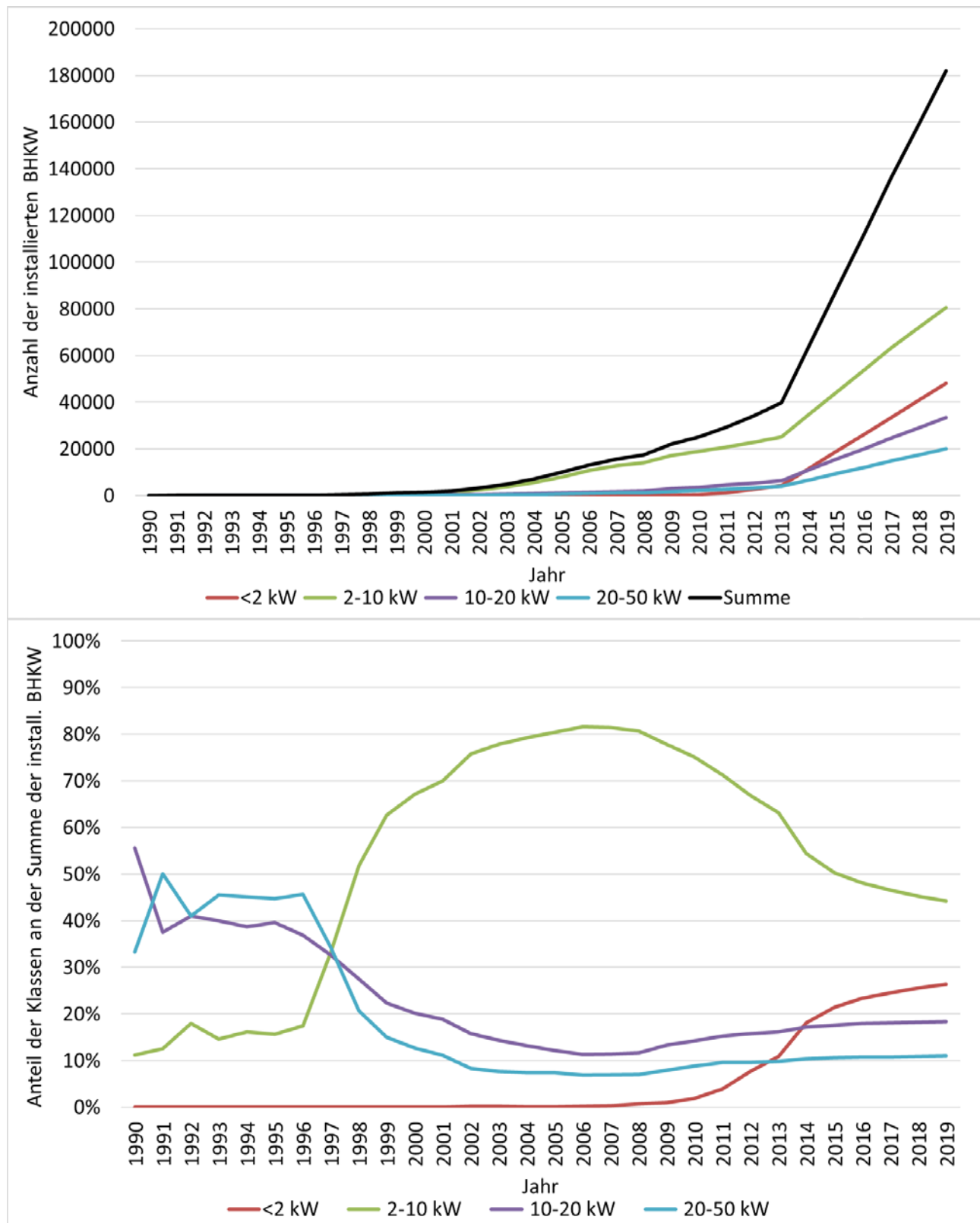
Abbildung 5-5 zeigt den Verlauf der Zubauten pro Jahr im Maximalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Die Anteile entsprechen wie gemäß den Vorgaben denen im Minimalszenario. Abbildung 5-6 zeigt die Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW im Maximalszenario bei einer Laufzeit von 16 Jahren für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe (oben) sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten). Um das Maximalszenario zu erreichen, müssen pro Jahr 4.4mal so viele Mini-BHKW zugebaut werden wie im Jahr 2013.

Abbildung 5-5: Maximalszenario, Anzahl der zugebauten Mini-BHKW pro Jahr (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-6: Maximalszenario, Anzahl der insgesamt installierten Mini-BHKW (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Tabelle 5-9 enthält die nach Leistungsklassen gegliederten Strommengen, die durch die pro Jahr zugebauten BHKW gemäß Tabelle 5-7 erzeugt werden. Die mittlere elektrische Leistung der BHKW pro Leistungsklasse wurde aus der BAFA-Liste (2014) übernommen. Die mittleren Volllaststunden pro Jahr und Leistungsklasse wurden gemäß den Annahmen in Abschnitt 5.2.1 angesetzt. Tabelle 5-10 enthält die aufsummierten Strommengen aus Tabelle 5-9, d. h. die im jeweiligen Jahr in Deutschland durch die insgesamt installierten Mini-BHKW erzeugten Strommengen. Für das Jahr 2020 ergeben sich die für das Maximalszenario angesetzten 9100 GWh, die von den in diesem Szenario bis einschließlich 31.12.2019 erbauten Mini-BHKW erzeugt werden.

Tabelle 5-9: Maximalszenario, durch zugebaute Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)

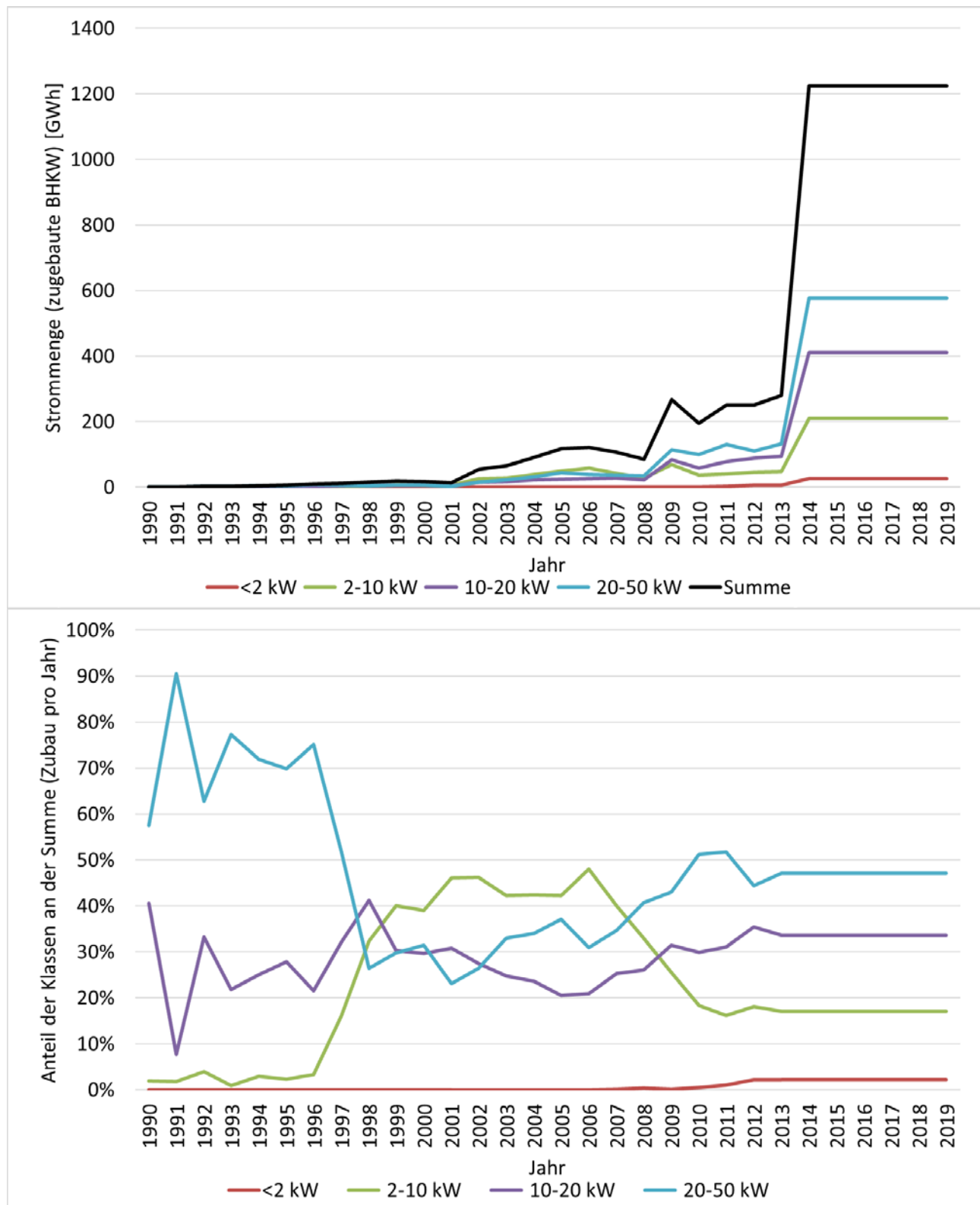
Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
mittlere elektrische Leistung (kW)	1.05	5.30	17.90	42.30	
mittlere Volllaststunden pro Jahr (h)	3500	4000	5000	5000	
1990	0.00	0.02	0.45	0.63	1.10
1991	0.00	0.02	0.09	1.06	1.17
1992	0.00	0.11	0.90	1.69	2.69
1993	0.00	0.02	0.54	1.90	2.46
1994	0.00	0.15	1.25	3.60	5.00
1995	0.00	0.13	1.52	3.81	5.46
1996	0.00	0.32	2.06	7.19	9.57
1997	0.00	1.70	3.40	5.50	10.60
1998	0.00	4.92	6.27	4.02	15.20
1999	0.00	7.10	5.37	5.29	17.76
2000	0.00	6.83	5.19	5.50	17.52
2001	0.00	5.89	3.94	2.96	12.79
2002	0.02	25.16	14.95	14.38	54.51
2003	0.00	27.94	16.38	21.78	66.11
2004	0.00	38.14	21.30	30.67	90.11
2005	0.00	49.80	24.25	43.78	117.84
2006	0.04	58.05	25.33	37.44	120.85
2007	0.08	42.44	26.76	36.80	106.09
2008	0.29	27.92	22.11	34.47	84.79
2009	0.31	68.01	83.68	114.63	266.63
2010	0.90	35.87	58.35	99.83	194.96
2011	2.59	40.58	77.69	129.44	250.30
2012	5.40	45.16	88.43	111.04	250.02
2013	6.13	47.83	94.24	131.76	279.96
2014	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08
2015	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08
2016	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08
2017	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08
2018	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08
2019	26.76	208.94	411.72	575.64	1223.08

Tabelle 5-10: Maximalszenario, durch installierte Mini-BHKW erzeugte Strommengen (GWh)

Leistungsbereich (kW _{el})	<2	2-10	10-20	20-50	Summe
1990	0.00	0.02	0.45	0.63	1.10
1991	0.00	0.04	0.54	1.69	2.27
1992	0.00	0.15	1.43	3.38	4.96
1993	0.00	0.17	1.97	5.29	7.43
1994	0.00	0.32	3.22	8.88	12.42
1995	0.00	0.45	4.74	12.69	17.88
1996	0.00	0.76	6.80	19.88	27.45
1997	0.00	2.46	10.20	25.38	38.04
1998	0.00	7.38	16.47	29.40	53.24
1999	0.00	14.48	21.84	34.69	71.00
2000	0.00	21.31	27.03	40.19	88.52
2001	0.00	27.20	30.97	43.15	101.31
2002	0.02	52.36	45.91	57.53	155.83
2003	0.03	80.31	62.29	79.31	221.94
2004	0.03	118.44	83.59	109.98	312.05
2005	0.03	168.24	107.85	153.76	429.88
2006	0.07	226.27	132.73	190.56	549.63
2007	0.16	268.69	159.40	226.31	654.55
2008	0.45	296.50	180.61	259.09	736.65
2009	0.75	364.49	263.76	371.82	1000.82
2010	1.66	400.21	320.86	468.05	1190.78
2011	4.25	440.66	397.02	593.68	1435.62
2012	9.65	485.50	483.39	697.53	1676.07
2013	15.78	531.63	574.23	823.79	1945.44
2014	42.54	735.66	979.69	1395.42	3153.31
2015	69.31	937.50	1386.05	1965.77	4358.63
2016	96.07	1139.62	1792.58	2535.92	5564.19
2017	122.84	1342.67	2200.37	3108.60	6774.47
2018	149.58	1526.45	2597.14	3669.86	7943.03
2019	176.34	1707.45	2992.49	4223.72	9100.00

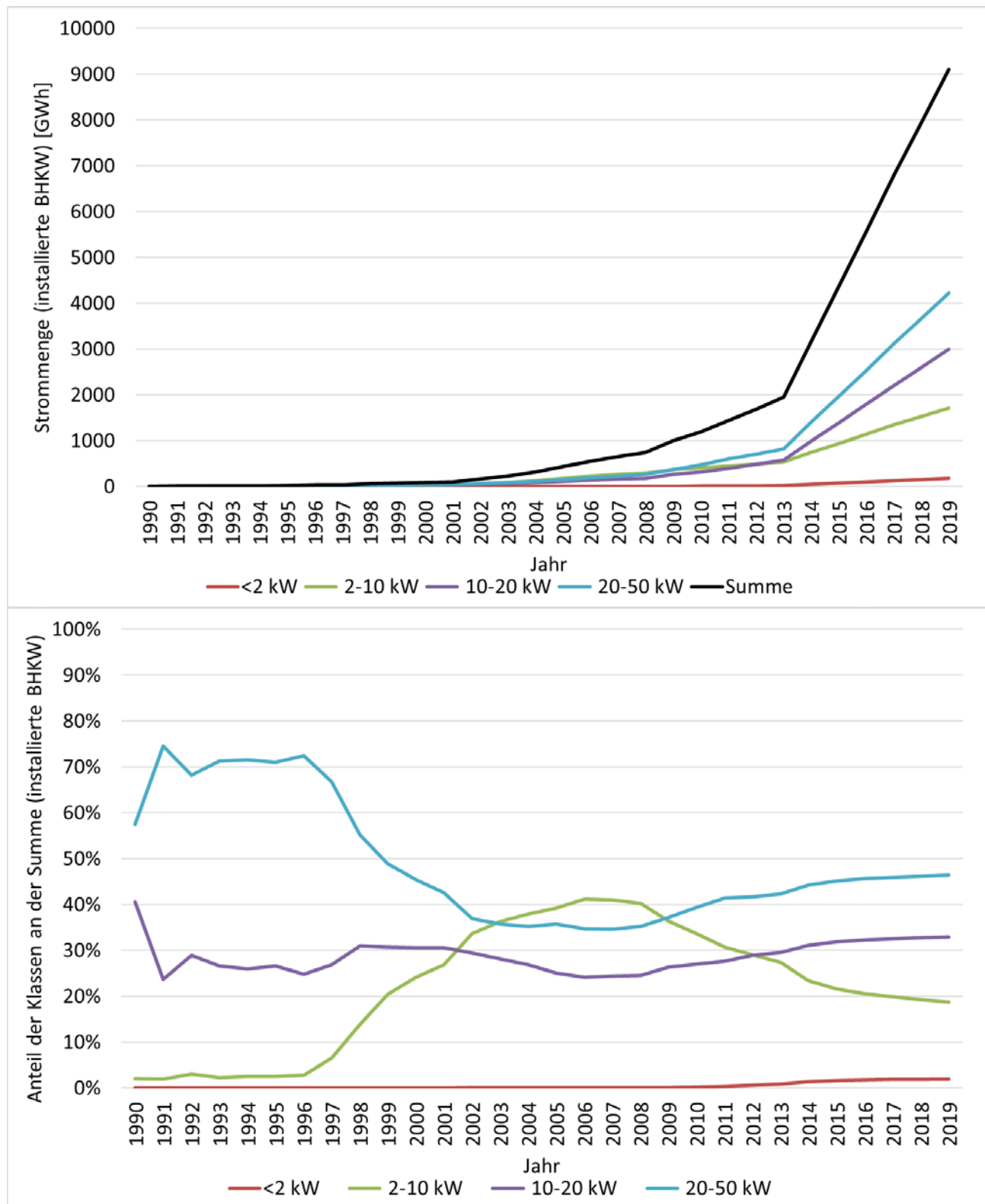
Abbildung 5-7 zeigt die Entwicklung der durch die zugebauten BHKW erzeugten Strommengen pro Jahr gemäß Tabelle 5-9 im Maximalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Die Anteile unterscheiden sich auf Grund der Festlegung in Abschnitt 5.2.1 nicht von denen im Minimalszenario. Abbildung 5-8 zeigt die durch die insgesamt installierten Mini-BHKW erzeugten Strommengen gemäß Tabelle 5-10 im Maximalszenario für die einzelnen Leistungsklassen und als Summe sowie die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe. Die Anteile unterscheiden sich nur geringfügig von denen im Minimalszenario, die Absolutwerte sind sowohl im Zubau als auch bei den insgesamt erzeugten Strommengen deutlich höher als im Minimalszenario.

Abbildung 5-7: Maximalszenario, durch zugebaute BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-8: Maximalszenario, durch installierte BHKW erzeugte Strommengen in Deutschland (oben) und Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Summe (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.2.4 Zusammenstellung der Strom- und Wärmemengen

Aus den Auswertungen für das Minimalszenario in Abschnitt 5.2.2 bzw. für das Maximalszenario in Abschnitt 5.2.3 ergeben sich die Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020 gemäß Tabelle 5-11. Die Strommenge von 9100 GWh im Maximalszenario wurde dabei entsprechend Abschnitt 5.2.1 nach Nitsch et al. (2012) vorgegeben. Basierend auf diesen Werten werden im Weiteren die Emissionsmengen bestimmt.

Tabelle 5-11: Strom- und Wärmemengen für das Jahr 2020

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
mittlere elektrische Leistung	kW	1.05	5.30	17.90	42.30	
mittlere thermische Leistung	kW	3.00	12.00	41.00	84.00	
Erdgaseinsatz, bezogen auf H _i	kW	5.00	20.00	57.50	127.00	
Volllaststunden	h	3 500	4 000	5 000	5 000	
Minimalszenario (Zubau 2014-2019 wie 2013)						
Anzahl BHKW, Summe 2004-2019		14 289	34 941	12 152	7 378	68 760
Strommenge 2020	GWh	52.5	740.7	1 087.6	1 560.4	3 441.3
Wärmemenge 2020	GWh	150.0	1 677.2	2 491.2	3 098.8	7 417.1
Maximalszenario (nach Nitsch et al., 2012)						
Anzahl BHKW, Summe 2004-2019		47 983	80 540	33 436	19 970	181 929
Strommenge 2020	GWh	176.3	1 707.5	2 992.5	4 223.7	9 100.0
Wärmemenge 2020	GWh	503.8	3 865.9	6 854.3	8 387.5	19 611.6

5.3 Berechnung der Emissionen im Jahr 2020

5.3.1 BHKW-Emissionen

Die durch BHKW erzeugten Emissionen wurden aus den in Abschnitt 5.2 berechneten Strommengen für das Jahr 2020 und den Emissionsfaktoren für die betrachteten Stoffe bestimmt.

Für die Emissionsfaktoren wurde mit dem Auftraggeber eine hohe und eine niedrige Abschätzung abgestimmt (Tabelle 5-12). Gemäß Abschnitt 5.2.1 werden ausschließlich Erdgas-BHKW betrachtet. Andere Gasarten als Erdgas (z. B. Klärgas, Biogas etc.) wurden in Absprache mit dem Auftraggeber vernachlässigt, da sie im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} auch zukünftig allenfalls eine unbedeutende Rolle spielen werden. Entsprechend wurden im Folgenden nur die für Erdgas-BHKW relevanten NO_x- und NMVOC-Emissionen betrachtet. Die Emissionsfaktoren beziehen sich auf den Brennstoffeinsatz.

Tabelle 5-12: Emissionsfaktoren Erdgas-BHKW, Bezugsjahr 2011

Stoff		Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung
-------	--	---------------------------------------	---

Stoff		Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung
NO _x	t/GWh	0.32760 ¹	0.11250 ²
SO ₂	t/GWh	--	--
PM10	t/GWh	--	--
PM2.5	t/GWh	--	--
NMVOC	t/GWh	0.02304 ¹	0.01152 ³

¹: aus dem Zentralen System Emissionen für genehmigungsbedürftige Erdgasmotoren des UBA

²: RAL gGmbH (2012)

³: da für NMVOC nur ein Wert aus [¹] vorliegt, wird als niedrige Abschätzung in erster Näherung die Hälfte des Werte aus [¹] angesetzt

Aus den Strommengen aus Abschnitt 5.2.4, der in der BAFA-Liste angegebenen mittleren elektrischen Leistung pro Leistungsklasse und dem Erdgaseinsatz bezogen auf den Heizwert H_i gemäß Abschnitt 5.2.1 wurde der Brennstoffeinsatz für BHKW im Jahr 2020 im Minimalszenario (Tabelle 5-13) und im Maximalszenario (Tabelle 5-14) berechnet. Zusammen mit den Emissionsfaktoren gemäß Tabelle 5-12 ergeben sich daraus die BHKW-Emissionen im Minimal- und im Maximalszenario (Tabelle 5-13, Tabelle 5-14), jeweils für die hohe und für die niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren.

Tabelle 5-13: Eingangsgrößen und Emissionen der Erdgas-BHKW im Jahr 2020 im Minimalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
mittlere elektrische Leistung	kW	1.05	5.30	17.90	42.30	
Erdgaseinsatz, bezogen auf H _i	kW	5.00	20.00	57.50	127.00	
Erdgaseinsatz BHKW	GWh/a	250.06	2 795.28	3 493.70	4 685.03	11 224.07
hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren						
NO _x	t/a	81.92	915.73	1 144.54	1 534.82	3 677.00
SO ₂	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM10	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM2.5	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NM VOC	t/a	5.76	64.40	80.49	107.94	258.60
niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren						
NO _x	t/a	28.13	314.47	393.04	527.07	1 262.71
SO ₂	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM10	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM2.5	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NM VOC	t/a	2.88	32.20	40.25	53.97	129.30

Tabelle 5-14: Eingangsgrößen und Emissionen der Erdgas-BHKW im Jahr 2020 im Maximalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
mittlere elektrische Leistung	kW	1.05	5.30	17.90	42.30	
Erdgaseinsatz, bezogen auf H _i	kW	5.00	20.00	57.50	127.00	
Erdgaseinsatz BHKW	GWh	839.70	6 443.21	9 612.75	12 681.15	29 576.81
hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren						
NO _x	t/a	275.09	2 110.80	3 149.14	4 154.34	9 689.36
SO ₂	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM10	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM2.5	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NM VOC	t/a	19.35	148.45	221.48	292.17	681.45
niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren						
NO _x	t/a	94.47	724.86	1 081.43	1 426.63	3 327.39
SO ₂	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM10	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM2.5	t/a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NM VOC	t/a	9.67	74.23	110.74	146.09	340.72

5.3.2 Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung

Die durch den BHKW-Einsatz vermiedenen Emissionen der Stromerzeugung wurden aus den in Abschnitt 5.2 berechneten Strommengen für das Jahr 2020 und den Emissionsfaktoren für die betrachteten Stoffe bestimmt. Die zu verwendenden Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes wurden vom Auftraggeber bereitgestellt (Tabelle 5-15). Damit ergeben sich die vermiedenen Emissionen der Stromerzeugung für das Minimalszenario gemäß Tabelle 5-16 und für das Maximalszenario gemäß Tabelle 5-17.

Tabelle 5-15: Emissionsfaktoren deutscher Strommix, Bezugsjahr 2011

Stoff		Emissionsfaktoren
NO _x	t/GWh	0.538
SO ₂	t/GWh	0.349
PM10	t/GWh	0.020
PM2.5	t/GWh	0.018
NM VOC	t/GWh	0.027

Tabelle 5-16: Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2020 im Minimalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
NO _x	t/a	28.25	398.52	585.13	839.52	1 851.43
SO ₂	t/a	18.33	258.52	379.57	544.60	1 201.02
PM10	t/a	1.05	14.81	21.75	31.21	68.83
PM2.5	t/a	0.95	13.33	19.58	28.09	61.94
NM VOC	t/a	1.42	20.00	29.37	42.13	92.92

Tabelle 5-17: Vermiedene Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2020 im Maximalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
NO _x	t/a	94.87	918.61	1 609.96	2 272.36	4 895.80
SO ₂	t/a	61.54	595.90	1 044.38	1 474.08	3 175.90
PM10	t/a	3.53	34.15	59.85	84.47	182.00
PM2.5	t/a	3.17	30.73	53.86	76.03	163.80
NM VOC	t/a	4.76	46.10	80.80	114.04	245.70

5.3.3 Vermiedene Emissionen der Wärmeerzeugung

Die durch den BHKW-Einsatz vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung durch Gas- und Ölheizkessel wurden aus den in Abschnitt 5.2 berechneten Wärmemengen für das Jahr 2020 und den Emissionsfaktoren für die betrachteten Stoffe bestimmt. Die zu verwendenden Emissionsfaktoren für Erdgas- und Heizölkessel wurden ebenfalls vom Auftraggeber bereitgestellt (Tabelle 5-18). Die Emissionsfaktoren beziehen sich auf den Brennstoffeinsatz.

Tabelle 5-18: Emissionsfaktoren Erdgas und Heizöl leicht (für Heizkessel im Geltungsbereich der 1. BImSchV)

Stoff		Emissionsfaktoren Erdgas	Emissionsfaktoren Heizöl leicht
NO _x	t/GWh	0.097920	0.157140
SO ₂	t/GWh	0.001800	0.214344
PM10	t/GWh	0.001080	0.004716
PM2.5	t/GWh	0.001080	0.004716
NM VOC	t/GWh	0.002412	0.006012

Zur Bestimmung des Brennstoffeinsatzes aus den Wärmemengen nach Abschnitt 5.2.4 wurde für Gasheizkessel ein mittlerer Wirkungsgrad von 0.9 und für Ölheizkessel ein mittlerer Wirkungsgrad von 0.85 angesetzt. Damit ergeben sich die Brennstoffeinsätze und die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung für das Minimalszenario gemäß Tabelle 5-19 und für das Maximalszenario gemäß Tabelle 5-20.

Tabelle 5-19: Eingangsgrößen und vermiedene Emissionen der Wärmeerzeugung durch Gas- und Ölheizkessel im Jahr 2020 im Minimalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Brennstoffeinsatz Gasheizung	GWh/ a	166.71	1 863.52	2 767.96	3 443.07	8 241.25
Brennstoffeinsatz Ölheizung	GWh/ a	176.51	1 973.14	2 930.78	3 645.60	8 726.03
Gasheizkessel						
NO _x	t/a	16.32	182.48	271.04	337.15	806.98
SO ₂	t/a	0.30	3.35	4.98	6.20	14.83
PM10	t/a	0.18	2.01	2.99	3.72	8.90
PM2.5	t/a	0.18	2.01	2.99	3.72	8.90
NM VOC	t/a	0.40	4.49	6.68	8.30	19.88
Ölheizkessel						
NO _x	t/a	27.74	310.06	460.54	572.87	1371.21
SO ₂	t/a	37.83	422.93	628.19	781.41	1870.37
PM10	t/a	0.83	9.31	13.82	17.19	41.15
PM2.5	t/a	0.83	9.31	13.82	17.19	41.15
NM VOC	t/a	1.06	11.86	17.62	21.92	52.46

Tabelle 5-20: Eingangsgrößen und vermiedene Emissionen der Wärmeerzeugung durch Gas- und Ölheizkessel im Jahr 2020 im Maximalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Energieeinsatz Gasheizung	GWh/ a	559.80	4 295.47	7 615.90	9 319.48	21 790.65
Energieeinsatz Ölheizung	GWh/ a	592.73	4 548.15	8 063.89	9 867.69	23 072.46
Gasheizkessel						
NO _x	t/a	54.82	420.61	745.75	912.56	2 133.74
SO ₂	t/a	1.01	7.73	13.71	16.78	39.22
PM10	t/a	0.60	4.64	8.23	10.07	23.53
PM2.5	t/a	0.60	4.64	8.23	10.07	23.53
NM VOC	t/a	1.35	10.36	18.37	22.48	52.56
Ölheizkessel						
NO _x	t/a	93.14	714.70	1 267.16	1 550.61	3 625.61
SO ₂	t/a	127.05	974.87	1 728.45	2 115.08	4 945.44
PM10	t/a	2.80	21.45	38.03	46.54	108.81
PM2.5	t/a	2.80	21.45	38.03	46.54	108.81
NM VOC	t/a	3.56	27.34	48.48	59.32	138.71

5.3.4 Zusammenstellung der Emissionsszenarien im Jahr 2020

5.3.4.1 Minimalszenario

In Tabelle 5-21 sind die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Stoffe dargestellt. Die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau ergeben sich als Differenz aus den BHKW-Emissionen nach Tabelle 5-13 und der Summe der vermiedenen Emissionen aus Strom- und Wärmeerzeugung gemäß Tabelle 5-16 und Tabelle 5-19. Die BHKW-Emissionen werden dabei nach hoher und niedriger Abschätzung der zugehörigen Emissionsfaktoren differenziert, die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung nach Gas- und Ölheizkesseln.

Es ergeben sich im Rahmen des Minimalszenarios die BHKW-bedingten Emissionsänderungen für die Szenarien 1 bis 4 entsprechend Tabelle 5-1. Negative Werte zeigen durch den Einsatz von BHKW bedingte Minderemissionen an. Da für die Stoffe SO₂, PM10 und PM2.5 bei den Erdgas-BHKW keine Emissionen angesetzt wurden, ergeben sich hier ausschließlich Minderemissionen durch vermiedene Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung.

Tabelle 5-21: BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 im Minimalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Szenario 1: hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel						
NO _x	t/a	37.34	334.73	288.37	358.15	1018.60
SO ₂	t/a	-18.63	-261.88	-384.56	-550.79	-1215.85
PM10	t/a	-1.23	-16.83	-24.74	-34.93	-77.73
PM2.5	t/a	-1.13	-15.35	-22.57	-31.81	-70.84
NMVOC	t/a	3.94	39.91	44.45	57.51	145.81
Szenario 2: hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Ölheizkessel						
NO _x	t/a	25.93	207.15	98.86	122.43	454.37
SO ₂	t/a	-56.16	-681.45	-1007.77	-1326.01	-3071.39
PM10	t/a	-1.88	-24.12	-35.57	-48.40	-109.98
PM2.5	t/a	-1.78	-22.64	-33.40	-45.28	-103.10
NMVOC	t/a	3.28	32.54	33.51	43.89	113.23
Szenario 3: niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel						
NO _x	t/a	-16.44	-266.53	-463.13	-649.60	-1395.70
SO ₂	t/a	-18.63	-261.88	-384.56	-550.79	-1215.85
PM10	t/a	-1.23	-16.83	-24.74	-34.93	-77.73
PM2.5	t/a	-1.13	-15.35	-22.57	-31.81	-70.84
NMVOC	t/a	1.06	7.71	4.21	3.53	16.51
Szenario 4: niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Ölheizkessel						
NO _x	t/a	-27.86	-394.11	-652.63	-885.32	-1959.93
SO ₂	t/a	-56.16	-681.45	-1007.77	-1326.01	-3071.39
PM10	t/a	-1.88	-24.12	-35.57	-48.40	-109.98
PM2.5	t/a	-1.78	-22.64	-33.40	-45.28	-103.10
NMVOC	t/a	0.40	0.34	-6.74	-10.08	-16.08

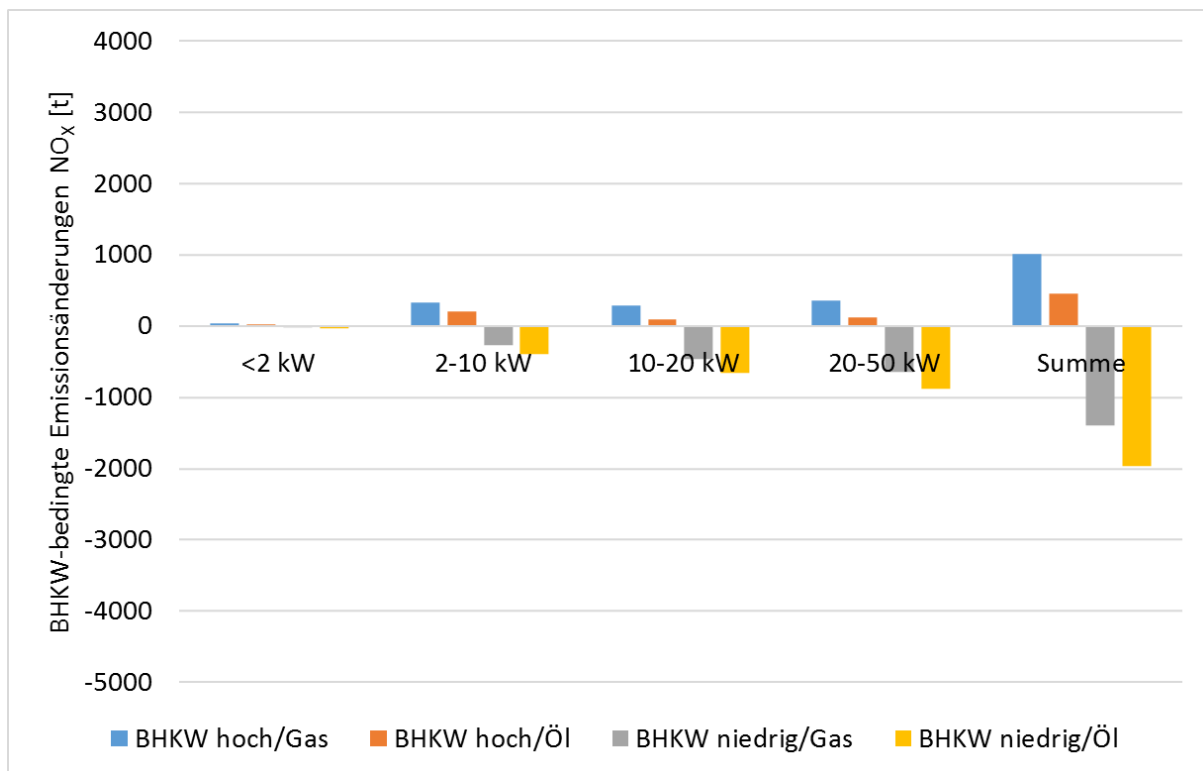
In Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-13 sind die BHKW-bedingten Emissionsänderungen der einzelnen Stoffe im Jahr 2020 getrennt nach Leistungsklassen und als Summe für das Minimalszenario dargestellt.

Für NO_x (Abbildung 5-9) ergeben sich durch BHKW bedingte Mehremissionen, wenn für die BHKW die hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren angesetzt wird. Wird die niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren angesetzt, so ergeben sich Minderemissionen. Niedrigere Mehr- und höhere Minderemissionen ergeben sich, wenn Ölheizkessel statt Gasheizkessel durch BHKW ersetzt werden, da zum einen für die Ölheizkessel ein schlechterer Wirkungsgrad angesetzt und damit ein höherer Brennstoffeinsatz bestimmt wurde als für Gasheizkessel, und zum anderen die Emissionsfaktoren für Ölheizkessel höher sind als für Gasheizkessel.

Für die Stoffe SO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ in Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 ergeben sich, wie oben beschrieben, ausschließlich Minderemissionen durch vermiedene Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung. Diese sind analog zu NO_x größer, wenn Öl- statt Gasheizkessel ersetzt werden. Die Minderemissionen sind zudem umso größer, je größer die betrachtete Leistungsklasse ist, da auch die zu Grunde liegenden Strom- und Wärmemengen bzw. die daraus resultierenden Brennstoffeinsätze umso größer sind, je größer die betrachtete Leistungsklasse ist.

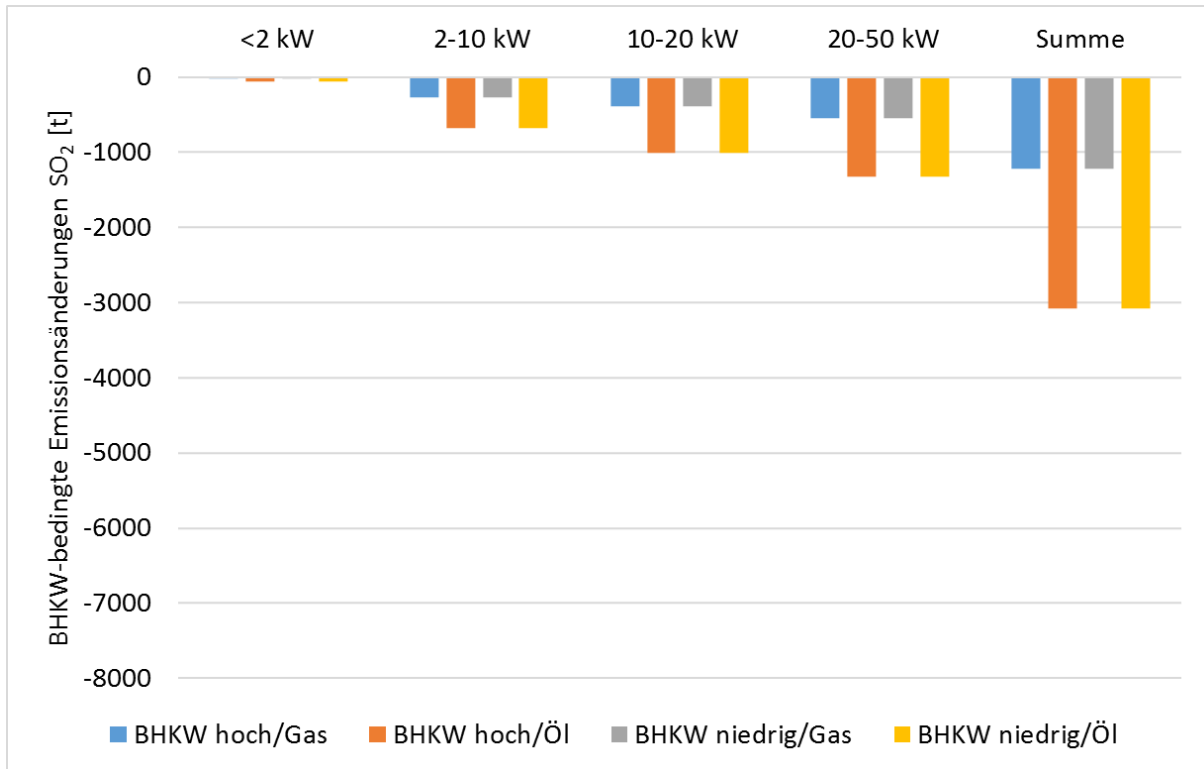
Für NMVOC (Abbildung 5-13) ergeben sich in der Regel durch BHKW bedingte Mehremissionen. Nur für die oberen beiden Leistungsklassen 10-20 kW und 20-50 kW und damit auch in der Summe über alle Leistungsklassen ergeben sich Minderemissionen, wenn niedrige Emissionsfaktoren für BHKW angesetzt und gleichzeitig Ölheizkessel durch BHKW ersetzt werden. Gründe für die höheren vermiedenen Emissionen beim Ersatz von Ölheizkesseln im Vergleich zu Gasheizkesseln sind wie bei NO_x die höheren Emissionsfaktoren der Ölheizkessel und der schlechtere Wirkungsgrad und damit höhere Brennstoffeinsatz bei Ölheizkesseln.

Abbildung 5-9: NO_x -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020



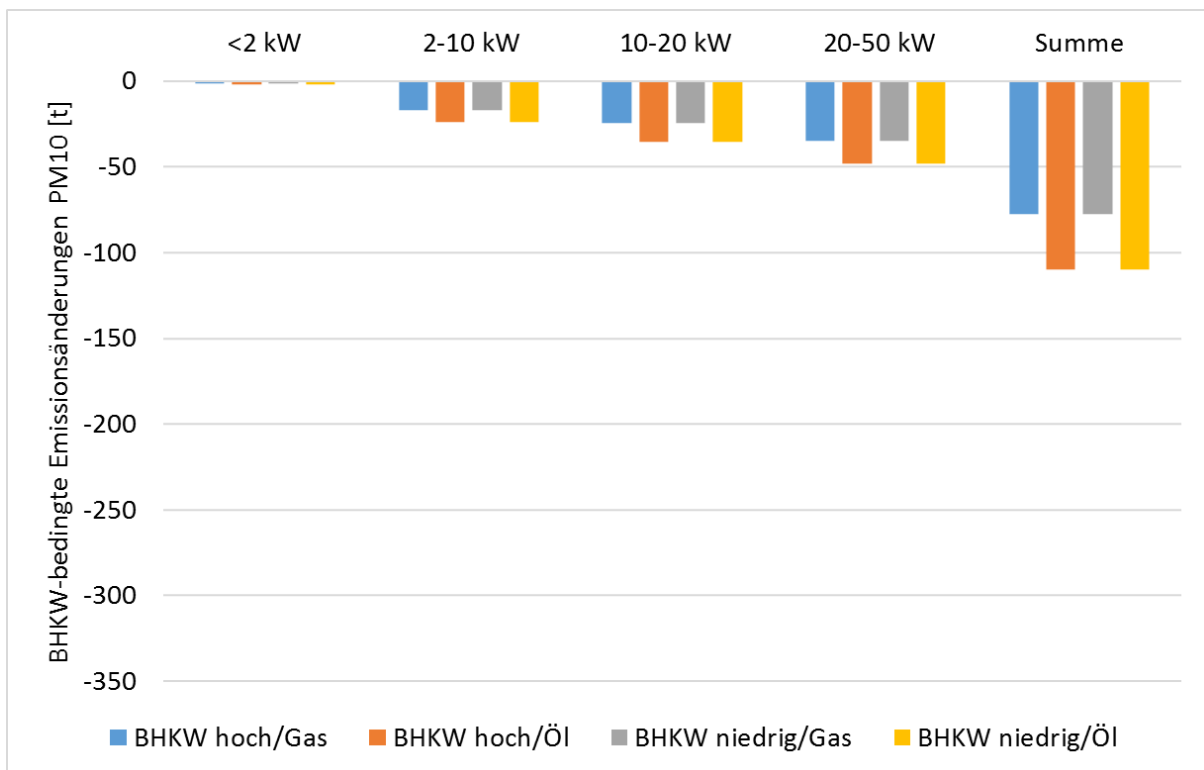
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-10: SO₂-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020



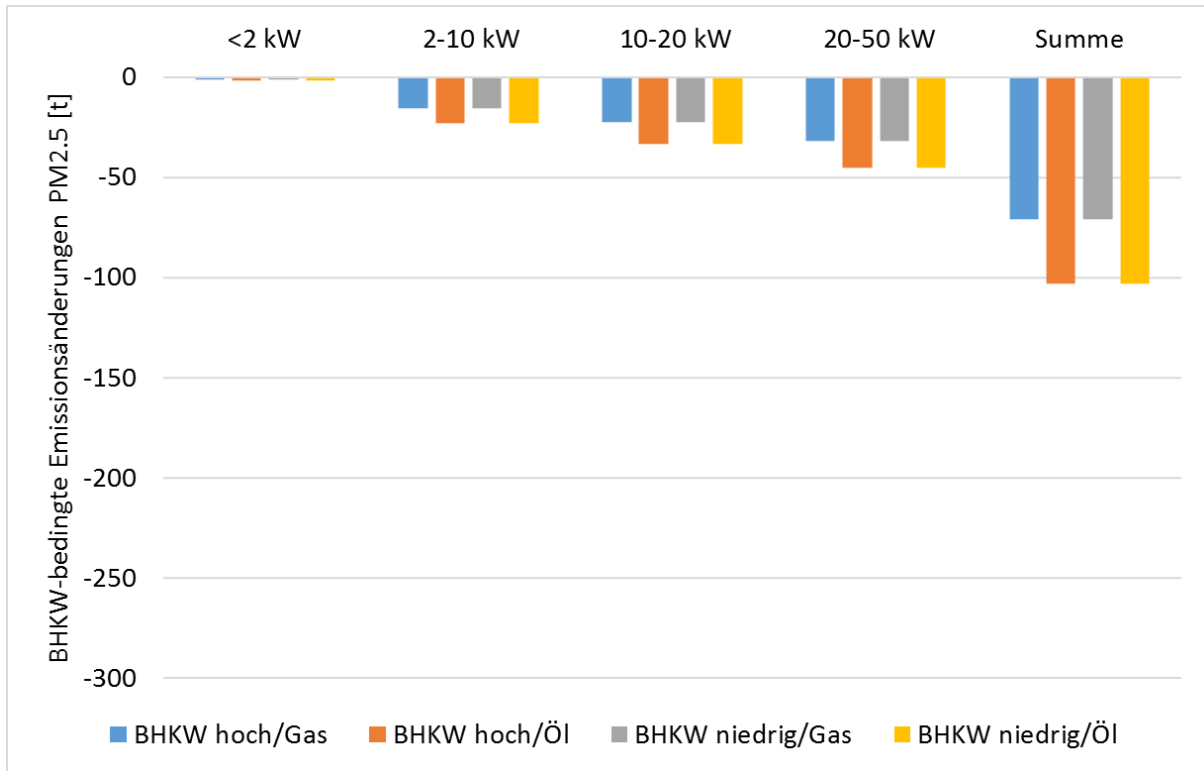
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-11: PM₁₀-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020



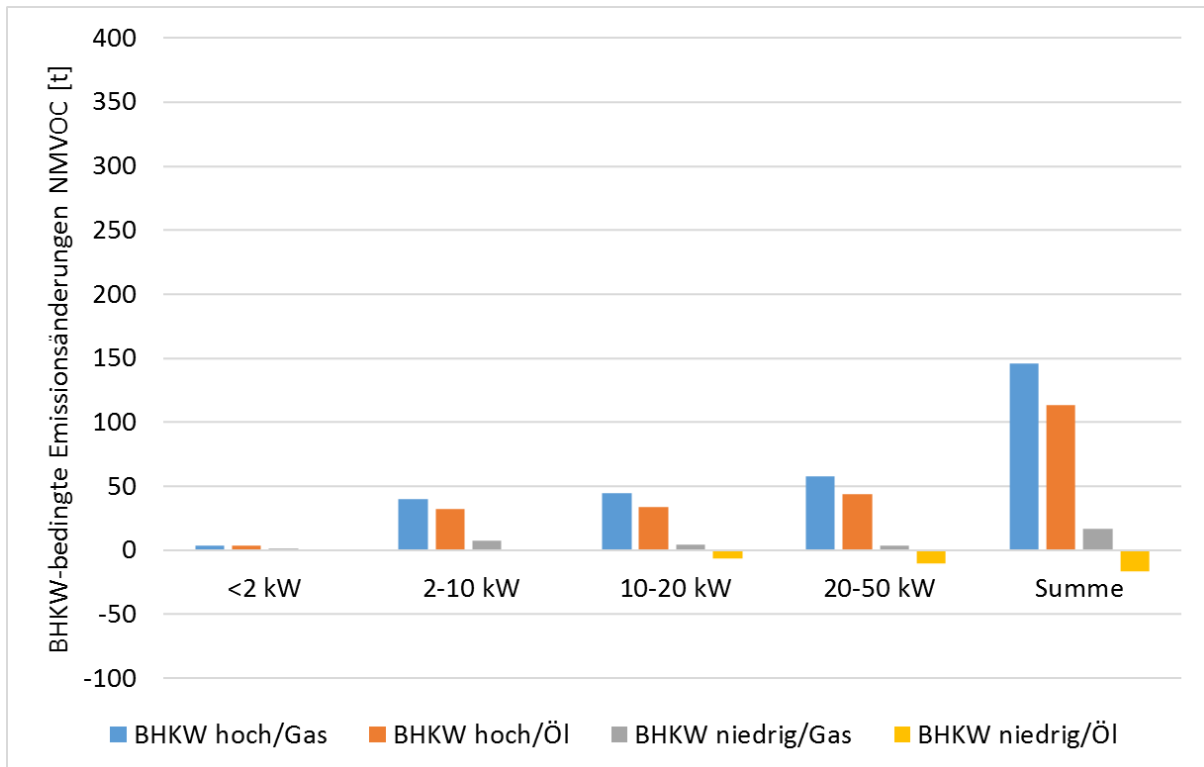
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-12: PM2.5-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-13: NMVOC-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Minimalszenario im Jahr 2020



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.3.4.2 Maximalszenario

In Tabelle 5-22 sind die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Stoffe dargestellt. Die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau ergeben sich als Differenz aus den BHKW-Emissionen nach Tabelle 5-14 und der Summe der vermiedenen Emissionen aus Strom- und Wärmeerzeugung gemäß Tabelle 5-17 und Tabelle 5-20. Die BHKW-Emissionen werden dabei nach hoher und niedriger Abschätzung der zugehörigen Emissionsfaktoren differenziert, die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung nach Gas- und Ölheizkesseln.

Es ergeben sich im Rahmen des Maximalszenarios die BHKW-bedingten Emissionsänderungen für die Szenarien 5 bis 8 entsprechend Tabelle 5-1. Negative Werte zeigen durch den Einsatz von BHKW bedingte Minderemissionen an. Da für die Stoffe SO₂, PM10 und PM2.5 bei den Erdgas-BHKW keine Emissionen angesetzt wurden, ergeben sich hier auch im Maximalszenario ausschließlich Minderemissionen durch vermiedene Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung.

Tabelle 5-22: BHKW-bedingte Emissionsänderungen im Jahr 2020 im Maximalszenario

Leistungsbereich (kW _{el})		<2	2-10	10-20	20-50	Summe
Szenario 5: hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel						
NO _x	t/a	125.40	771.57	793.43	969.42	2659.82
SO ₂	t/a	-62.55	-603.63	-1058.09	-1490.85	-3215.12
PM10	t/a	-4.13	-38.79	-68.07	-94.54	-205.53
PM2.5	t/a	-3.78	-35.37	-62.09	-86.09	-187.33
NM VOC	t/a	13.24	91.99	122.31	155.65	383.19
Szenario 6: hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Ölheizkessel						
NO _x	t/a	87.08	477.49	272.02	331.37	1167.96
SO ₂	t/a	-188.59	-1570.77	-2772.83	-3589.16	-8121.34
PM10	t/a	-6.32	-55.60	-97.88	-131.01	-290.81
PM2.5	t/a	-5.97	-52.18	-91.89	-122.56	-272.61
NM VOC	t/a	11.02	75.01	92.20	118.81	297.04
Szenario 7: niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel						
NO _x	t/a	-55.22	-614.36	-1274.27	-1758.30	-3702.15
SO ₂	t/a	-62.55	-603.63	-1058.09	-1490.85	-3215.12
PM10	t/a	-4.13	-38.79	-68.07	-94.54	-205.53
PM2.5	t/a	-3.78	-35.37	-62.09	-86.09	-187.33
NM VOC	t/a	3.56	17.76	11.57	9.57	42.47
Szenario 8: niedrige Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Ölheizkessel						
NO _x	t/a	-93.54	-908.44	-1795.69	-2396.34	-5194.01
SO ₂	t/a	-188.59	-1570.77	-2772.83	-3589.16	-8121.34
PM10	t/a	-6.32	-55.60	-97.88	-131.01	-290.81
PM2.5	t/a	-5.97	-52.18	-91.89	-122.56	-272.61
NM VOC	t/a	1.35	0.78	-18.54	-27.28	-43.69

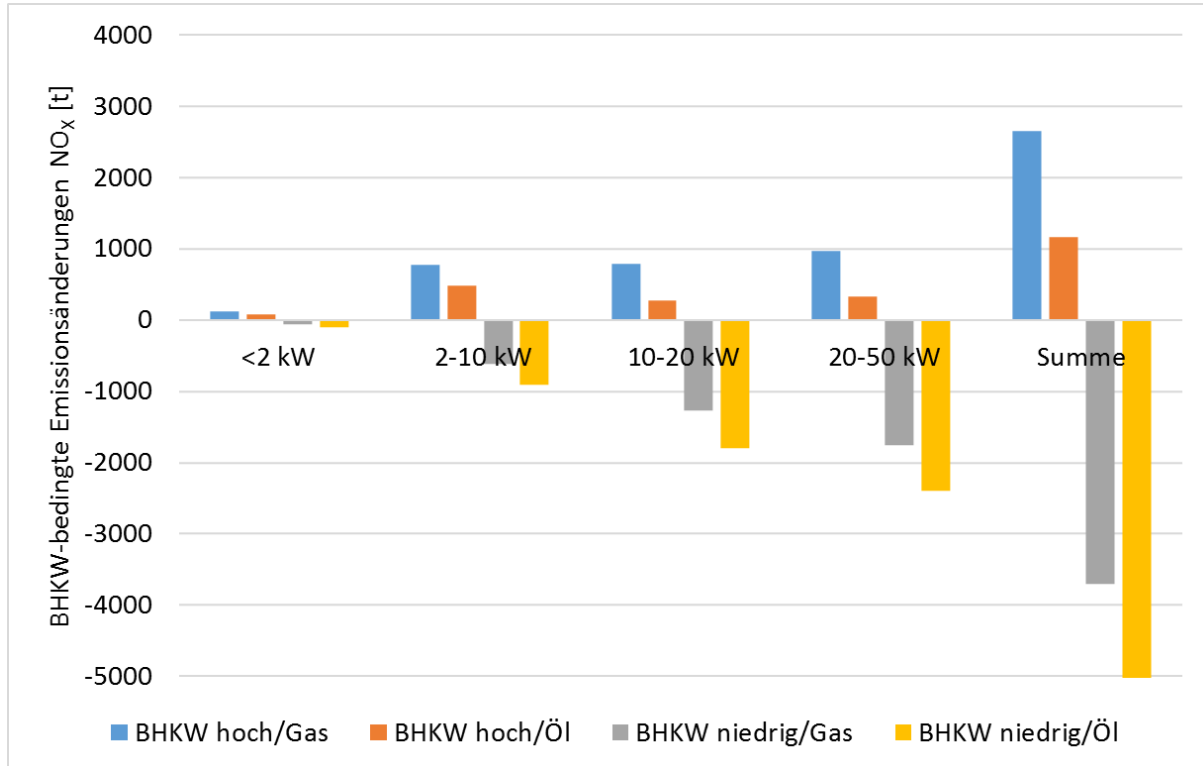
In Abbildung 5-14 bis Abbildung 5-18 sind die BHKW-bedingten Emissionsänderungen der einzelnen Stoffe im Jahr 2020 getrennt nach Leistungsklassen und als Summe für das Maximalszenario dargestellt.

Für NO_x (Abbildung 5-14) ergeben sich analog zum Minimalszenario durch BHKW bedingte Mehrmissionen, wenn für die BHKW die hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren angesetzt wird. Wird die niedrige Abschätzung der BHKW-Emissionsfaktoren angesetzt, so ergeben sich Mindermissionen. Niedrigere Mehr- und höhere Mindermissionen ergeben sich, wenn Öl- statt Gasheizkessel durch BHKW ersetzt werden, da zum einen für die Ölheizkessel ein schlechterer Wirkungsgrad angesetzt und damit ein höherer Brennstoffeinsatz bestimmt wurde, und zum anderen die Emissionsfaktoren für Ölheizkessel höher sind als für Gasheizkessel.

Für die Stoffe SO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ in Abbildung 5-15 bis Abbildung 5-17 ergeben sich analog zum Minimalszenario ausschließlich Mindermissionen durch vermiedene Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung. Diese sind analog zu NO_x größer, wenn Öl- statt Gasheizkessel ersetzt werden. Die Mindermissionen sind zudem umso größer, je größer die betrachtete Leistungsklasse ist, da auch die zu Grunde liegenden Strom- und Wärmemengen bzw. die daraus resultierenden Brennstoffeinsätze umso höher sind, je größer die betrachtete Leistungsklasse ist.

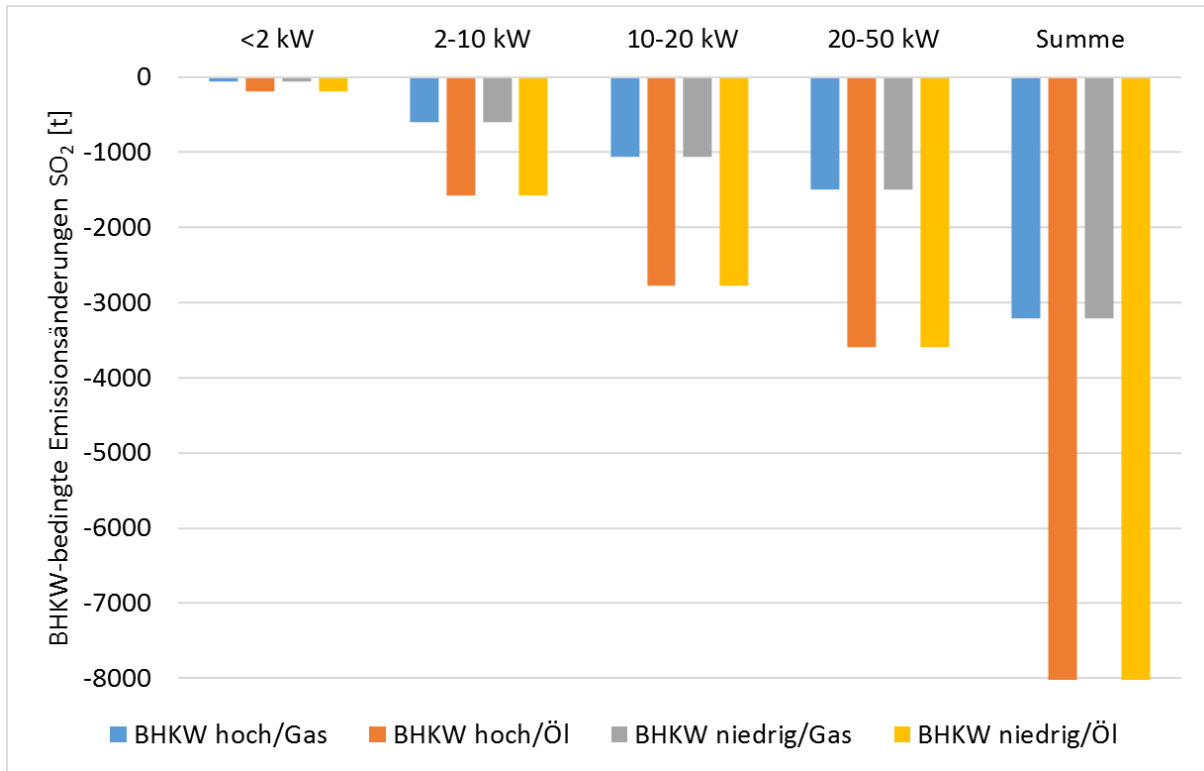
Für NMVOC (Abbildung 5-18) ergeben sich analog zum Minimalszenario in der Regel durch BHKW bedingte Mehrmissionen. Nur für die oberen beiden Leistungsklassen 10-20 kW und 20-50 kW und damit auch in der Summe über alle Leistungsklassen ergeben sich Mindermissionen, wenn niedrige Emissionsfaktoren für BHKW angesetzt und gleichzeitig Ölheizkessel durch BHKW ersetzt werden. Gründe für die höheren vermiedenen Emissionen beim Ersatz von Ölheizkesseln im Vergleich zu Gasheizkesseln sind wie bei NO_x die höheren Emissionsfaktoren der Ölheizkessel und der schlechtere Wirkungsgrad und damit höhere Brennstoffeinsatz bei Ölheizkesseln.

Abbildung 5-14: NO_x -Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020



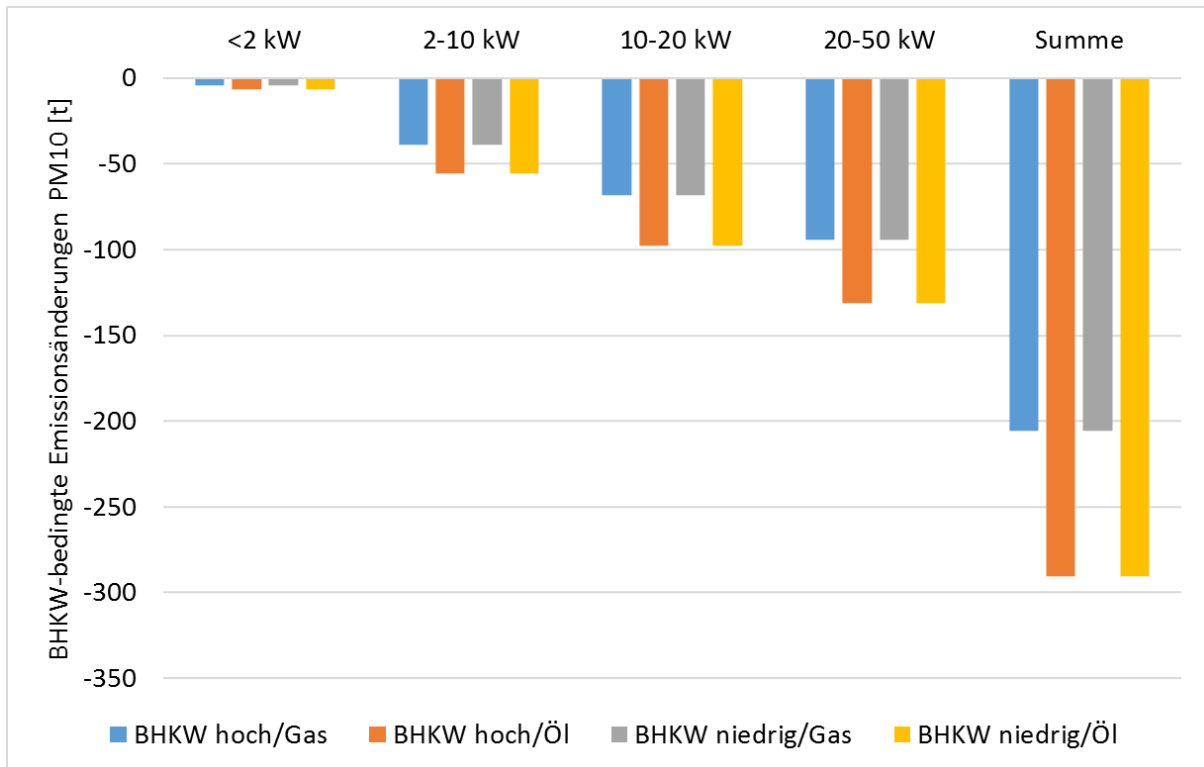
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-15: SO₂-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020



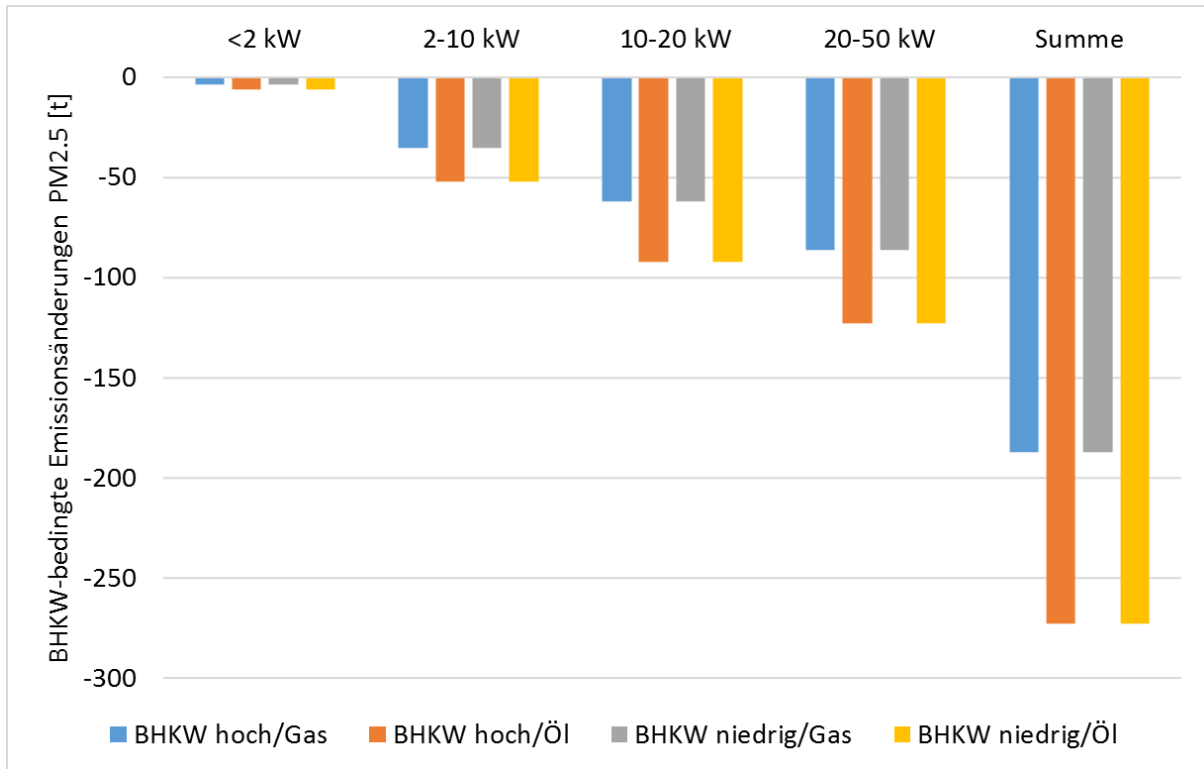
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-16: PM₁₀-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020



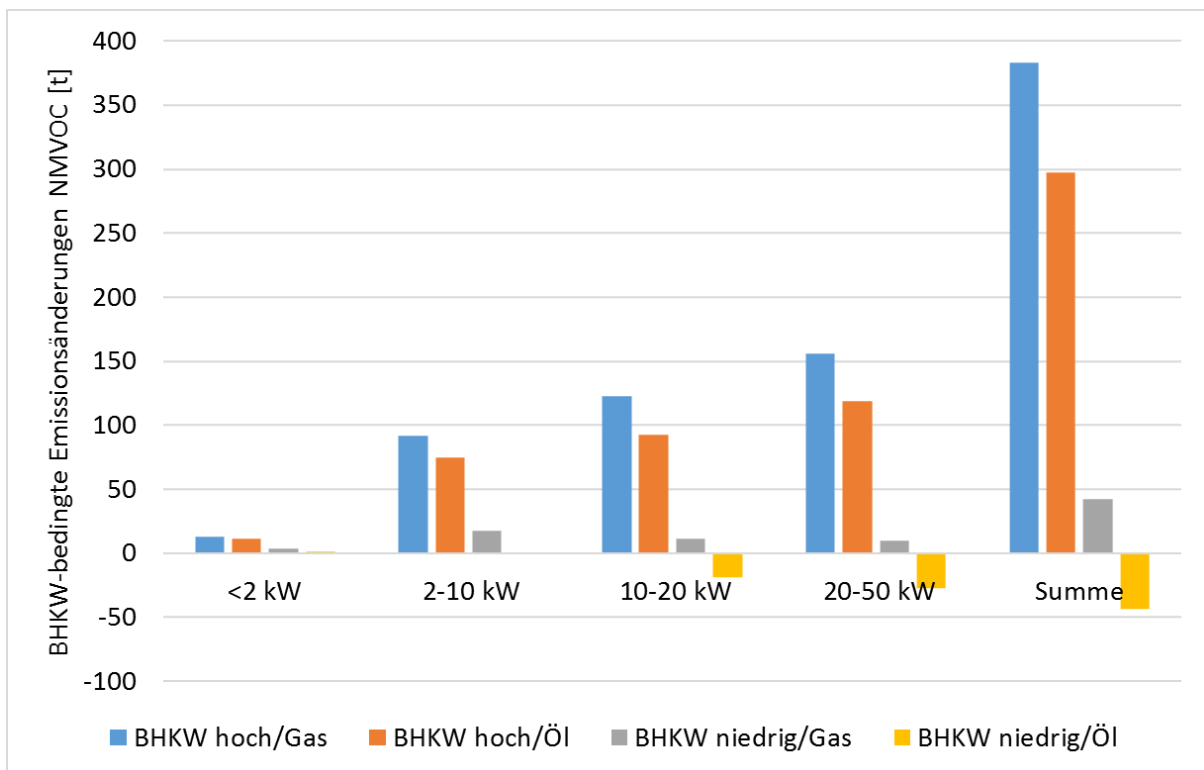
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-17: PM2.5-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 5-8 im Maximalszenario im Jahr 2020



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-18: NMVOC-Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau nach Leistungsklassen und als Summe für die Szenarien 1-4 im Maximalszenario im Jahr 2020



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.4 Downscaling

5.4.1 Vorgehensweise

Mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3 liegen die BHKW-bedingten Emissionsänderungen im Jahr 2020 als Prognose auf nationaler Ebene vor. Zur Abschätzung der durch BHKW erzeugten Wärmemengen und damit Emissionsänderungen auf Stadtteil- und lokaler Modellgebietsebene in Abschnitt 6 sowie für die Immissionsmodellierung auf nationaler Ebene im Raster $7 \times 8 \text{ km}^2$ in Abschnitt 7 mussten sinnvolle Annahmen zur räumlichen Verteilung der Anwendungsdichte von Mini-BHKW in der Prognose getroffen werden.

Dazu wurde ein Downscaling-Ansatz entwickelt, der auf den bundesweiten aktuellen Daten gemäß BAFA-Liste (BAFA, 2014) und auf den Prognosen der BHKW-Entwicklung gemäß Abschnitt 5.2 basiert. Ziel des Ansatzes war es, auf der Basis allgemein verfügbarer Daten die räumliche Verteilung der BHKW-Leistung im aktuellen Zustand und in der Prognose angeben zu können. In Abschnitt 5.4.2 wurden dazu als Grundlage und Ausgangsbasis die räumlichen Verteilungen und zeitlichen Entwicklungen der Daten der BAFA-Liste bis 2013 untersucht. In Abschnitt 5.4.3 wurde die Abhängigkeit der Daten der BAFA-Liste von Parametern wie Einwohnerzahl, Anzahl Wohnungen, Wohnfläche etc. analysiert und in der Folge ein Ansatz für die räumliche Verteilung der Mini-BHKW in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene festgelegt. In Abschnitt 5.4.4 wird das Downscaling der für 2020 prognostizierten Werte auf Modellgebietsebene beschrieben.

5.4.2 Verteilung der Mini-BHKW in Deutschland bis 2013

5.4.2.1 Allgemeines

In der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten BAFA-Liste (2014) sind die zugelassenen BHKW sortiert nach Leistungsklasse mit dem Datum der Inbetriebnahme, Standort und zugehöriger Postleitzahl (PLZ) erfasst. Die BAFA-Liste unterscheidet im Bereich der Mini-BHKW vier Leistungsklassen (bis 2 kW_{el} , $2\text{--}10 \text{ kW}_{\text{el}}$, $10\text{--}20 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $20\text{--}50 \text{ kW}_{\text{el}}$).

Die BAFA-Liste wurde vor der Auswertung zunächst auf ihre Konsistenz überprüft. Eine fehlende Postleitzahl konnte auf Basis des in der BAFA-Liste angegebenen Standorts ergänzt werden (PLZ 98746 für Meuselbach-Schwarzmühle). Zwei Standorte gehören zu Gemeinden in Österreich, die sowohl österreichische als auch deutsche Postleitzahlen haben (87491 Jungholz, 87569 Mittelberg). Die BHKW dieser zwei Standorte wurden dem Bundesland Bayern bzw. dem Landkreis Oberallgäu zugeordnet. Des Weiteren sind in der BAFA-Liste BHKW-Standorte mit Postleitzahlen aufgeführt, die keiner georeferenzierten Postleitzahl zugeordnet werden konnten. Die Überprüfung einzelner dieser Postleitzahlen ergab, dass sich einige dieser Postleitzahlen Firmenadressen zuordnen ließen, während für andere gar keine Entsprechung gefunden werden konnte. Die Anzahl der BHKW-Standorte mit Postleitzahlen, die keiner georeferenzierten Postleitzahl zuzuordnen waren, liegt für alle betrachteten Leistungsklassen unter 1 %. Diese BHKW wurden daher bei den folgenden Auswertungen vernachlässigt.

In den folgenden Abschnitten ist die räumliche Verteilung der Anzahl der installierten Mini-BHKW und der durch diese BHKW erzeugten Strommenge in Deutschland kartografisch dargestellt. Die Anzahl der installierten BHKW wurde aus den Zubauten pro Jahr nach BAFA-Liste und unter Annahme einer mittleren BHKW-Laufzeit von 16 Jahren gemäß Abschnitt 5.2.1 bestimmt. Als energetische Größe wird die erzeugte Strommenge und nicht die Leistung dargestellt, da die Strommenge die je nach Leistungsklasse unterschiedliche Anzahl Volllaststunden pro Jahr berücksichtigt und die emissionsrelevante Größe ist. Als geografische Referenz für die räumliche Verteilung der BHKW wird die Postleitzahl verwendet.

Die Darstellung erfolgt für die drei räumlichen Aggregationsstufen PLZ (Abschnitt 5.4.2.2), Kreis (Abschnitt 5.4.2.3) und Bundesland (Abschnitt 5.4.2.4) für das Jahr 2013. Die Klassengrenzen wurden, soweit nicht anders angegeben, so gewählt, dass sie bei 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 75 % und 100 % vom Maximalwert der jeweiligen Grafik liegen.

Zusätzlich erfolgt eine Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Anzahl der installierten Mini-BHKW seit 1990 und der durch diese BHKW erzeugten Strommenge auf Bundesland-Ebene in Abschnitt 5.4.2.4.

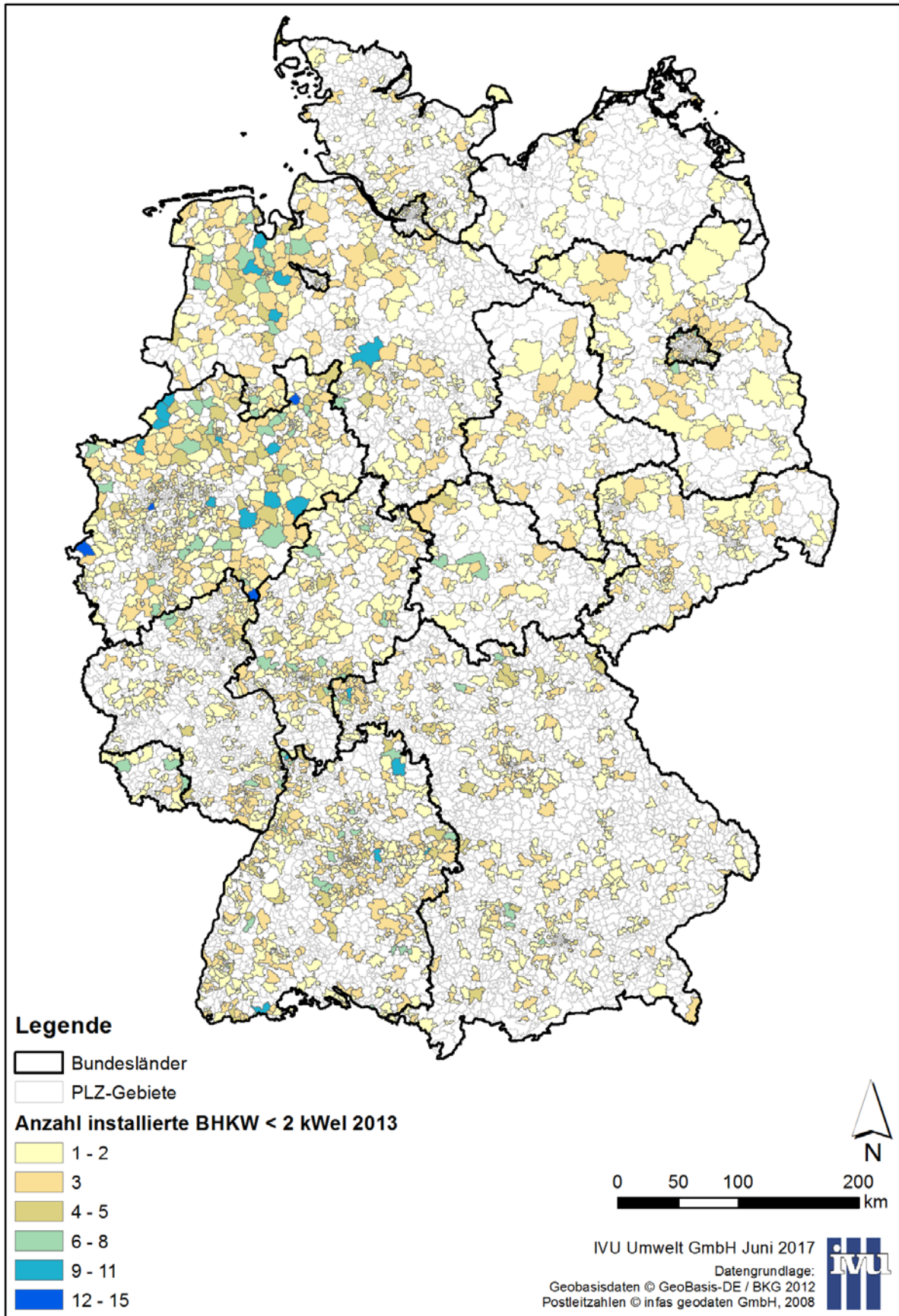
5.4.2.2 Postleitzahl-Ebene

Abbildung 5-19 bis Abbildung 5-22 zeigen die Verteilung der Mini-BHKW für die einzelnen Leistungsklassen $< 2\text{ kW}_{\text{el}}$, $2\text{--}10\text{ kW}_{\text{el}}$, $10\text{--}20\text{ kW}_{\text{el}}$ und $20\text{--}50\text{ kW}_{\text{el}}$ in Deutschland auf Postleitzahl-Ebene. Demnach sind die BHKW der Leistungsklasse $2\text{--}10\text{ kW}_{\text{el}}$ am weitesten in Deutschland verbreitet.

In Abbildung 5-23 ist die Summe der installierten BHKW $< 50\text{ kW}_{\text{el}}$ dargestellt. Die Postleitzahl-Gebiete 38667 (Bad Harzburg) mit 91 installierten BHKW und 31515 (Wunstorf) mit 81 installierten BHKW wiesen im Jahr 2013 die meisten Mini-BHKW auf.

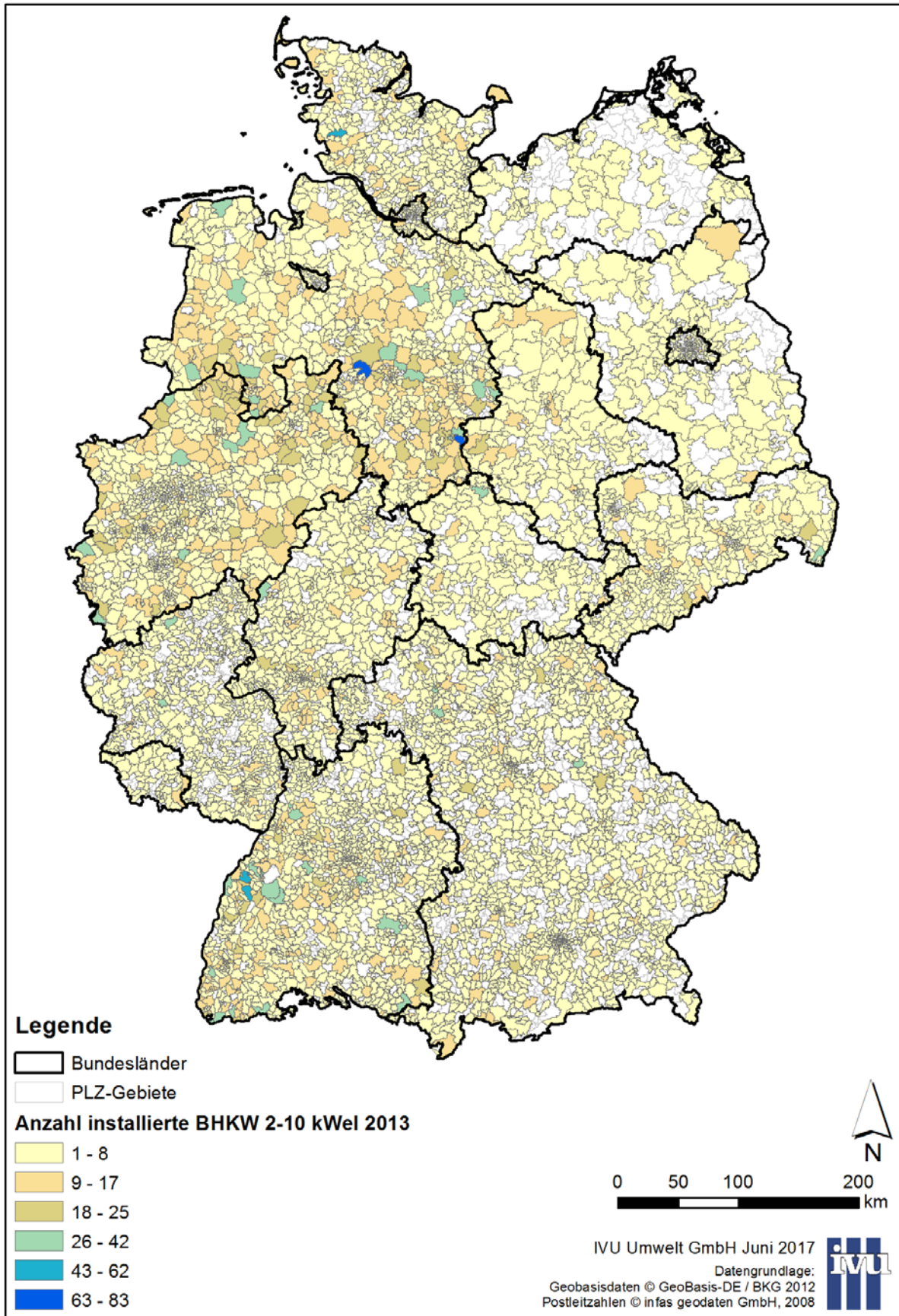
Weiterhin ist die Summe der installierten BHKW $< 50\text{ kW}_{\text{el}}$ auf Postleitzahl-Ebene für die Städte Berlin (Abbildung 5-24), Bremen (Abbildung 5-25) und Köln (Abbildung 5-26) dargestellt, für die im Rahmen der lokalen Emissions- und Immissionsbetrachtungen Modellrechnungen durchgeführt wurden (Abschnitt 6.1). Hier beziehen sich die Klassengrenzen aller drei Abbildungen auf den Maximalwert der installierten BHKW $< 50\text{ kW}_{\text{el}}$ in Berlin, um den Vergleich der drei Grafiken zu erleichtern.

Abbildung 5-19: Anzahl der installierten BHKW < 2 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene



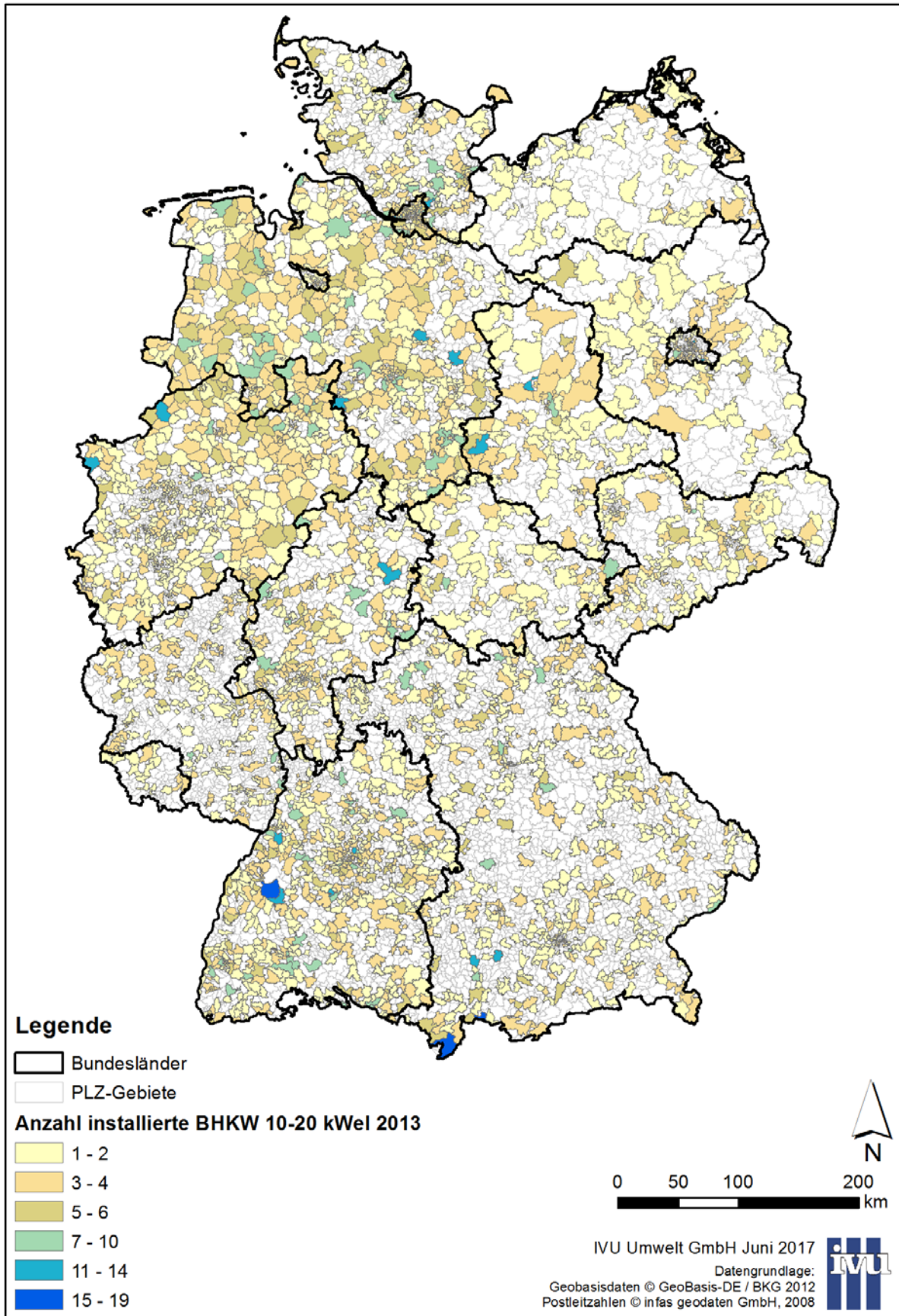
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-20: Anzahl der installierten BHKW 2-10 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene



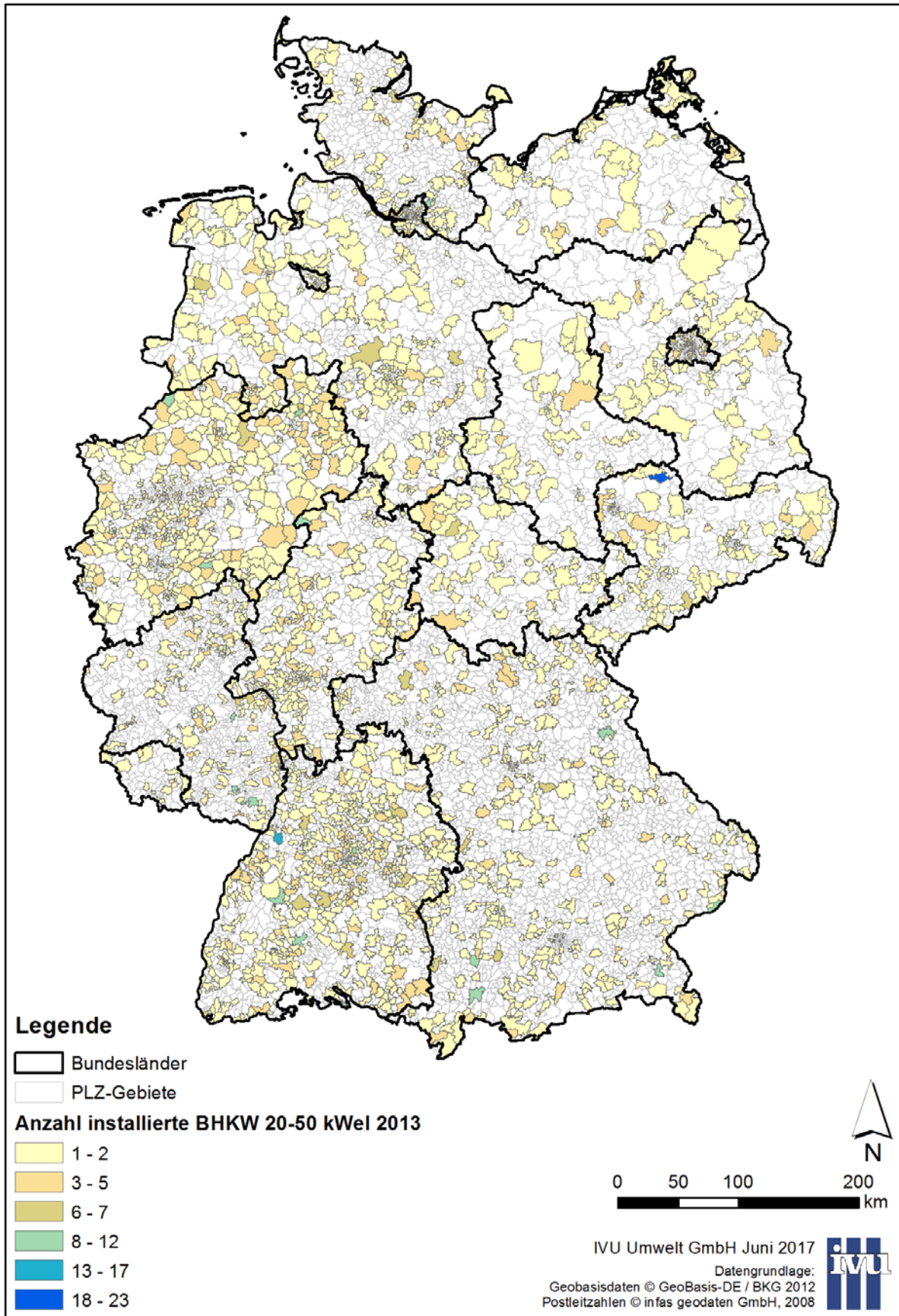
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-21: Anzahl der installierten BHKW 10-20 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene



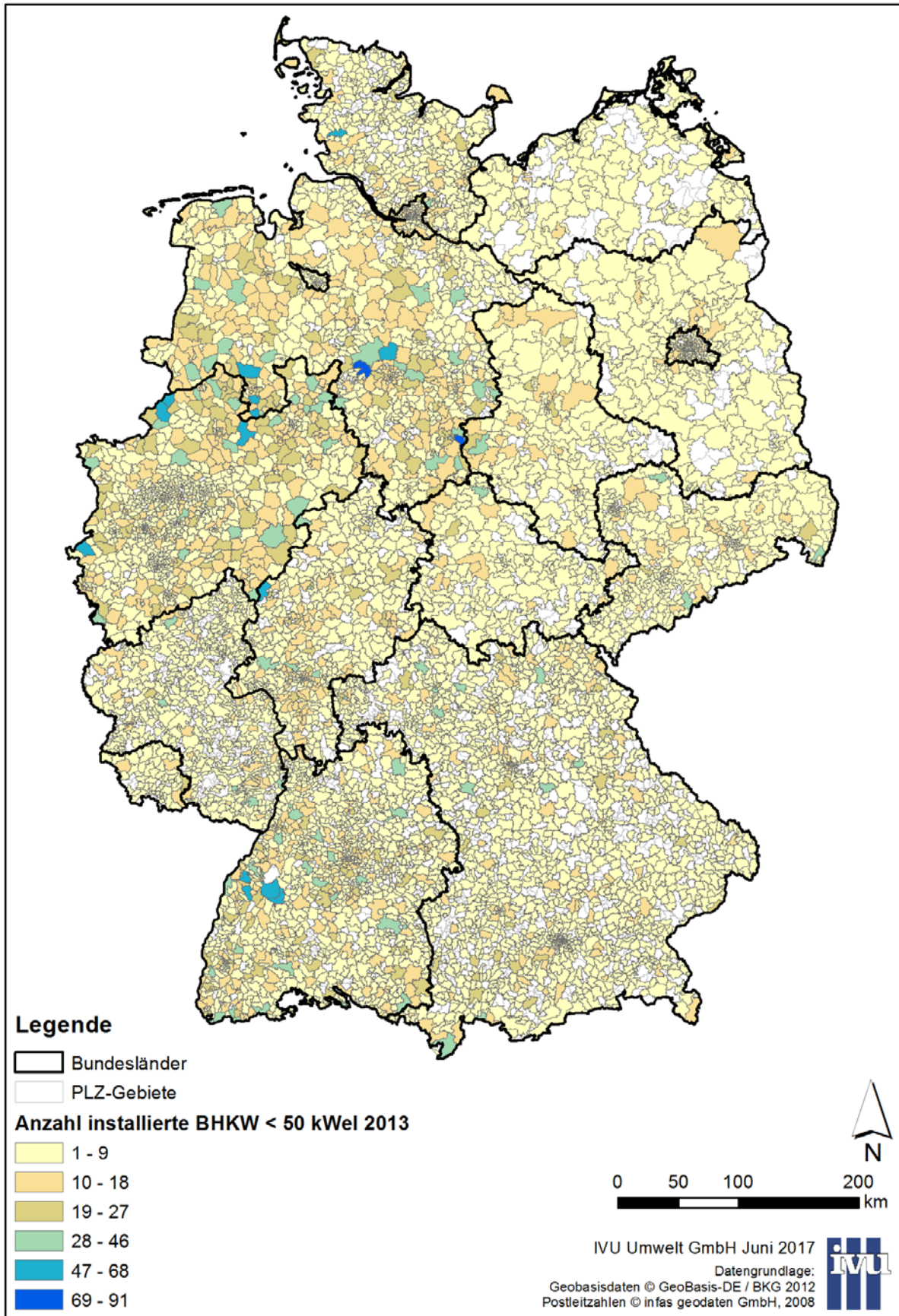
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-22: Anzahl der installierten BHKW 20-50 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene



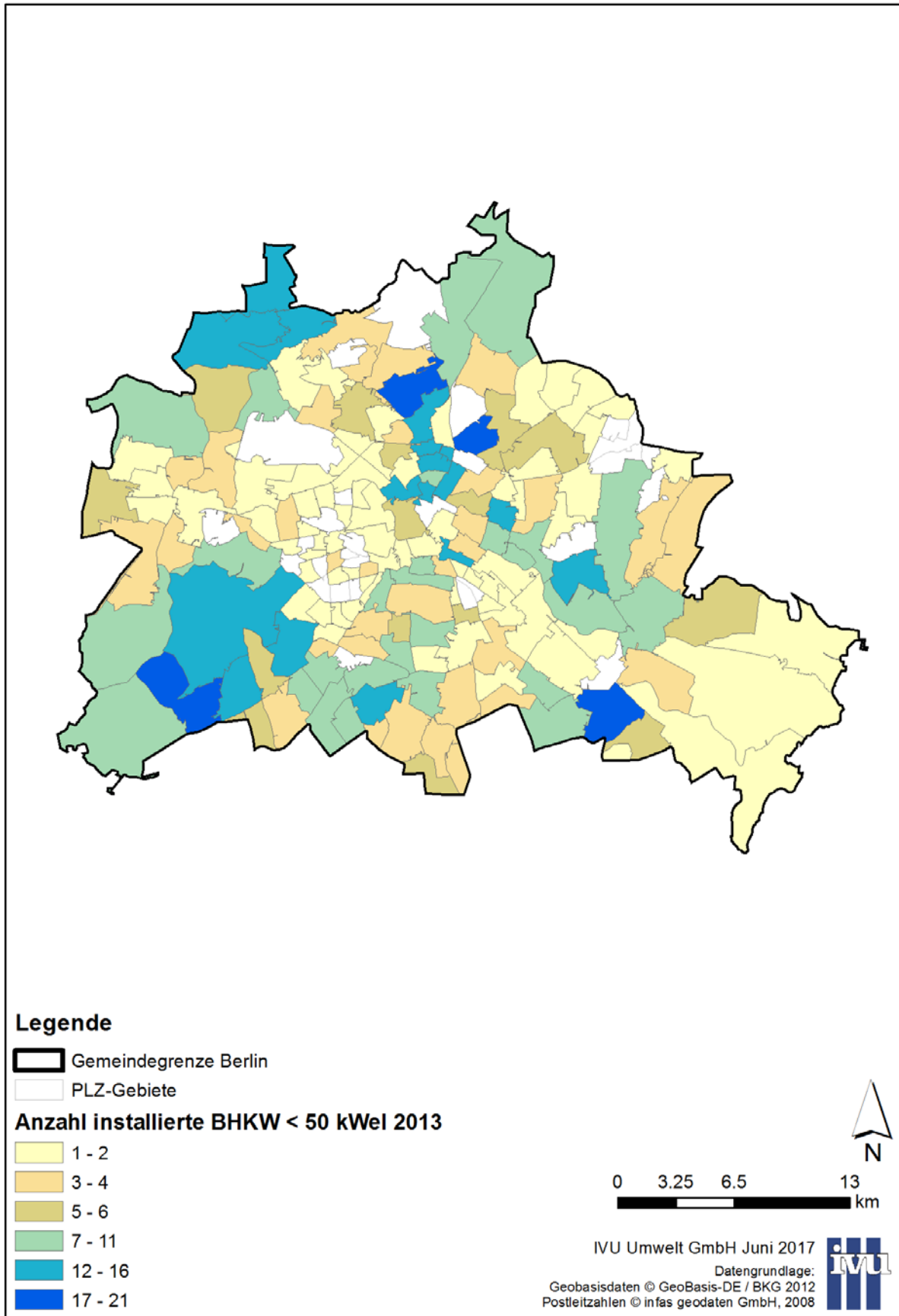
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-23: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene



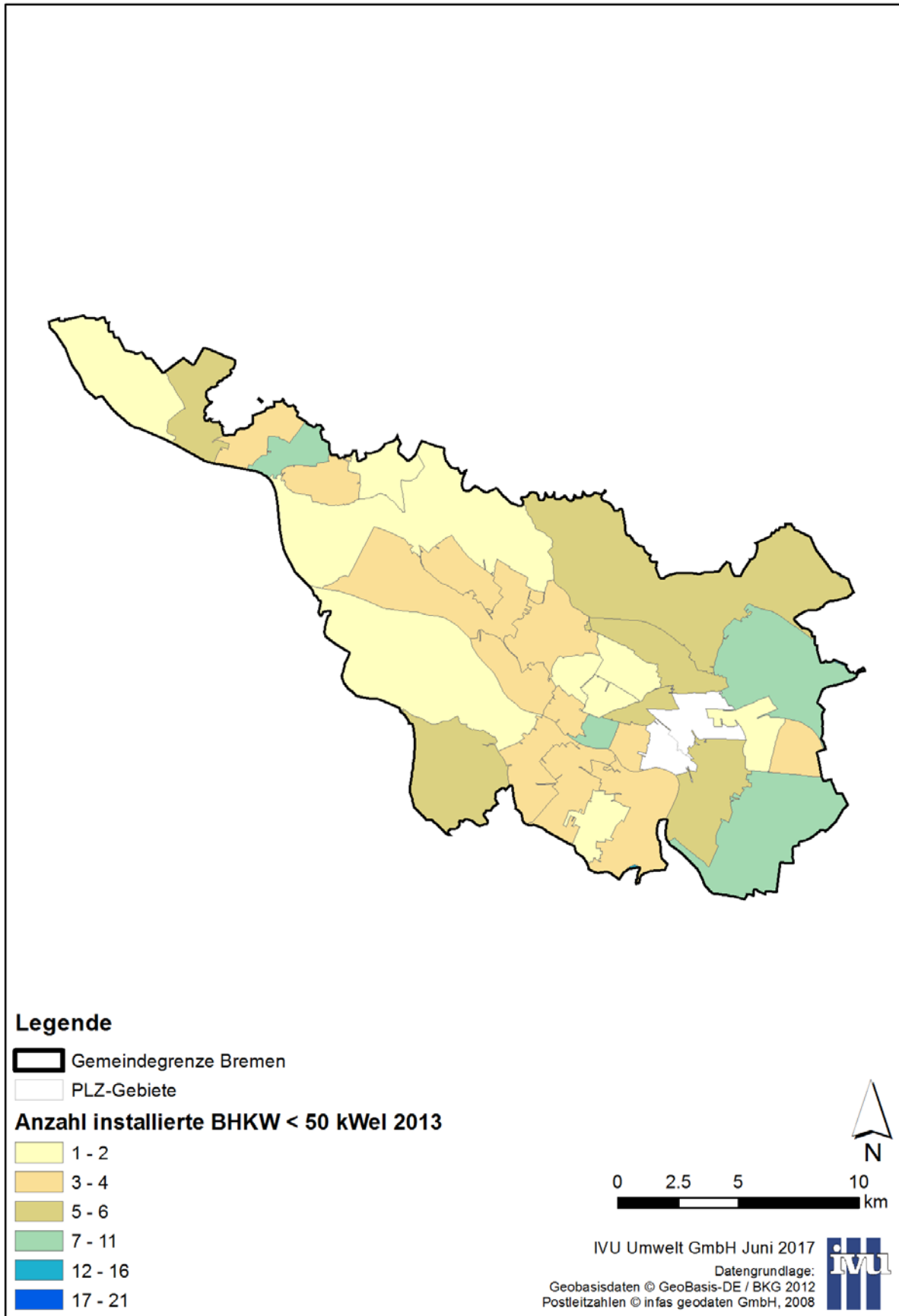
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-24: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Berlin



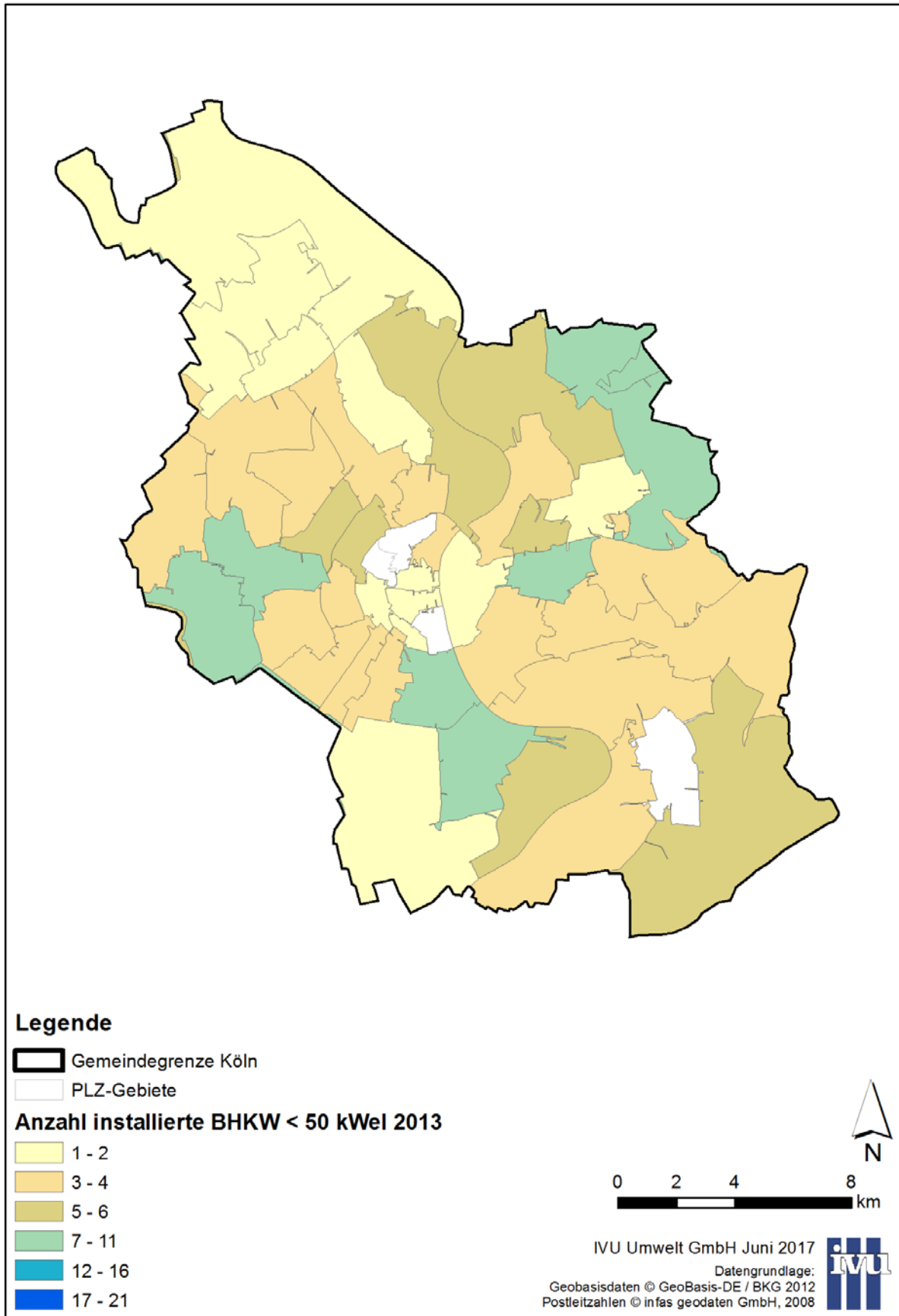
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-25: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Bremen



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-26: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf PLZ-Ebene in Köln



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

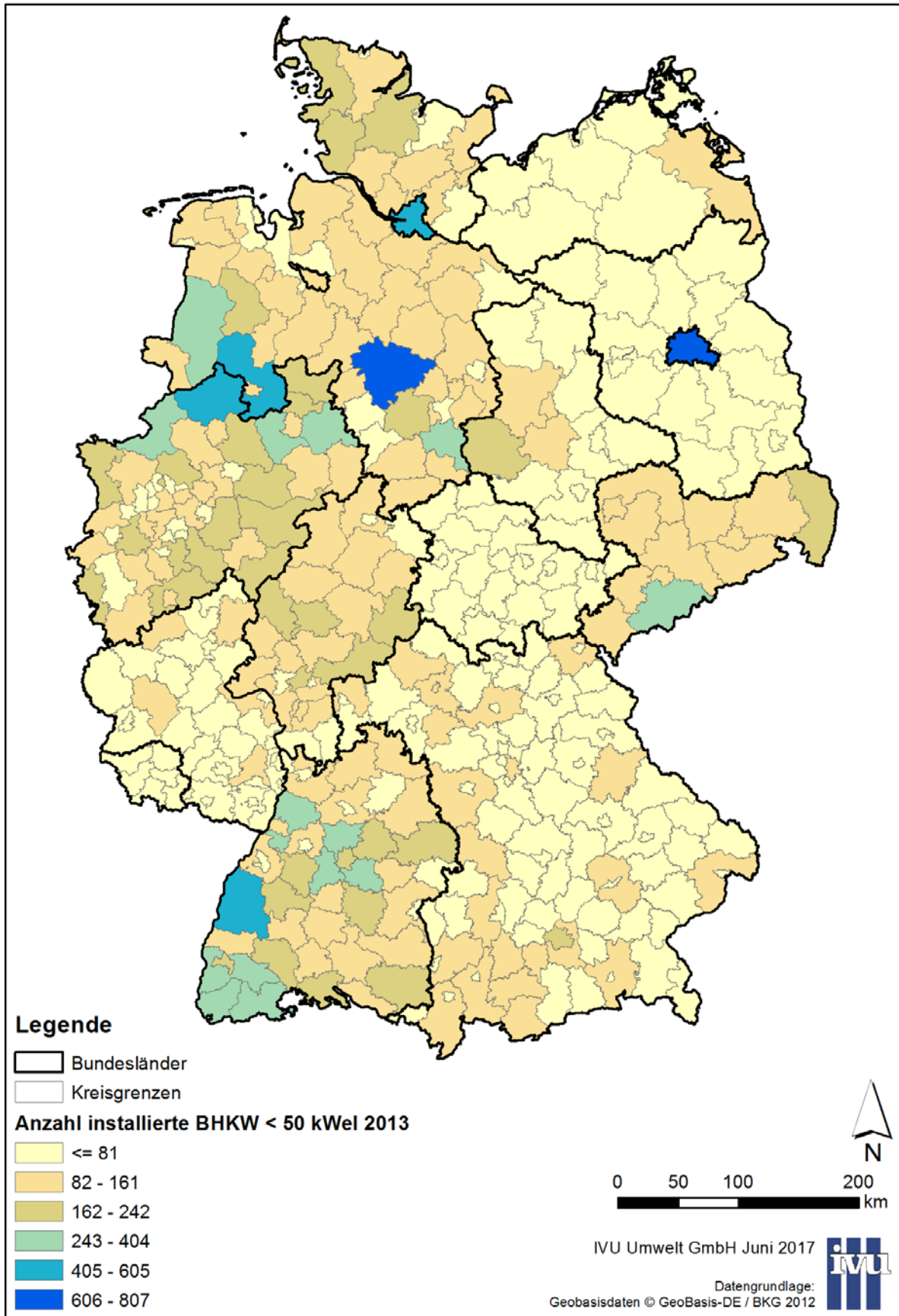
5.4.2.3 Kreis-Ebene

Die Auswertung auf Kreis-Ebene wurde als mittlere Ebene zwischen der sehr fein aufgelösten Postleitzahl-Ebene und der grob aufgelösten Bundesland-Ebene durchgeführt. Damit können Trends auf Bundesland-Ebene differenzierter betrachtet werden, während die Darstellung auf Postleitzahl-Ebene ggf. schon eine zu weite Streuung innerhalb eines Bundeslands aufweist.

Abbildung 5-27 zeigt die Anzahl der installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ in Deutschland auf Kreis-Ebene für das Jahr 2013. Die Kreise mit den meisten installierten Mini-BHKW sind demnach Berlin und die Region Hannover. Werden die installierten Mini-BHKW auf 10 000 Einwohner bezogen (Abbildung 5-28), so ergibt sich der höchste Wert für den Landkreis Goslar in Niedersachsen, während Berlin und Hannover deutlich zurückfallen. Als Einwohnerzahlen wurden dabei die Einwohnerzahlen zum 31.12.2012 des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG, 2013) angesetzt.

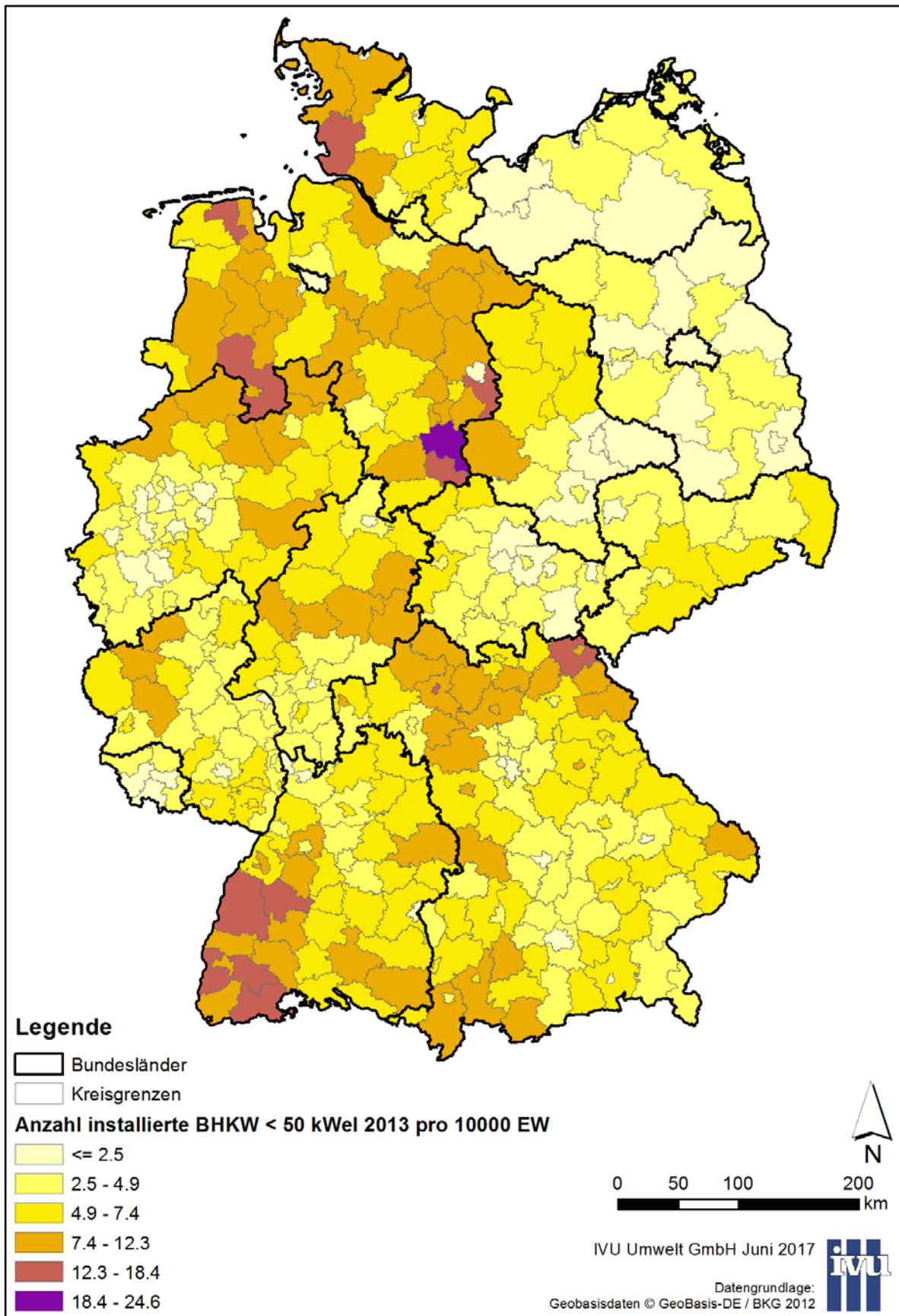
In Abbildung 5-29 ist die durch die installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ in Deutschland erzeugte Strommenge auf Kreisebene für das Jahr 2013 dargestellt. Höchste Werte werden hier in Berlin und Hamburg erreicht, gefolgt von Hannover. Werden die erzeugten Strommengen wieder auf 10 000 Einwohner bezogen (Abbildung 5-30), so ergibt sich der höchste Wert wieder für den Landkreis Goslar, zusammen mit dem Landkreis Freudenstadt in Baden-Württemberg.

Abbildung 5-27: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene



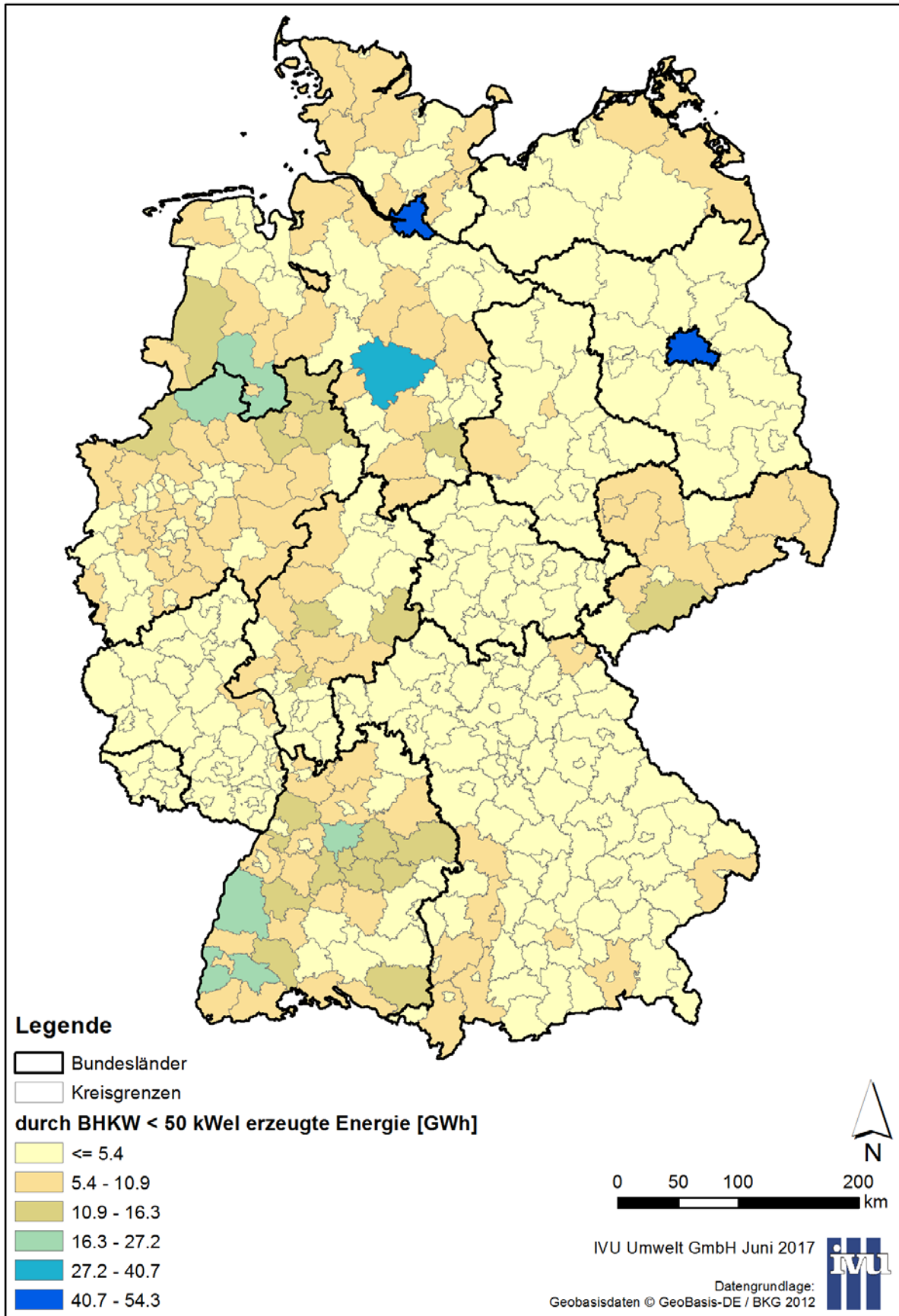
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-28: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene



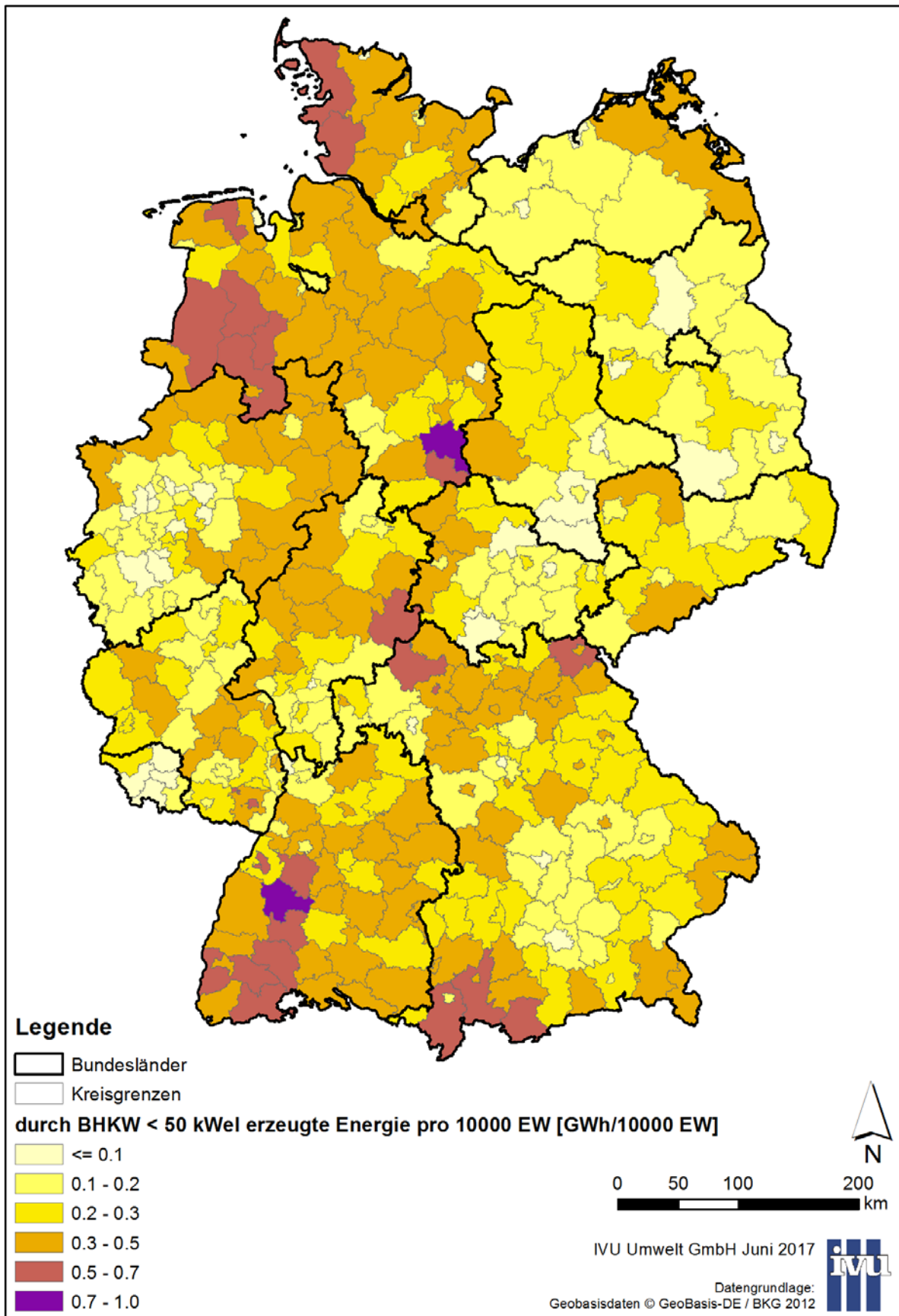
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-29: Durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugte Strommenge im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-30: Durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugte Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Kreis-Ebene



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.4.2.4 Bundesland-Ebene

Die Bundesland-Ebene hat sich im Zuge der Auswertung der BAFA-Liste (BAFA, 2014) als geeignete räumliche Skala erwiesen, um Trends aufzuspüren und Besonderheiten in der BHKW-Verteilung in Städten im Gegensatz zu großflächigen Bundesländern zu erkennen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Anzahl der installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und die dadurch erzeugten Strommengen für 2013, jeweils als Absolutwerte (Abbildung 5-31 und Abbildung 5-35) und bezogen auf 10 000 Einwohner (Abbildung 5-33 und Abbildung 5-37). Dazu werden die Anteile der einzelnen Leistungsklassen $< 2 \text{ kW}_{\text{el}}$, $2\text{-}10 \text{ kW}_{\text{el}}$, $10\text{-}20 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $20\text{-}50 \text{ kW}_{\text{el}}$ an den jeweils betrachteten Größen dargestellt (Abbildung 5-32, Abbildung 5-34, Abbildung 5-36, Abbildung 5-38). Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40 zeigen die zeitliche Entwicklung der Anzahl der installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ respektive der dadurch erzeugten Strommengen seit 1990 auf Bundesland-Ebene als Absolutwerte und bezogen auf 10 000 Einwohner. Als Einwohnerzahlen wurden dabei als konstante Bezugsgröße für alle Jahre die Einwohnerzahlen zum 31.12.2012 des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG, 2013) angesetzt.

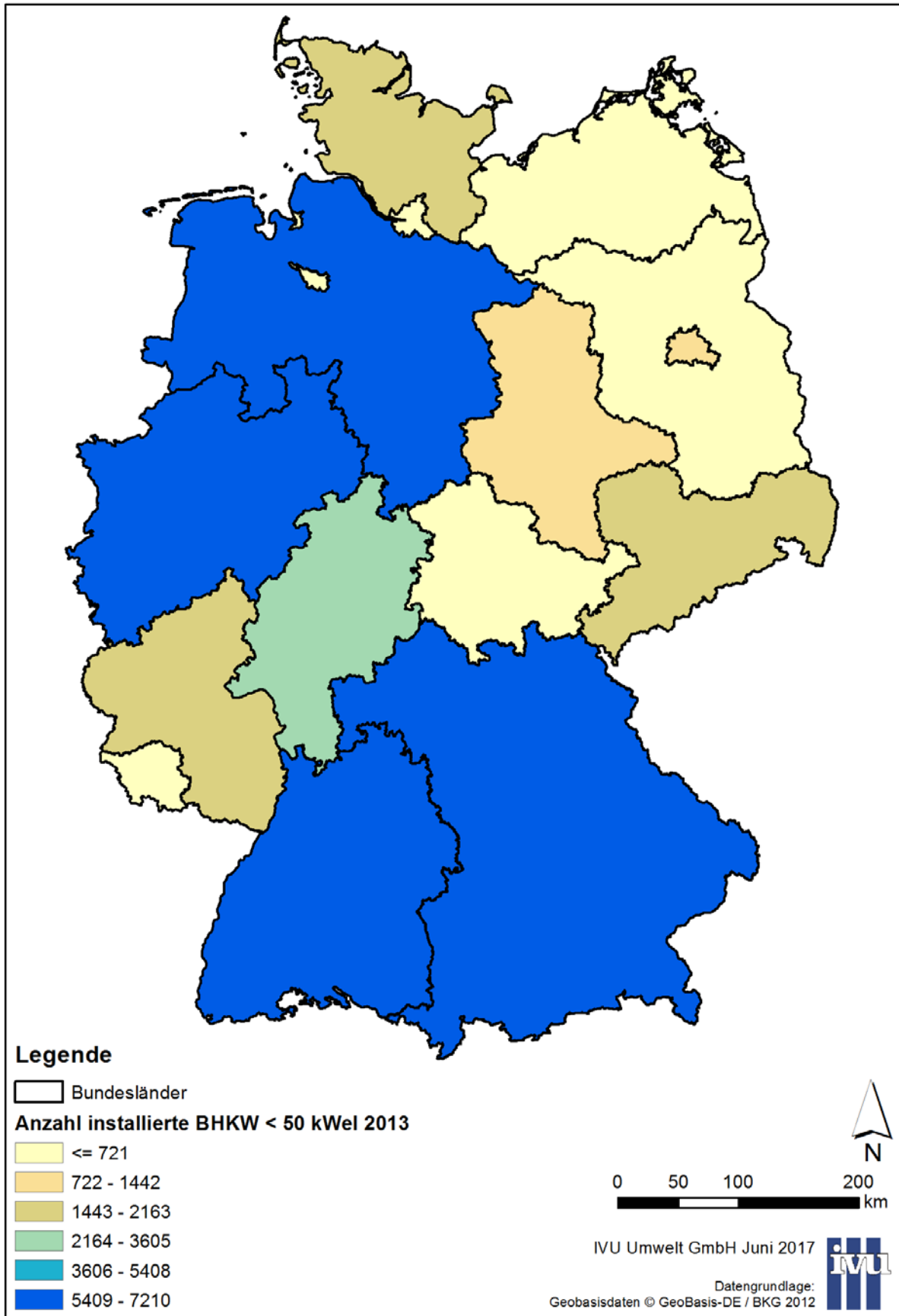
Die Absolutwerte der Anzahl der installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und der dadurch erzeugten Strommengen zeigen eine Spitzengruppe, die aus Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen besteht.

Bei den einwohnerbezogenen Auswertungen verteilen sich die Bundesländer gleichmäßiger über das Wertespektrum. Spitzenreiter ist Niedersachsen, gefolgt von Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein bzw. bei den erzeugten Strommengen von Baden-Württemberg und Hamburg. Dabei zeigen die Grafiken der zeitlichen Entwicklung (Abbildung 5-39, Abbildung 5-40) für die meisten Bundesländer einen relativ homogenen Verlauf, während Hamburg und in geringerem Maße Bremen ab 2010 eine deutlich stärkere Zunahme aufweisen als zuvor, die insbesondere bezogen auf 10 000 Einwohner sichtbar wird.

Werden die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an den verschiedenen Bezugsgrößen betrachtet, so zeigt sich bei der Anzahl der installierten BHKW (Abbildung 5-32, Abbildung 5-34), dass in den meisten Fällen die Klasse $2\text{-}10 \text{ kW}_{\text{el}}$ deutlich über die Hälfte der installierten BHKW stellt. In den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen sowie in Mecklenburg-Vorpommern liegt der Anteil dieser Leistungsklasse hingegen unter 50 %, einhergehend mit gegenüber den anderen Bundesländern höheren Anteilen der Leistungsklasse $10\text{-}20 \text{ kW}_{\text{el}}$. Bei den durch BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ erzeugten Strommengen (Abbildung 5-36, Abbildung 5-38) spielt die Leistungsklasse $< 2 \text{ kW}_{\text{el}}$ kaum eine Rolle. Die Verteilung der anderen drei Leistungsklassen reicht von gleichmäßig bis dominiert durch die höchste Leistungsklasse $20\text{-}50 \text{ kW}_{\text{el}}$. Bei den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen sowie in Mecklenburg-Vorpommern ist der Anteil der Leistungsklasse $2\text{-}10 \text{ kW}_{\text{el}}$ geringer als in den anderen Bundesländern.

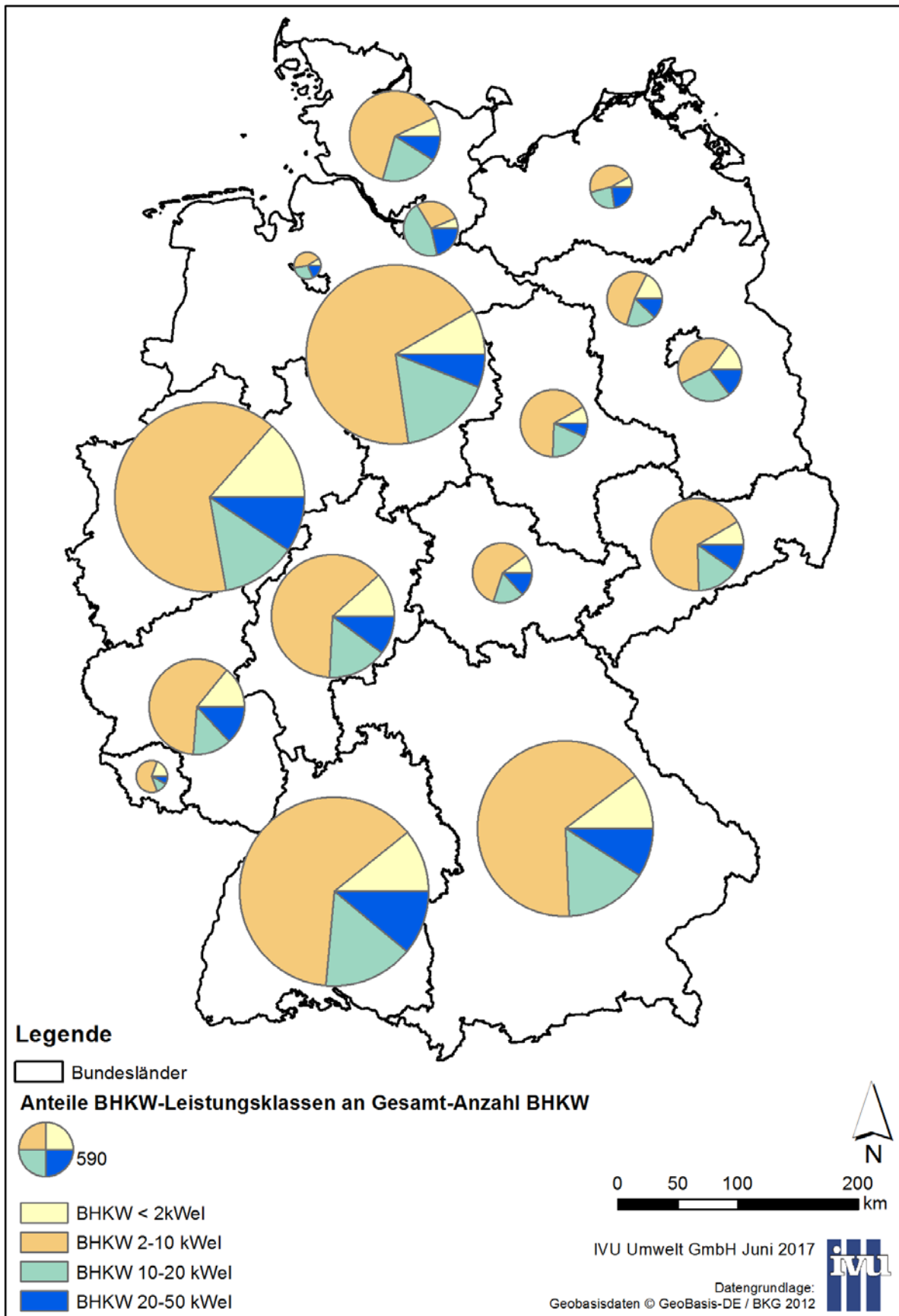
Es lässt sich demnach festhalten, dass sowohl die Anzahl der installierten BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ als auch deren Verteilung auf die einzelnen Leistungsklassen bis zu einem gewissen Grad abhängig vom Bundesland ist. Grund dafür ist zum einen, dass sich auf Bundesland-Ebene die Förderpolitik der Länder hinsichtlich Mini-BHKW widerspiegelt. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Bebauungsstruktur (z. B. Anteil der Ein- und Zwei-Familienhäuser gegenüber dem Anteil an Mehrfamilienhäusern und Wohnblocks) die Verteilung auf die einzelnen Leistungsklassen beeinflusst, wie die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen zeigen.

Abbildung 5-31: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



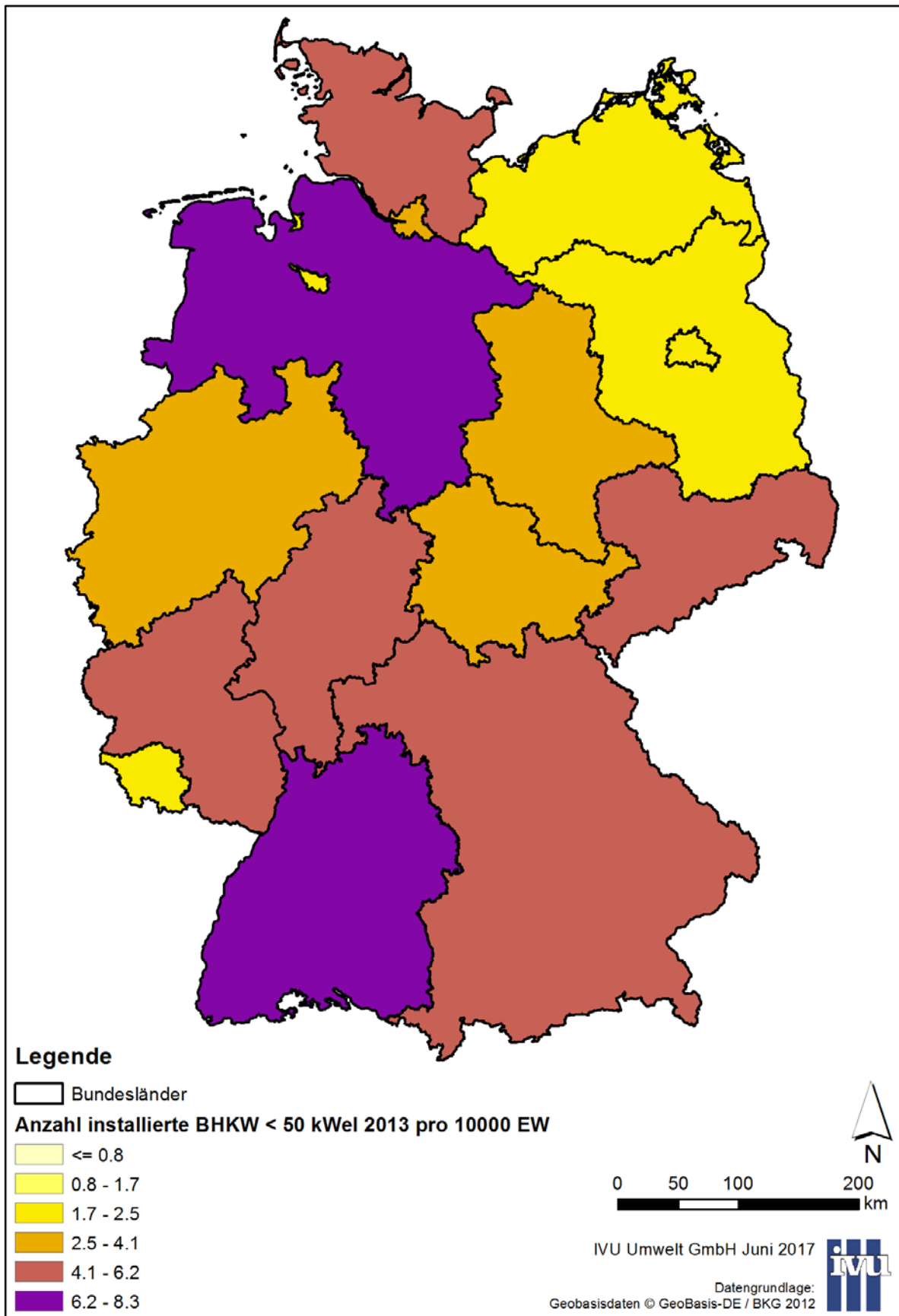
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-32: Anteile der einzelnen BHKW-Leistungsklassen an der Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



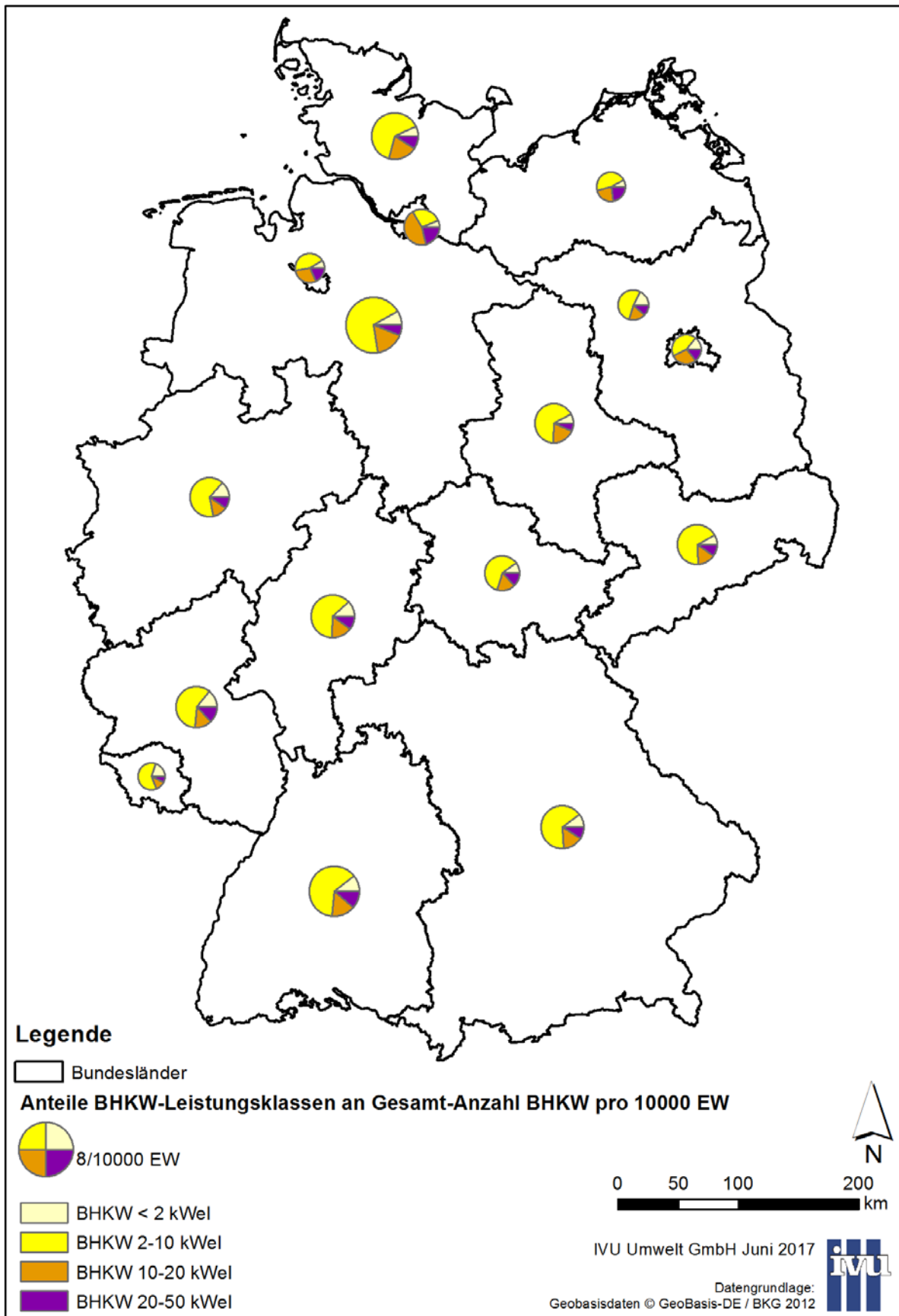
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-33: Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} pro 10 000 Einwohner im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



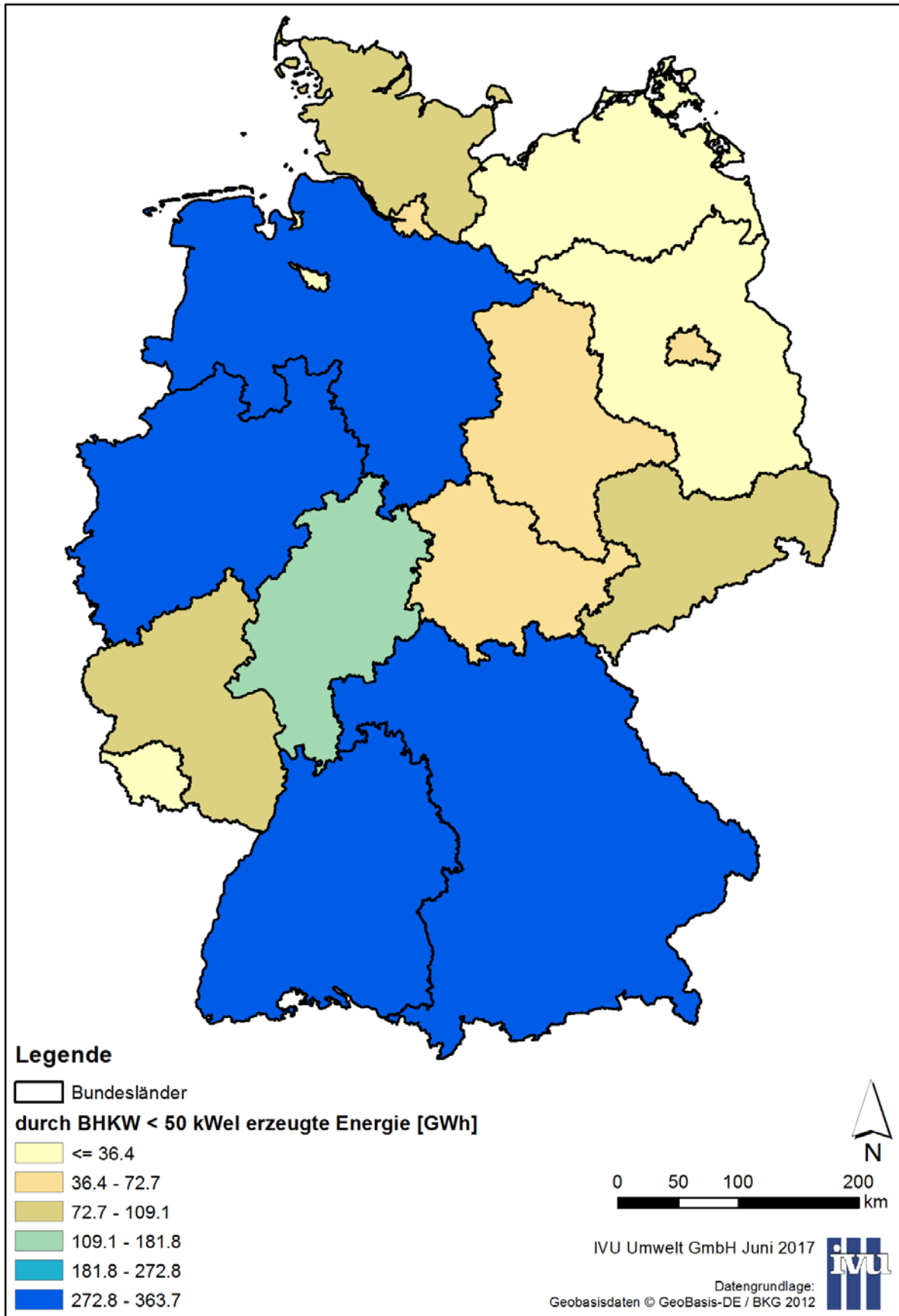
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-34: Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



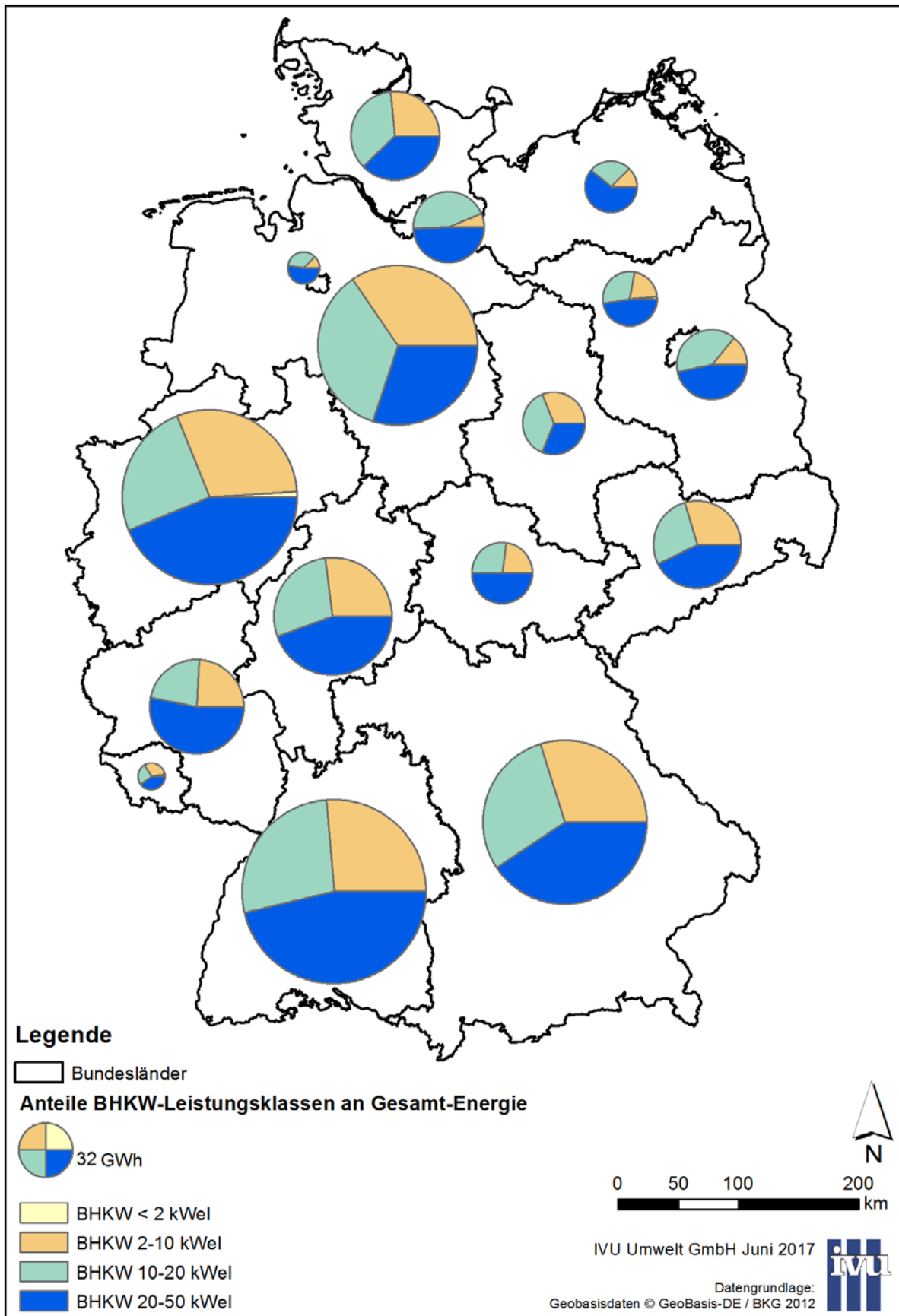
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-35: Durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugte Strommenge im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



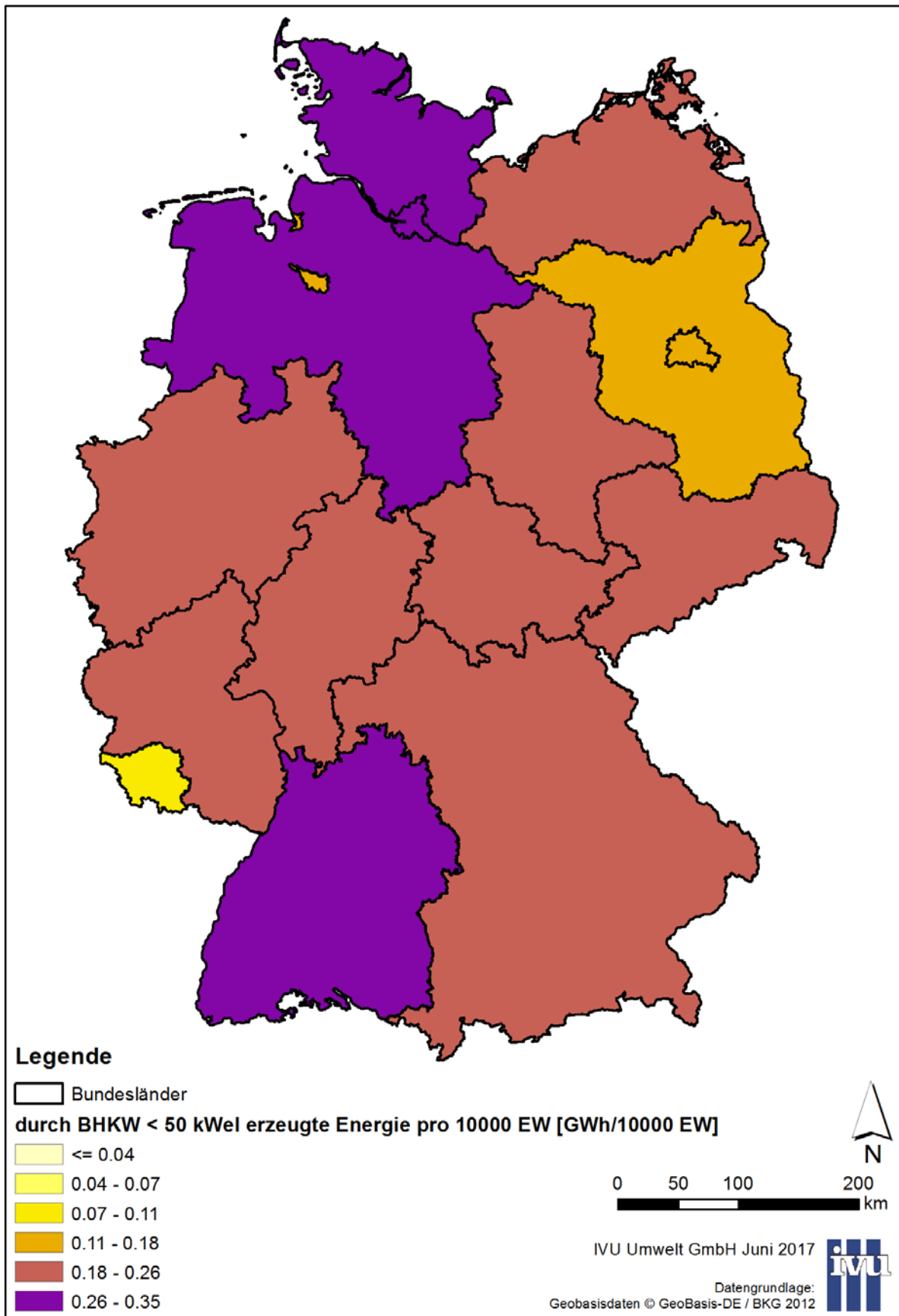
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-36: Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugten Strommenge im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



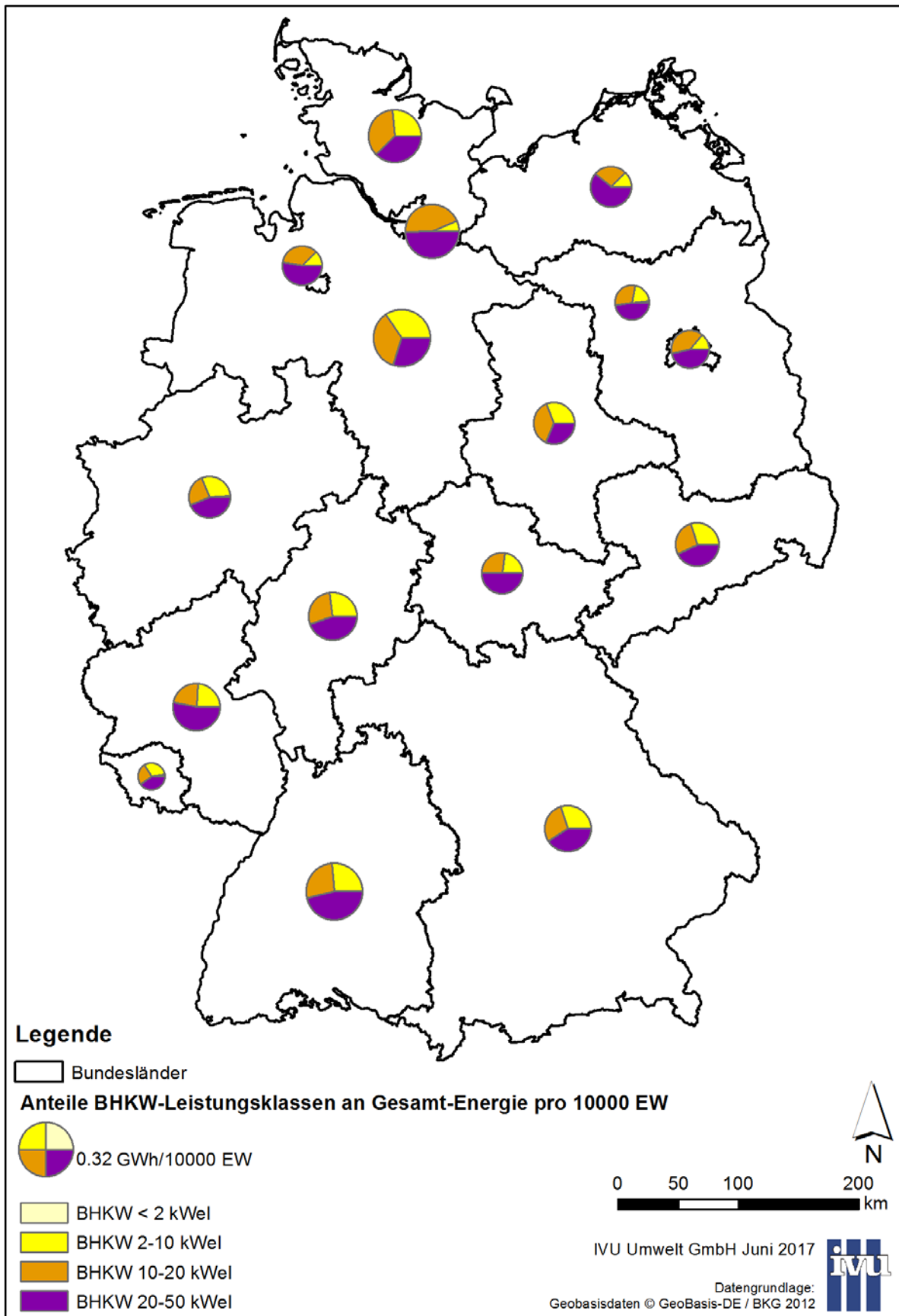
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-37: Durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugte Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



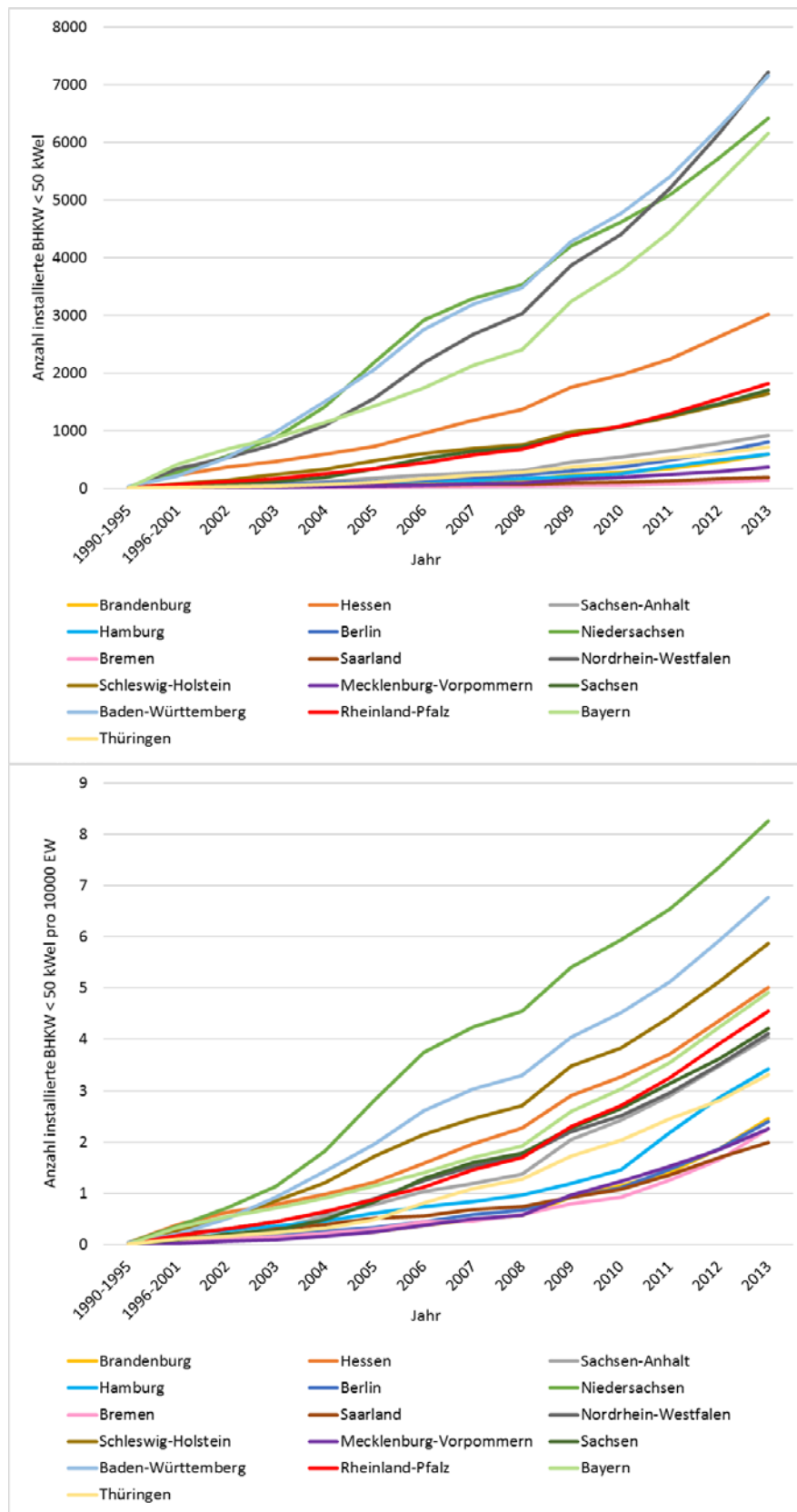
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-38: Anteile der BHKW-Leistungsklassen an der durch BHKW < 50 kW_{el} erzeugten Strommenge pro 10 000 EW im Jahr 2013 auf Bundesland-Ebene



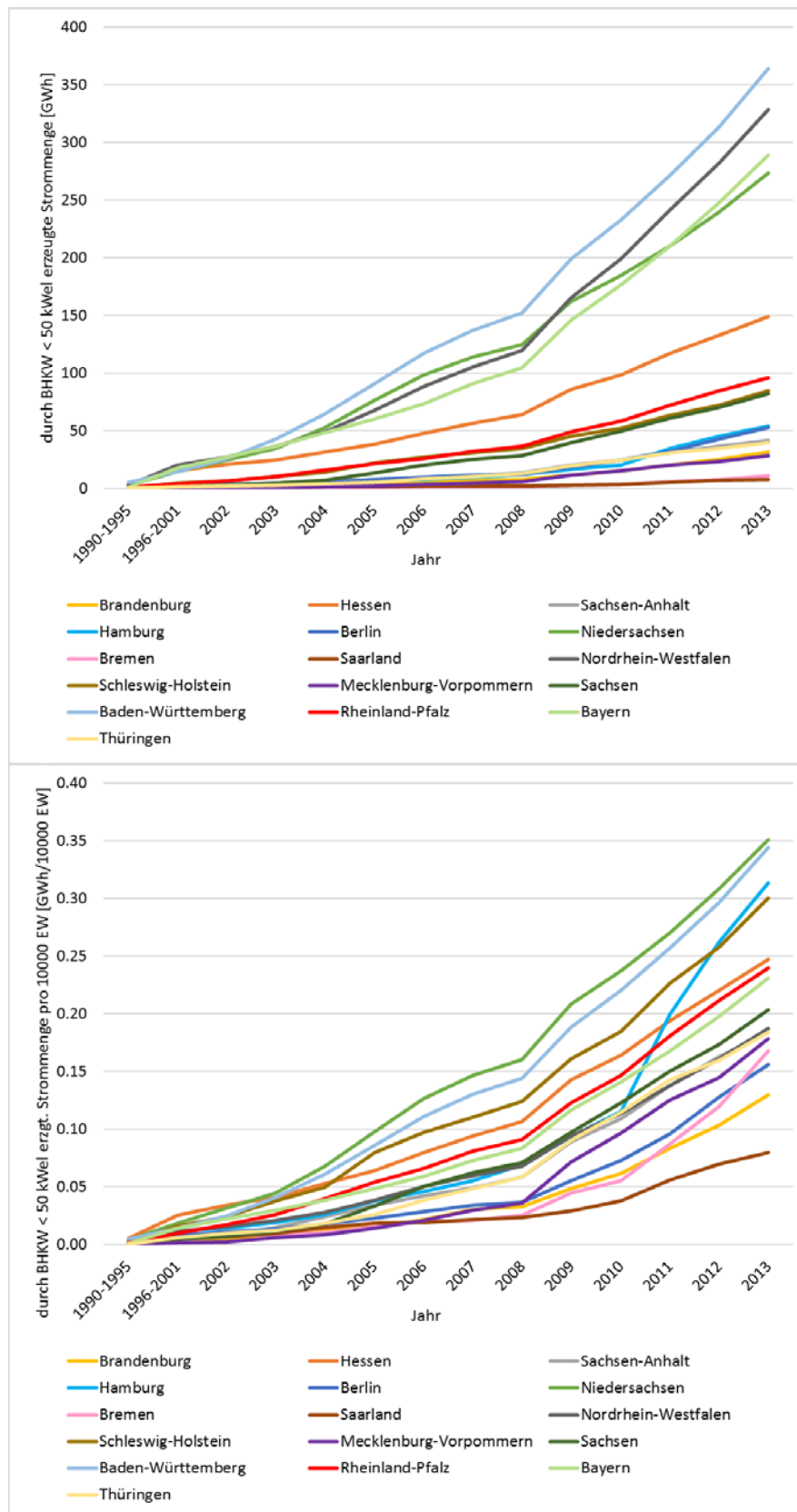
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-39: Entwicklung der installierten BHKW < 50 kW_{el} nach Bundesland, Anzahl (oben) und Anzahl pro 10 000 Einwohner (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-40: Entwicklung der installierten BHKW < 50 kW_{el} nach Bundesland, erzeugte Strommenge (oben) und erzeugte Strommenge pro 10 000 Einwohner (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.4.3 Prognose der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW in Deutschland im Jahr 2020

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.2 wurde die räumliche Verteilung der Mini-BHKW in Deutschland im Jahr 2020 prognostiziert, in diesem Abschnitt zunächst auf Postleitzahl-Ebene, d. h. auf der kleinräumigsten Skala, die direkt aus der BAFA-Liste abgeleitet werden kann. Als Datenbasis wurde verwendet:

- Zubau der Mini-BHKW in ganz Deutschland bis 2020 entsprechend dem Minimalszenario (Tabelle 5-2) bzw. dem Maximalszenario (Tabelle 5-7)
- Zubau der Mini-BHKW pro Bundesland entsprechend dem Zubau-Anteil pro Bundesland von 2012 nach 2013 gemäß BAFA-Liste
- Verteilung der Mini-BHKW auf Postleitzahl-Ebene im Jahr 2013 entsprechend Abschnitt 5.4.2.2
- Verwaltungsgrenzen, Einwohnerzahlen (BKG, 2013)
- Siedlungsflächen (BKG, 2014)
- Wohnungsstatistiken (DESTATIS, 2015a)
- Änderungen der Regionalschlüssel für die Jahre 2011 und 2012 (DESTATIS, 2015b)
- Grenzen der Postleitzahlbezirke (infas, 2008)

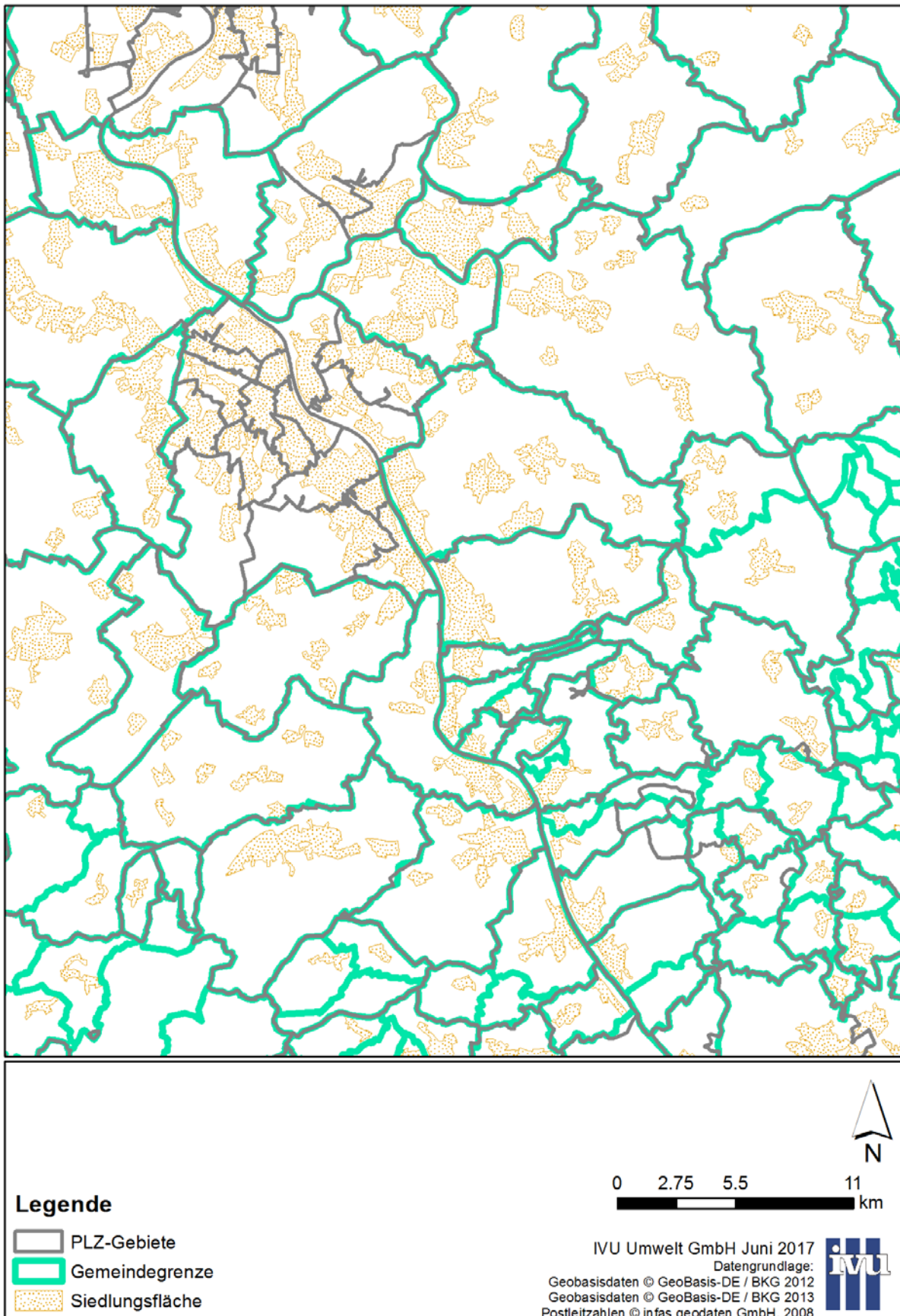
Es wurde untersucht, ob eine Abhängigkeit der im Jahr 2013 installierten Anzahl Mini-BHKW oder des Zubaus von Mini-BHKW von 2012 nach 2013 von leicht zugänglichen, allgemein verfügbaren Daten wie Einwohnerzahlen oder wohnungsbezogenen Kenngrößen besteht. Tabelle 5-23 gibt eine Übersicht über die untersuchten Größen und Zusammenhänge.

Tabelle 5-23: Liste der untersuchten Zusammenhänge (Parameter und abhängige Größen)

abhängige Größe	Parameter
Anzahl installierte Mini-BHKW 2013 Zubau Mini-BHKW von 2012 nach 2013	Einwohnerzahl Anzahl Wohnungen Wohnfläche Anzahl Gebäude mit Wohnraum Anzahl Gebäude mit 1 und 2 Wohnungen Anzahl Gebäude mit 3 und mehr Wohnungen

Da die BHKW-Daten auf Postleitzahl-Ebene vorlagen, die Einwohnerzahlen und wohnungsbezogenen Kenngrößen hingegen auf Gemeindeebene, wurde im ersten Schritt eine Umlegung der Einwohner- und Wohnungsdaten von der Gemeinde- auf die Postleitzahl-Ebene vorgenommen. Übertragungsgröße war die Siedlungsfläche. Abbildung 5-41 zeigt beispielhaft die Lage von Gemeinde- und Postleitzahlgrenzen zueinander und zu den Siedlungsflächen. Insbesondere wird deutlich, dass es sowohl Fälle gibt, in denen Gemeinden mehrere Postleitzahl-Bereiche aufweisen, als auch Fälle, in denen ein Postleitzahl-Bereich mehrere Gemeinden umfasst.

Abbildung 5-41: Beispielhafte Darstellung der Lage von Postleitzahl-Grenzen, Gemeindegrenzen und Siedlungsflächen zueinander



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Die Übertragung der Einwohner- und Wohnungsdaten von der Gemeinde- auf die Postleitzahl-Ebene wurde in einem geographischen Informationssystem (GIS) vorgenommen. Dazu mussten zunächst die Regionalschlüssel der Wohnungsdaten angepasst werden. Die Wohnungsdaten sind den einzelnen Gemeinden über sogenannte Regionalschlüssel zugeordnet. Diese ändern sich jedoch mit der Zeit, z. B. durch Gebiets- oder Kreisreformen. Die Änderungen können z. B. unter DESTATIS (2015b) eingesehen werden. Da die Wohnungsdaten aus dem Zensus 2011 und damit aus dem Mai 2011 stammen, die vorliegenden Gemeindegrenzen jedoch den Stand 31.12.2012 haben, mussten die Änderungen der Regionalschlüssel zwischen Mai 2011 und Ende Dezember 2012 in den Wohnungsdaten nachgeführt werden, um eine vollständige Zuordnung der Wohnungsdaten zu den Gemeinden zu ermöglichen.

Im GIS wurden dann die Siedlungsflächen mit den Gemeindegrenzen verschnitten und den Teil-Siedlungsflächen über ihren Flächenanteil an der gesamten Siedlungsfläche der jeweiligen Gemeinde Einwohnerzahlen bzw. Wohnungskenngrößen zugewiesen. Danach wurden die Teil-Siedlungsflächen mit den Postleitzahl-Grenzen verschnitten und pro Postleitzahl die anteiligen Einwohnerzahlen bzw. Wohnungskenngrößen aller Teil-Siedlungsflächen aufsummiert.

Im zweiten Schritt wurden die Größen aus Tabelle 5-23 auf funktionale Zusammenhänge hin untersucht. Es wurde pro Bundesland und pro BHKW-Leistungsklasse ($< 2 \text{ kW}_{\text{el}}$, $2\text{-}10 \text{ kW}_{\text{el}}$, $10\text{-}20 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $20\text{-}50 \text{ kW}_{\text{el}}$) ein lineares Regressionsmodell auf die nun vollständig auf Postleitzahl-Ebene vorliegenden Größen angewendet.

Tabelle 5-24 bis Tabelle 5-27 zeigen für alle Zusammenhänge aus Tabelle 5-23 das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 , unterteilt nach BHKW-Leistungsklassen. R_{corr}^2 balanciert das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches anzeigt, zu welchem Anteil die abhängige Größe durch den jeweiligen Parameter erklärt wird, mit der Komplexität des angesetzten Modells aus. Im vorliegenden Fall mit nur einer abhängigen Variablen ist R_{corr}^2 nicht wesentlich kleiner als R^2 .

Angegeben sind nur R_{corr}^2 für signifikante Zusammenhänge. Als signifikant wurden alle Zusammenhänge bewertet, für die nach dem t-Test eine Irrtumswahrscheinlichkeit $\leq 5 \%$ besteht. Die Zusammenstellung der R_{corr}^2 in Tabelle 5-24 bis Tabelle 5-27 zeigt, dass de facto kein linearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen besteht. Als maximales R_{corr}^2 für die Anzahl der installierten BHKW ergibt sich für die Leistungsklasse $10\text{-}20 \text{ kW}$ ein Wert von 0.43, und zwar für Schleswig-Holstein und dort in Abhängigkeit von der Wohnfläche. Als maximales R_{corr}^2 für den Zubau der BHKW von 2012 nach 2013 ergibt sich für die Leistungsklasse $< 2 \text{ kW}$ ein Wert von 0.25, und zwar für das Saarland und dort in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl. Alle anderen Zusammenhänge weisen ein z. T. deutlich geringeres R_{corr}^2 auf oder sind nicht signifikant.

Für die beiden genannten Beispiele mit den maximalen R_{corr}^2 , d. h. für die Anzahl der installierten BHKW in der Leistungsklasse $10\text{-}20 \text{ kW}$ in Abhängigkeit von der Wohnfläche und für den Zubau von BHKW in der Leistungsklasse $< 2 \text{ kW}$ in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl, sind in Abbildung 5-42 bzw. Abbildung 5-43 für alle Bundesländer die entsprechenden Werte gegeneinander aufgetragen und die jeweils zugehörige Regressionsgerade des linearen Modells ist eingezeichnet. Aus den Grafiken ist deutlich ersichtlich, dass neben dem getesteten linearen Zusammenhang auch kein anderer funktionaler Zusammenhang zu erwarten ist.

Tabelle 5-24: Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse < 2 kW

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude ≤2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Anzahl installierte BHKW 2013						
Brandenburg	0.11	0.08	0.13	0.17	0.19	0.02
Hessen	0.16	0.15	0.19	0.21	0.20	0.11
Sachsen-Anhalt	0.19	0.18	0.20	0.19	0.16	0.14
Hamburg	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.30
Berlin	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Niedersachsen	0.16	0.13	0.18	0.23	0.24	0.05
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	0.29	0.26	0.31	0.31	0.31	0.05
Nordrhein-Westfalen	0.08	0.05	0.11	0.16	0.17	no signif.
Schleswig-Holstein	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Mecklenburg-Vorpommern	0.03	0.03	0.03	0.02	no signif.	0.02
Sachsen	0.11	0.10	0.12	0.14	0.11	0.10
Baden-Württemberg	0.24	0.24	0.25	0.23	0.20	0.21
Rheinland-Pfalz	0.20	0.19	0.21	0.23	0.23	0.15
Bayern	0.18	0.17	0.20	0.23	0.22	0.17
Thüringen	0.12	0.11	0.13	0.14	0.13	0.10
Zubau BHKW von 2012 nach 2013						
Brandenburg	0.06	0.04	0.06	0.09	0.10	no signif.
Hessen	0.09	0.08	0.11	0.14	0.13	0.06
Sachsen-Anhalt	0.12	0.11	0.12	0.10	0.08	0.10
Hamburg	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15
Berlin	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Niedersachsen	0.06	0.05	0.07	0.10	0.11	0.01
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	0.25	0.24	0.24	0.21	0.19	0.08
Nordrhein-Westfalen	0.03	0.02	0.05	0.08	0.10	no signif.
Schleswig-Holstein	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.05
Mecklenburg-Vorpommern	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Sachsen	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04
Baden-Württemberg	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Rheinland-Pfalz	0.11	0.10	0.12	0.13	0.13	0.09
Bayern	0.12	0.11	0.13	0.14	0.13	0.11
Thüringen	0.05	0.04	0.05	0.07	0.07	0.03

Tabelle 5-25: Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 2-10 kW

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Anzahl installierte BHKW 2013						
Brandenburg	0.24	0.22	0.26	0.25	0.23	0.14
Hessen	0.28	0.27	0.32	0.33	0.30	0.22
Sachsen-Anhalt	0.24	0.23	0.25	0.21	0.16	0.21
Hamburg	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17
Berlin	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Niedersachsen	0.27	0.25	0.30	0.29	0.27	0.19
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	0.21	0.17	0.24	0.27	0.29	no signif.
Nordrhein-Westfalen	0.09	0.04	0.14	0.23	0.28	no signif.
Schleswig-Holstein	0.19	0.20	0.23	0.30	0.31	0.16
Mecklenburg-Vorpommern	0.10	0.10	0.11	0.14	0.09	0.15
Sachsen	0.23	0.22	0.25	0.31	0.26	0.25
Baden-Württemberg	0.27	0.26	0.29	0.30	0.28	0.22
Rheinland-Pfalz	0.25	0.26	0.28	0.31	0.30	0.24
Bayern	0.25	0.24	0.29	0.35	0.33	0.26
Thüringen	0.33	0.31	0.32	0.34	0.30	0.27
Zubau BHKW von 2012 nach 2013						
Brandenburg	0.09	0.07	0.10	0.11	0.11	0.04
Hessen	0.13	0.12	0.13	0.13	0.11	0.10
Sachsen-Anhalt	0.08	0.07	0.08	0.08	0.06	0.07
Hamburg	0.03	0.03	0.03	no signif.	no signif.	0.03
Berlin	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Niedersachsen	0.09	0.07	0.10	0.10	0.10	0.04

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	0.18	0.17	0.16	0.14	0.12	0.08
Nordrhein-Westfalen	0.04	0.02	0.06	0.08	0.09	no signif.
Schleswig-Holstein	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06	0.03
Mecklenburg-Vorpommern	0.09	0.09	0.10	0.13	0.09	0.10
Sachsen	0.04	0.04	0.05	0.07	0.06	0.04
Baden-Württemberg	0.14	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13
Rheinland-Pfalz	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09
Bayern	0.12	0.11	0.14	0.16	0.16	0.12
Thüringen	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04

Tabelle 5-26: Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 10-20 kW

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Anzahl installierte BHKW 2013						
Brandenburg	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05
Hessen	0.15	0.14	0.17	0.17	0.15	0.12
Sachsen-Anhalt	0.14	0.13	0.14	0.09	0.06	0.13
Hamburg	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24
Berlin	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Niedersachsen	0.29	0.27	0.29	0.27	0.25	0.19
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Nordrhein-Westfalen	0.02	0.01	0.03	0.06	0.08	no signif.
Schleswig-Holstein	0.42	0.42	0.43	0.42	0.40	0.39
Mecklenburg-Vorpommern	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Sachsen	0.11	0.11	0.11	0.09	0.05	0.12
Baden-Württemberg	0.24	0.24	0.25	0.22	0.17	0.25

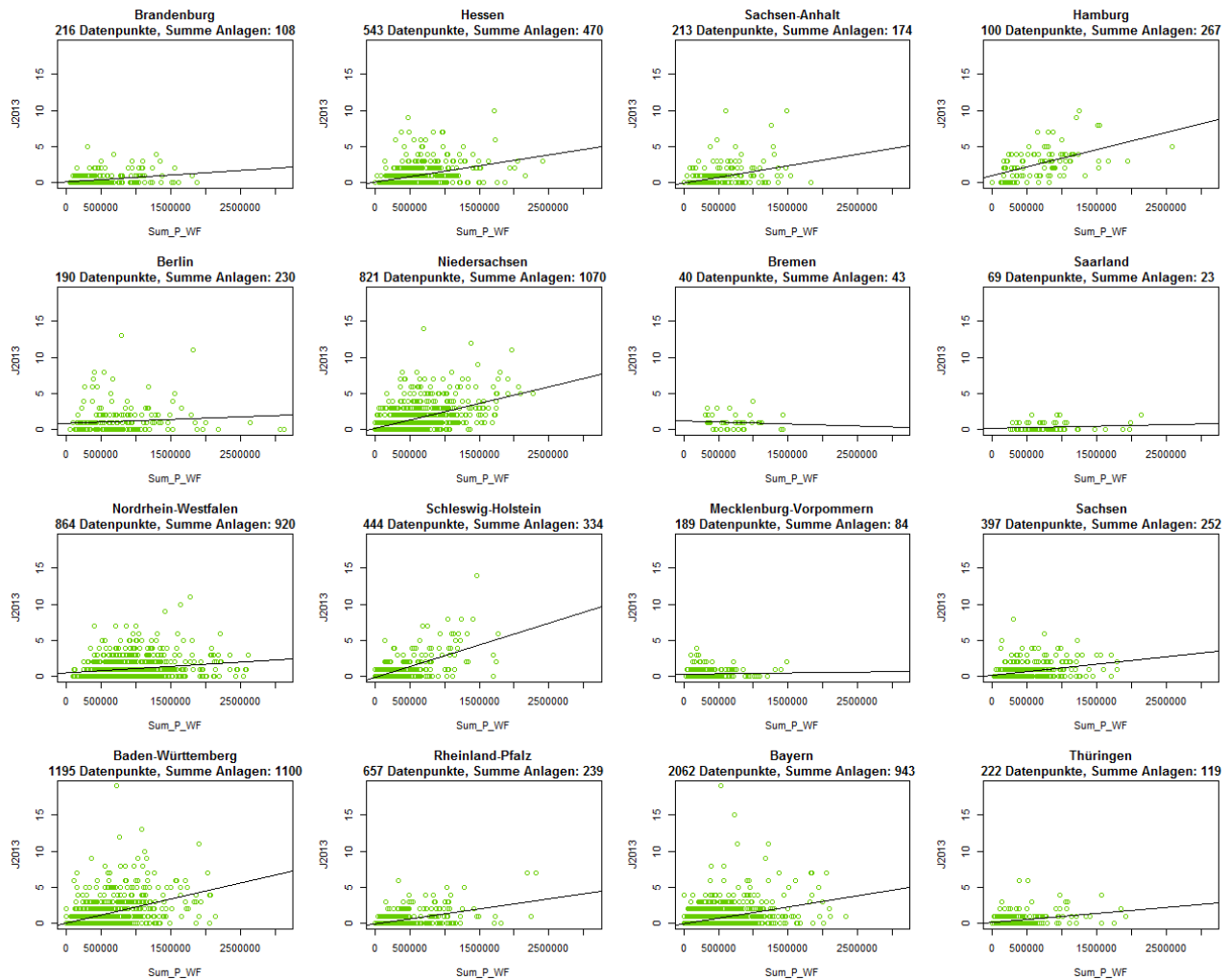
Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Rheinland-Pfalz	0.26	0.25	0.26	0.25	0.22	0.25
Bayern	0.15	0.16	0.18	0.20	0.17	0.18
Thüringen	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.08
Zubau BHKW von 2012 nach 2013						
Brandenburg	0.03	0.03	0.03	no signif.	no signif.	0.04
Hessen	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
Sachsen-Anhalt	0.08	0.09	0.08	0.04	0.02	0.09
Hamburg	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10
Berlin	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Niedersachsen	0.09	0.08	0.09	0.10	0.10	0.04
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Nordrhein-Westfalen	no signif.	no signif.	0.00	0.01	0.01	no signif.
Schleswig-Holstein	0.16	0.15	0.18	0.19	0.20	0.12
Mecklenburg-Vorpommern	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Sachsen	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02	0.04
Baden-Württemberg	0.14	0.14	0.14	0.12	0.09	0.16
Rheinland-Pfalz	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.11
Bayern	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07
Thüringen	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04

Tabelle 5-27: Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 und Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge nach Bundesland, BHKW-Leistungsklasse 20-50 kW

Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Anzahl installierte BHKW 2013						
Brandenburg	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
Hessen	0.13	0.14	0.14	0.11	0.08	0.14
Sachsen-Anhalt	0.25	0.23	0.25	0.24	0.19	0.22
Hamburg	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Berlin	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

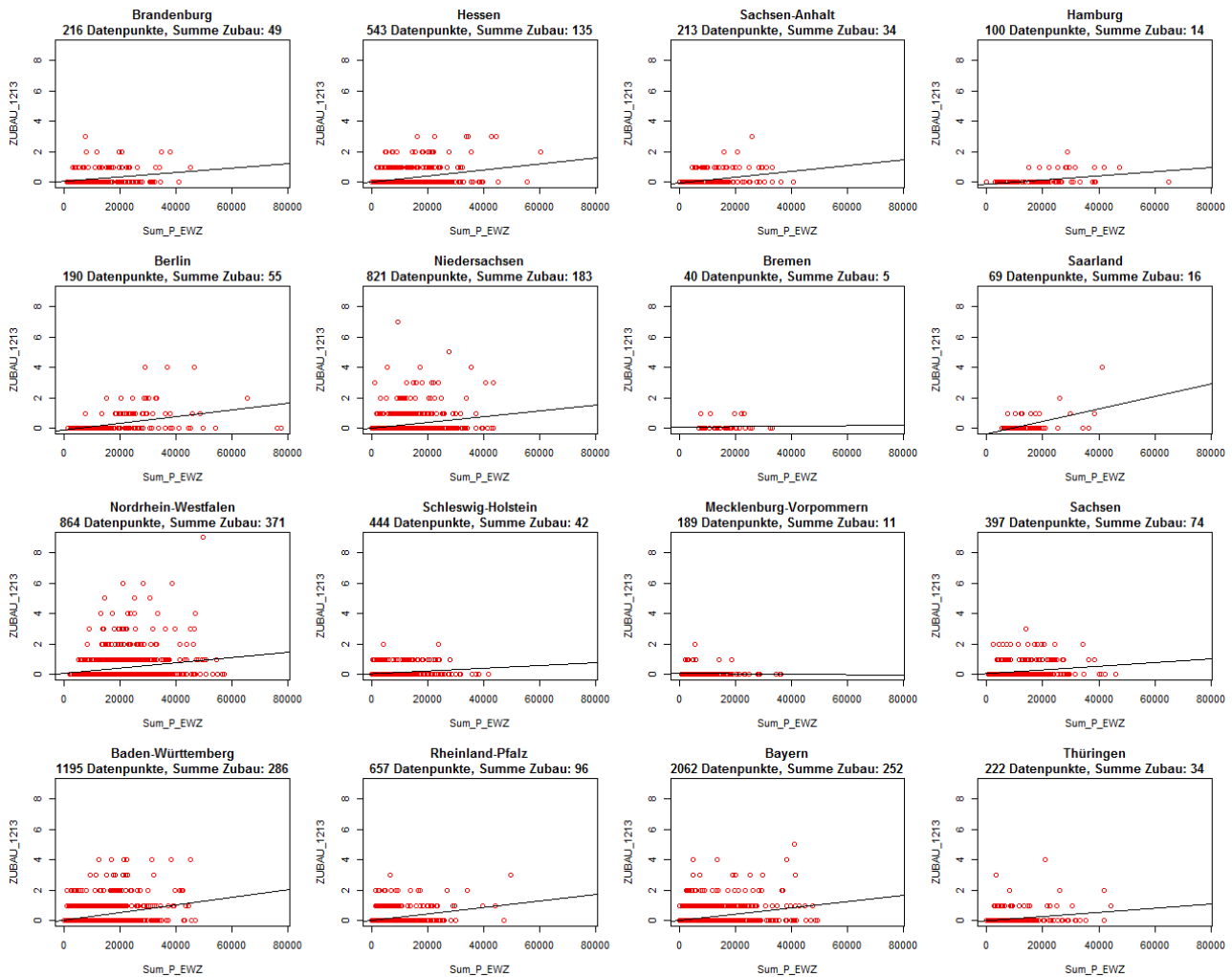
Bundesland	Einwohnerzahl	Anzahl Wohnungen	Wohnfläche	Anzahl Gebäude mit Wohnraum	Anzahl Gebäude <=2 Wohnungen	Anzahl Gebäude >2 Wohnungen
Niedersachsen	0.24	0.23	0.24	0.20	0.18	0.19
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Nordrhein-Westfalen	0.04	0.02	0.06	0.09	0.11	no signif.
Schleswig-Holstein	0.22	0.22	0.23	0.22	0.20	0.21
Mecklenburg-Vorpommern	no signif.	0.02	0.02	0.02	no signif.	0.04
Sachsen	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.05
Baden-Württemberg	0.28	0.27	0.28	0.27	0.23	0.25
Rheinland-Pfalz	0.33	0.33	0.33	0.29	0.26	0.31
Bayern	0.15	0.15	0.18	0.22	0.20	0.17
Thüringen	0.18	0.17	0.19	0.19	0.16	0.17
Zubau BHKW von 2012 nach 2013						
Brandenburg	0.02	no signif.	0.02	0.03	0.03	no signif.
Hessen	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sachsen-Anhalt	0.02	0.02	0.01	no signif.	no signif.	0.03
Hamburg	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Berlin	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Niedersachsen	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Bremen	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Saarland	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Nordrhein-Westfalen	no signif.	no signif.	no signif.	0.01	0.01	no signif.
Schleswig-Holstein	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09
Mecklenburg-Vorpommern	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.	no signif.
Sachsen	0.03	0.02	0.03	0.05	0.05	0.02
Baden-Württemberg	0.08	0.07	0.08	0.09	0.08	0.06
Rheinland-Pfalz	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05
Bayern	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06
Thüringen	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01

Abbildung 5-42: Anzahl installierte BHKW 2013 zu Wohnfläche, Leistungsklasse 10-20 kW (grüne Kreise) sowie lineares Modell (schwarze Linie)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-43: Zubau BHKW von 2012 nach 2013 zu Einwohnerzahl, Leistungsklasse < 2 kW (rote Kreise) sowie lineares Modell (schwarze Linie)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Ergebnis der oben durchgeführten Analyse ist, dass sowohl die Anzahl der installierten BHKW als auch deren Zubau keinerlei Abhängigkeit von den untersuchten Parametern zeigt. Aus diesem Grund wurde folgende Vorgehensweise zur Prognose der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW im Jahr 2020 gewählt, die den Einfluss der Bundesland-Ebene (Förderpolitik) berücksichtigt:

- Im ersten Schritt wurde auf Grundlage des bekannten Zubaus und der bekannten räumlichen Verteilung der Mini-BHKW im Jahr 2013 der Anteil jedes Bundeslandes am Gesamtzubau für Deutschland bestimmt.
- Im zweiten Schritt wurde über den Anteil jedes Bundeslandes am Gesamtzubau für Deutschland im Jahr 2013 und das Minimalszenario gemäß Tabelle 5-2 bzw. das Maximalszenario gemäß Tabelle 5-7 die Anzahl zugebauter Mini-BHKW pro Bundesland für jedes Jahr von 2014 bis 2019 prognostiziert. Damit wurde implizit angenommen, dass sich die Förderpolitik der einzelnen Bundesländer bezüglich Mini-BHKW bis 2020 nicht ändert. Die jedem Bundesland zugewiesene Anzahl Mini-BHKW wurde entsprechend den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.2.4 nach Leistungsklassen differenziert.
- Innerhalb des jeweiligen Bundeslandes wurde die zugewiesene Anzahl zugebauter Mini-BHKW für jedes Jahr von 2014 bis 2019 zufällig verteilt den einzelnen PLZ-Bereichen zugewiesen.

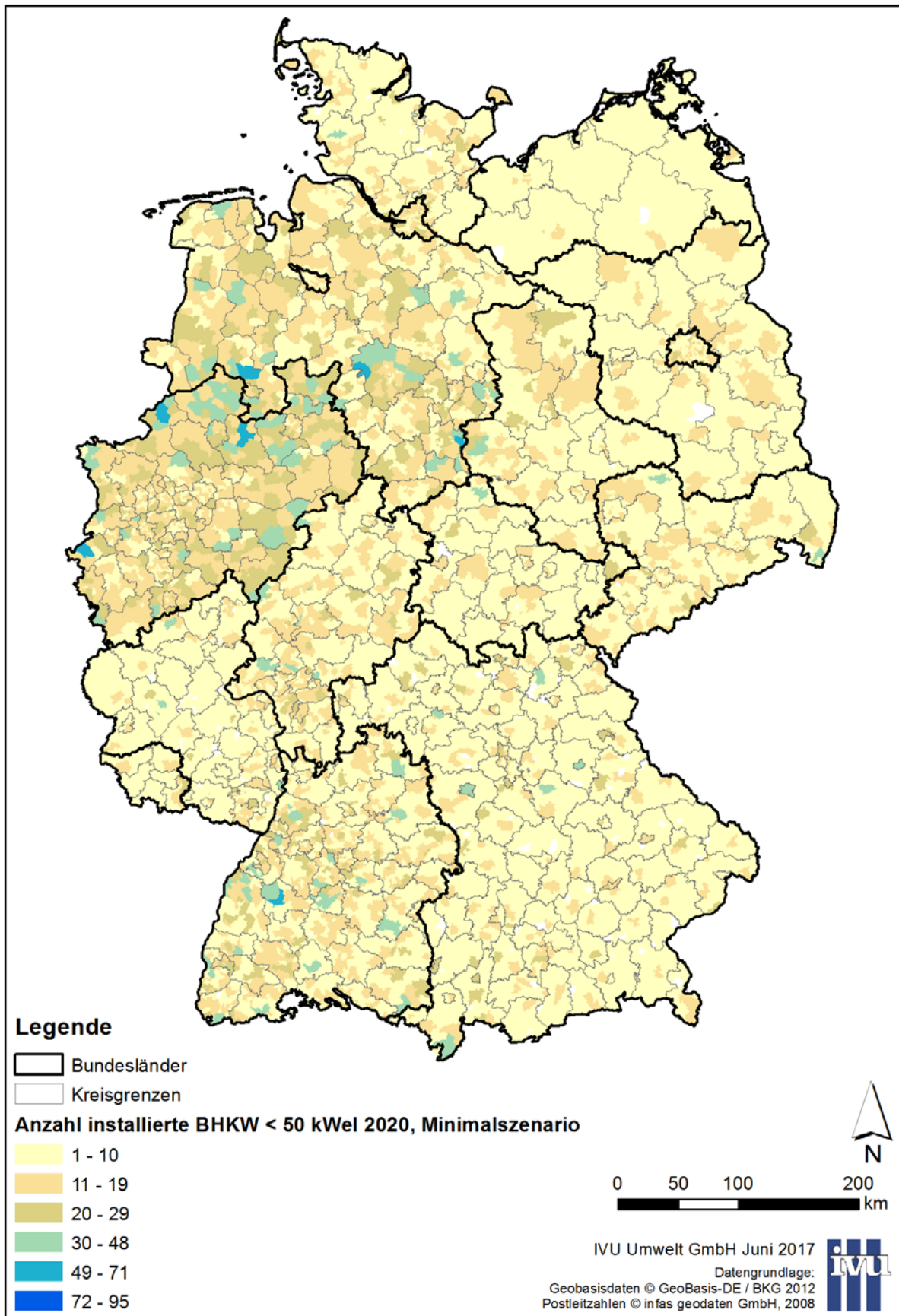
- Unter der Annahme einer BHKW-Laufzeit von 16 Jahren (Abschnitt 5.2.1) wurden die Zubauten der Jahre 1998 bis 2003 abgezogen.

In Tabelle 5-28 sind die Anzahl BHKW < 50 kW_{el} pro Bundesland, die sich nach dem beschriebenen Vorgehen in der Prognose 2020 für das Minimal- und das Maximalszenario ergeben, aufgeführt. Abbildung 5-44 zeigt die sich daraus ergebende Verteilung der BHKW < 50 kW_{el} auf Postleitzahl-Ebene in der Prognose 2020 für das Minimalszenario, Abbildung 5-45 für das Maximalszenario. Spitzenreiter in der Anzahl installierter BHKW < 50 kW_{el} sind wie im Jahr 2013 (Abschnitt 5.4.2.4) die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern, gefolgt von Niedersachsen und Hessen.

Tabelle 5-28: Verteilung der BHKW < 50 kW_{el} auf Bundesland-Ebene in der Prognose 2020 für das Minimal- und das Maximalszenario

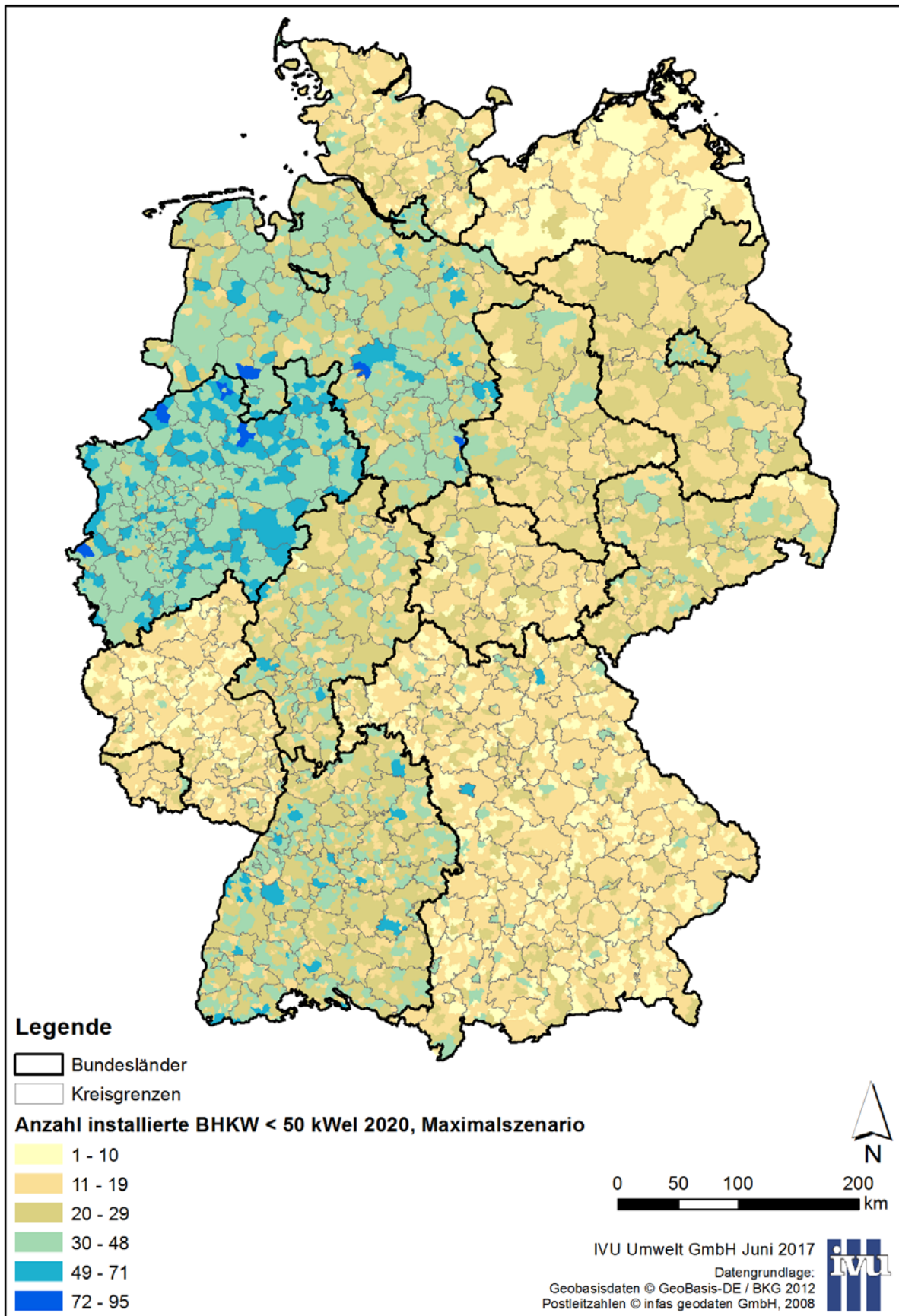
Bundesland	Anzahl Wertepaare nach Tabelle 5-23	Minimalszenario	Maximalszenario
Brandenburg	216	1 436	4 376
Hessen	543	5 035	13 230
Sachsen-Anhalt	213	1 643	4 299
Hamburg	100	1 214	3 434
Berlin	190	1 835	5 464
Niedersachsen	822	9 894	24 317
Bremen	40	396	1 255
Saarland	69	366	1 017
Nordrhein-Westfalen	864	13 227	35 700
Schleswig-Holstein	444	2 747	7 165
Mecklenburg-Vorpommern	189	754	2 117
Sachsen	397	3 102	8 134
Baden-Württemberg	1 198	11 802	30 441
Rheinland-Pfalz	659	3 273	8 685
Bayern	2 067	10 689	28 685
Thüringen	222	1 347	3 610
Summe	8 233	68 760	181 929

Abbildung 5-44: Prognostizierte Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2020 auf PLZ-Ebene im Minimalszenario



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 5-45: Prognostizierte Anzahl der installierten BHKW < 50 kW_{el} im Jahr 2020 auf PLZ-Ebene im Maximalszenario



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

5.4.4 Downscaling der Prognose 2020 auf Modellgebietsebene

Nachdem nun mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.3 eine Verteilung der Mini-BHKW auf Postleitzahl-Ebene vorliegt, ist für die Berechnung der lokalen Emissionen in Abschnitt 6 ein Downscaling auf Modellgebietsebene erforderlich. Dabei haben die Untersuchungen in Abschnitt 5.4.3 gezeigt, dass eine direkte Übertragung der auf Postleitzahl-Ebene prognostizierten BHKW-Anzahlen mangels geeigneter Übertragungsgröße nicht möglich ist.

Die Abschätzung der durch BHKW erzeugten Wärmemengen im Modellgebiet erfolgte daher auf der Grundlage von bundesmittleren Zahlen und von Werten auf Postleitzahl-Ebene. Dies wird als zulässig angesehen, da die Flächen einzelner Postleitzahl-Bezirke innerhalb der Städte kleiner als die zu untersuchenden Gebietsabmessungen von ca. 1 x 1 km² sind. Da gemäß Abschnitt 5.4.3 davon ausgegangen wird, dass die BHKW zufällig gleichverteilt sind, sollten die zugehörigen Anzahl-Werte und Leistungsklassen-Verteilungen der Mini-BHKW direkt auf die Modellgebiete übertragbar sein.

Aus bundesmittleren Zahlen wurde abgeschätzt, dass der Anteil der durch Mini-BHKW erzeugten Wärmemenge im Jahr 2020 im Minimalszenario 1% und im Maximalszenario 4% des für 2020 prognostizierten Wärmebedarfs in Deutschland beträgt. Der für 2020 prognostizierte Wärmebedarf (Endenergie) in Deutschland wurde dabei nach Nitsch et al. (2012), S. 65, auf 556 TWh angesetzt. Die durch Mini-BHKW erzeugte Wärmemenge im Jahr 2020 wurde Tabelle 5-11 in Abschnitt 5.2.4 entnommen. Sie entspricht im Minimalszenario 7 417 GWh, im Maximalszenario 19 612 GWh.

Auf Postleitzahl-Ebene wurde als Bezugsgröße der in Abschnitt 6.4 für 2020 prognostizierte Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser (Wärmebedarf) für das Modellgebiet Berlin herangezogen, er beträgt 177 729 MWh. Es wurden dann auf Basis der in Abschnitt 5.4.3 prognostizierten Verteilung der installierten BHKW die durch diese BHKW erzeugten Wärmemengen für 1 720 städtische Postleitzahl-Bereiche in Gemeinden > 50 000 Einwohner ausgewertet. Diese betragen im Minimalszenario maximal 7 708 MWh und im Maximalszenario 10 783 MWh, das entspricht 4 % bzw. 6 % des für das Modellgebiet Berlin prognostizierten Wärmebedarfs.

Die durch Mini-BHKW erzeugten Strom- und Wärmemengen sowie Schadstoffemissionen auf lokaler Ebene waren laut Aufgabenstellung für städtische Quartiere mit einem hohen und mit einem mittleren Anteil an Mini-BHKW zu ermitteln. Dazu wurden basierend auf den oben genannten Auswertungen die durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugten Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf entsprechend Tabelle 5-29 festgelegt. Die Werte für städtische Quartiere mit einem mittleren Anteil an Mini-BHKW entsprechen den bundesmittleren Werten im Minimal- und Maximalszenario. Die Werte für städtische Quartiere mit einem hohen Anteil an Mini-BHKW orientieren sich an den auf Postleitzahl-Ebene ermittelten maximalen Werten.

Tabelle 5-29: Durch Mini-BHKW im Modellgebiet erzeugte Wärmemengen als Anteile am Wärmebedarf

Szenario	Deckung des Wärmebedarfs durch BHKW im Modellgebiet	Anteil an Wärmebedarf
Minimalszenario	mittel	1 %
	hoch	2 %
Maximalszenario	mittel	4 %
	hoch	8 %

Der Erdgaseinsatz und damit auch die resultierenden Emissionen sind höher, wenn zur Erzeugung der gleichen Wärmemenge mehr kleinere BHKW als weniger große BHKW verwendet werden. Beispielsweise erzeugen 400 BHKW der Leistungsklasse < 2kW_{el} die gleiche Wärmemenge wie 10 BHKW der Leistungsklasse 20-50 kW_{el}, der Erdgaseinsatz der 400 BHKW der Leistungsklasse < 2kW_{el} ist aber rund 10 %

höher. Insofern spielt die Verteilung der zur Erzeugung der geforderten Wärmemengen eingesetzten Mini-BHKW auf die einzelnen Leistungsklassen eine Rolle für die Emissionsberechnung.

Zur Festlegung einer solchen Verteilung der BHKW auf die einzelnen Leistungsklassen wurden die Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Anzahl BHKW, am Erdgaseinsatz, an der elektrischen und an der thermischen Leistung bestimmt, zum einen für Postleitzahl-Bereiche in Gemeinden mit mehr als 50 000 Einwohnern und zum anderen für alle anderen Postleitzahl-Bereiche. Tabelle 5-30 gibt die Ergebnisse der Untersuchung für das Minimalszenario an, Tabelle 5-31 für das Maximalszenario. Zudem ist in beiden Tabellen die Differenz zwischen den beiden Postleitzahl-Bereichen angegeben. Demnach sind in großstädtischen Postleitzahl-Bereichen tendenziell eher BHKWs der höheren Leistungsklassen zu finden als in klein- und mittelstädtischen sowie ländlichen Postleitzahl-Bereichen.

Tabelle 5-30: Minimalszenario, Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Anzahl BHKW, am Erdgaseinsatz und an der Leistung, für städtische und andere Postleitzahl-Bereiche

Klasse	Anzahl BHKW	Erdgaseinsatz	elektrische Leistung	thermische Leistung
Postleitzahl-Bereiche in Gemeinden > 50 000 Einwohner				
<2 kW	22.4 %	3.7 %	2.8 %	3.5 %
2-10 kW	44.7 %	28.0 %	25.8 %	26.2 %
10-20 kW	20.5 %	33.1 %	34.0 %	35.1 %
20-50 kW	12.1 %	34.9 %	37.1 %	35.0 %
alle anderen Postleitzahl-Bereiche				
<2 kW	22.2 %	5.8 %	5.0 %	5.7 %
2-10 kW	49.5 %	36.7 %	35.0 %	35.1 %
10-20 kW	16.3 %	28.0 %	29.0 %	29.6 %
20-50 kW	10.4 %	27.9 %	29.5 %	28.1 %
Differenz				
<2 kW	0.3 %	-2.1 %	-2.1 %	-2.2 %
2-10 kW	-4.9 %	-8.7 %	-9.2 %	-8.9 %
10-20 kW	4.1 %	5.0 %	5.0 %	5.4 %
20-50 kW	1.7 %	7.0 %	7.6 %	6.9 %

Tabelle 5-31: Maximalszenario, Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der Anzahl BHKW, am Erdgaseinsatz und an der Leistung, für städtische und andere Postleitzahl-Bereiche

Klasse	Anzahl BHKW	Erdgaseinsatz	elektrische Leistung	thermische Leistung
Postleitzahl-Bereiche in Gemeinden > 50 000 Einwohner				
<2 kW	26.9 %	3.3 %	2.3 %	3.0 %
2-10 kW	41.1 %	22.5 %	19.8 %	20.5 %
10-20 kW	20.6 %	34.5 %	35.2 %	36.8 %
20-50 kW	11.4 %	39.7 %	42.7 %	39.7 %
alle anderen Postleitzahl-Bereiche				
<2 kW	26.6 %	3.6 %	2.6 %	3.3 %
2-10 kW	45.1 %	26.2 %	23.4 %	24.1 %
10-20 kW	17.2 %	31.5 %	32.4 %	33.7 %
20-50 kW	11.1 %	38.8 %	41.7 %	38.9 %
Differenz				
<2 kW	0.3 %	-0.3 %	-0.3 %	-0.3 %
2-10 kW	-4.0 %	-3.7 %	-3.6 %	-3.6 %
10-20 kW	3.4 %	3.1 %	2.8 %	3.1 %
20-50 kW	0.3 %	1.0 %	1.1 %	0.8 %

Da für die Emissionsberechnungen in Abschnitt 6 die Wärmemengen als Ausgangsgröße dienen, werden im Folgenden die Anteile der thermischen Leistung betrachtet. Aus dem Minimal- und dem Maximalszenario in Tabelle 5-30 und Tabelle 5-31 liegen für die Postleitzahl-Bereiche in Gemeinden mit mehr als 50 000 Einwohnern zwei Verteilungen „A“ und „B“ der durch BHKW erzeugten Wärmemengen auf die

Leistungsklassen vor, die in Tabelle 5-32 nochmal zusammengefasst sind. Davon weist "A" etwas höhere Anteile in den beiden oberen Leistungsklassen auf als "B" und lässt damit etwas geringere Emissionen erwarten.

Tabelle 5-32: Verteilungen „A“ und „B“ der durch BHKW erzeugten Wärmemengen auf die einzelnen Leistungsklassen

	<2 kW	2-10 kW	10-20 kW	20-50 kW
Verteilung „A“	3.0%	20.5%	36.8%	39.7%
Verteilung „B“	3.5%	26.2%	35.1%	35.0%

Zur Unterstreichung der Unterschiede zwischen den Szenarien wurde den Szenarien mit nach Tabelle 5-29 mittlerem Anteil Mini-BHKW im Modellgebiet Verteilung „A“ zugewiesen, und den Szenarien mit nach Tabelle 5-29 hohem Anteil Mini-BHKW im Modellgebiet wurde Verteilung „B“ zugewiesen. Es lassen sich nun auf lokaler Ebene 16 Emissionsszenarien definieren, die zusammen mit den Szenarien auf nationaler Ebene in Abbildung 5-46 dargestellt sind.

Abbildung 5-46: Übersicht über die Emissionsszenarien auf nationaler und auf lokaler Ebene

	Emissionen BHKW	vermiedene Emissionen Strom	vermiedene Emissionen Wärme	Anteil am Wärmebedarf, der durch BHKW gedeckt wird	Szenario Name
Minimalszenario: Substitutionsgrad BHKW niedrig	Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 1a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 1b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 2a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 2b
	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 3a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 3b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 1 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 4a
				hoher Anteil BHKW: 2 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 4b
Maximalszenario: Substitutionsgrad BHKW hoch	Emissionsfaktoren hohe Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 5a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 5b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 6a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 6b
	Emissionsfaktoren niedrige Abschätzung	Emissionsfaktoren dt. Strommix	Emissionsfaktoren Gasheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 7a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 7b
			Emissionsfaktoren Ölheizkessel	mittlerer Anteil BHKW: 4 % Verteilung Leistungsklassen: A	Szenario 8a
				hoher Anteil BHKW: 8 % Verteilung Leistungsklassen: B	Szenario 8b
Nationale Ebene				Lokale Ebene	

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

6 Lokale Emissionsberechnung

6.1 Auswahl der Modellgebiete

6.1.1 Allgemeines

Auf der Grundlage der auf nationaler Ebene aggregierten Emissionsszenarien waren räumlich disaggregierte Emissionsszenarien für drei städtische Modellgebiete zu entwickeln. Der Auftraggeber hatte dazu drei Tabellen mit Messstationen in Regionen mit niedrigen (Tabelle 6-1), hohen (Tabelle 6-2) und mittleren Windgeschwindigkeiten (Tabelle 6-3) vorgegeben, aus denen jeweils eine auszuwählen war und deren umgebende Bebauungsstruktur in einem ca. 1 x 1 km²-Modellgebiet für Modellrechnungen heranzuziehen war. Dabei waren neben den Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für diese Modellgebiete auch Kfz-Emissionen und -Immissionen zu berechnen, um sie zum einen mit den Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau vergleichen zu können und zum anderen zu untersuchen, welchen Beitrag Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau zu Grenzwert-überschreitungen im Straßenraum leisten könnten. Die vom Auftraggeber vorgegebenen Messstationen sind daher i. d. R. Verkehrsmessstationen.

Die Kriterien der Vorauswahl der Modellgebiete in Tabelle 6-1 bis Tabelle 6-3 durch das UBA waren

- Gebiete mit gemessenen Überschreitungen der gültigen Grenzwerte (vornehmlich NO₂ und verkehrliche Hotspots) und
- Gebiete mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten

Die Verbindung der Modellgebietsvorauswahl mit verkehrlichen Hotspots erfolgte unter der Überlegung, dass Minderungsmaßnahmen für den Kfz-Verkehr zukünftig durch den BHKW-Ausbau teilweise konterkariert werden könnten.

Bei der Modellgebietsauswahl im Projekt waren möglichst Gebiete zu wählen, die als repräsentativ für den städtischen BHKW-Ausbau angesehen werden können, wobei eine separate Prüfung der Repräsentativität nicht Gegenstand der Untersuchung war.

Die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte BAFA-Liste (BAFA, 2014) unterteilt Mini-BHKW in die Leistungsklassen ≤ 2 kW_{el}, 2-10 kW_{el}, 10-20 kW_{el} und 20-50 kW_{el}. Laut BHKW-Infothek¹ bilden BHKW mit einer Leistung < 2.5 kW_{el} eine Klasse, die für den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie in Niedrigenergiehäusern angepasst sind. BHKW mit 2.5-20 kW_{el} kommen zumeist in Mehrfamilienhäusern und kleineren Gewerbebetrieben zum Einsatz, während BHKW mit 20-50 kW_{el} vor allem in größeren Immobilien und kleinen Nahwärmenetzen eingesetzt werden.

In Abbildung 5-2 (unten) ist der Anteil der einzelnen Leistungsklassen an der Summe der in Deutschland installierten Mini-BHKW für den Zeitraum, für den Daten aus der BAFA-Liste vorliegen, und für den Prognosezeitraum 01.01.2014 bis 31.12.2019 im Minimalszenario dargestellt. Eine entsprechende Darstellung unter Berücksichtigung des Maximalszenarios findet sich in Abbildung 5-6 (unten). Die zugehörigen Anteile der einzelnen Leistungsklassen an der durch die installierten Mini-BHKW erzeugten Strommenge sind in Abbildung 5-4 (unten) und Abbildung 5-8 (unten) gezeigt.

Demnach hat die Leistungsklasse 2-10 kW_{el} den wesentlichen Anteil an der Anzahl der installierten BHKW, sowohl was den aktuellen Stand als auch was die Prognose betrifft. Die Leistungsklasse 2-20 kW_{el} hat den wesentlichen Anteil an der durch die installierten BHKW erzeugten Strommenge. Als Kriterium für die

¹ <http://www.bhkw-infothek.de/bhkw-informationen/technische-grundlagen/baugrosen-und-bauformen/>

folgende Stationsauswahl wurde daher die Bebauungsstruktur in der Umgebung der Messstation herangezogen. Ausgehend von der Auswertung der BAFA-Liste sollte ein hoher Anteil an Mehrfamilienhäusern gegeben sein.

6.1.2 Modellgebiet für niedrige Windgeschwindigkeiten: Berlin

In Tabelle 6-1 sind die vom Auftraggeber vorgegebenen Messstationen in Regionen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten aufgeführt, deren umgebende Bebauungsstruktur in einem ca. 1 x 1 km²-Modellgebiet für Modellrechnungen heranzuziehen ist.

Tabelle 6-1: Messstationen in Regionen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten

Stationscode	Stadt / Name
DEBW116	Stuttgart Hohenheimer Straße (S)
DEBW118	Stuttgart Am Neckartor (S)
DEBY115	München/Landshuter Allee
DEBY037	München/Stachus
DEBW134	Stuttgart-Bad Cannstatt
DEBW122	Freiburg Schwarzwaldstraße (V)
DEBE067	Berlin Hardenbergplatz
DEBW099	Stuttgart Arnulf-Klett-Platz
DEBY114	München/Prinzregentenstraße
DEHE041	Frankfurt-Friedb.Ldstr.
DEBE063	Berlin Neukölln-Silbersteinstr.
DEBE061	Berlin Steglitz-Schildhornstr.
DEBE064	Berlin Neukölln-Karl-Marx-Str. 76
DEBE069	Berlin Mariendorf, Mariendorfer Damm
DESN084	Dresden-Bergstr.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde zunächst festgelegt, dass die Gebiete Karl-Marx-Straße, Silbersteinstraße und der Mariendorfer Damm (alle in Berlin) näher betrachtet werden. Der Hardenbergplatz in Berlin als durch den Busbahnhof geprägter Bereich und der Stachus in München als verkehrlicher Kreuzungsbereich wurden als eher nicht in Betracht kommend eingestuft. Die Umgebung der drei näher zu betrachtenden Gebiete ist charakterisiert wie folgt:

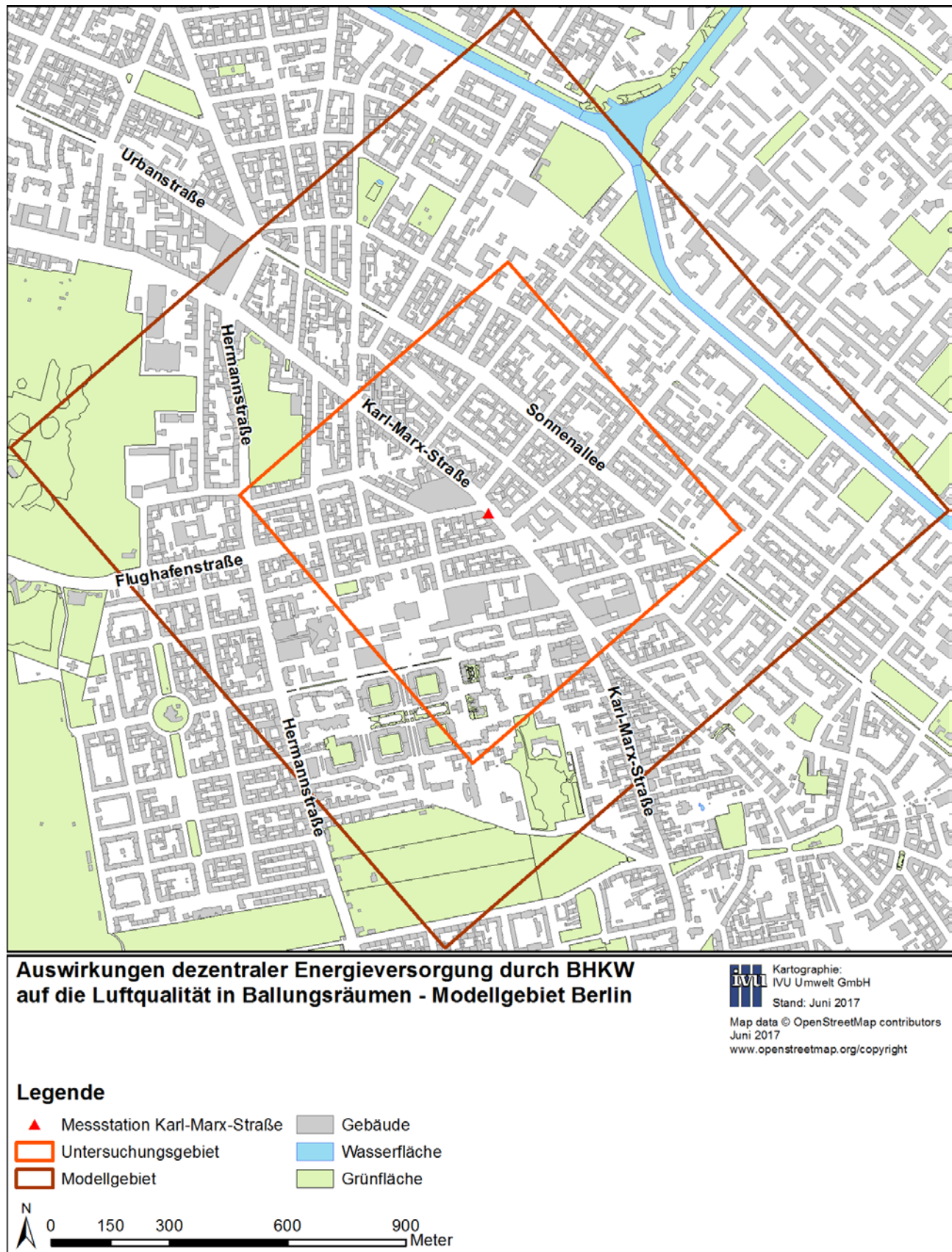
- Die Umgebung der Messstation Karl-Marx-Straße ist durch eine dichte, mehrstöckige Wohn- und Geschäftsbebauung geprägt.
- In der Umgebung der Messstation Silbersteinstraße befindet sich ebenfalls mehrstöckige Wohnbebauung. Östlich der Karl-Marx-Straße sind größere Gewerbeflächen. Das Modellgebiet wird von einer Bahnlinie (S+U-Bahn) durchschnitten.
- In der Umgebung der Messstation Mariendorfer Damm sind mit verschiedenen Friedhöfen sowie dem Volkspark Mariendorf großflächig Grünflächen vorhanden. Das Modellgebiet ist durch eine eher lockere ein- und mehrstöckige Wohnbebauung geprägt.

Unter Bezug auf die Vorüberlegungen in Abschnitt 6.1.1 wurde in weiterer Abstimmung mit dem Auftraggeber die Umgebung der Messstation Karl-Marx-Straße als Modellgebiet für niedrige Windgeschwindigkeiten ausgewählt. Die Lage der Messstation sowie die Umgebung sind in Abbildung 6-1

dargestellt. Die für die Modellierung erforderlichen Daten wurden von der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz in Berlin für dieses Projekt freigegeben bzw. zur Verfügung gestellt.

Zur Orientierung sind in Abbildung 6-1 außerdem die Umrisse des Untersuchungs- und des Modellgebiets eingezeichnet. Als Untersuchungsgebiet wird dabei der Bereich bezeichnet, für den gemäß Abschnitt 6.4 der Wärmebedarf ermittelt wurde und für den die Auswertungen auf Basis der Modellergebnisse gemäß Abschnitt 8 durchgeführt wurden. Die Abmessungen des Untersuchungsgebiets betragen ca. 900 m x 900 m. Als Modellgebiet im Sinne der Ausbreitungsrechnung wird der Bereich bezeichnet, der durch das der Modellrechnung zu Grunde liegende Rechengitter abgedeckt wird. Das Modellgebiet ist zur Vermeidung von Randeffekten im Untersuchungsgebiet deutlich größer als das Untersuchungsgebiet, seine Abmessungen betragen hier knapp 1 700 m x 1 700 m.

Abbildung 6-1: Lage der Messstation Karl-Marx-Straße und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

6.1.3 Modellgebiet für hohe Windgeschwindigkeiten: Bremen

In Tabelle 6-2 sind die vom Auftraggeber vorgegebenen Messstationen in Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten aufgeführt, deren umgebende Bebauungsstruktur in einem ca. 1 x 1 km²-Modellgebiet für Modellrechnungen heranzuziehen ist.

Tabelle 6-2: Messstationen in Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten

Stationscode	Stadt / Name
DEHH070	Hamburg Max-Brauer-Allee II (Straße)
DEHH068	Hamburg Habichtstraße
DEHH026	Hamburg Stresemannstraße
DESH027	Kiel-Bahnhofstr. Verk.
DEHH064	Hamburg Kieler Straße
DEHB011	Bremen Cherbourger Straße
DEHB006	Bremen Verkehr 1
DEMVO20	Rostock Am Strande
DENI048	Hannover Verkehr
DESH026	Lübeck Gr. Burgstr

Aus Tabelle 6-2 wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber unter Bezug auf die Vorüberlegungen in Abschnitt 6.1.1 und unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit die Umgebung der Messstation Bremen Verkehr 1 (Dobbenweg) als Modellgebiet für hohe Windgeschwindigkeiten ausgewählt. Die Lage der Messstation sowie die Umgebung sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Die für die Modellierung erforderlichen Daten wurden vom Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen für dieses Projekt zur Verfügung gestellt.

Zur Orientierung sind in Abbildung 6-2 außerdem die Umrisse des Untersuchungs- und des Modellgebiets eingezeichnet. Die Abmessungen des Untersuchungsgebiets betragen ca. 900 m x 900 m. Das Modellgebiet ist zur Vermeidung von Randeffekten im Untersuchungsgebiet deutlich größer als das Untersuchungsgebiet, seine Abmessungen betragen hier ca. 1 500 m x 1 500 m.

Abbildung 6-2: Lage der Messstation Bremen Verkehr 1 (Dobbenweg) und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

6.1.4 Modellgebiet für mittlere Windgeschwindigkeiten: Köln

In Tabelle 6-3 sind die vom Auftraggeber vorgegebenen Messstationen in Regionen mit mittleren Windgeschwindigkeiten aufgeführt, deren umgebende Bebauungsstruktur in einem ca. 1 x 1 km²-Modellgebiet für Modellrechnungen heranzuziehen ist.

Tabelle 6-3: Messstationen in Regionen mit mittleren Windgeschwindigkeiten

Stationscode	Stadt / Name
DENW211	Köln Clevischer Ring 3
DENW082	Düsseldorf Corneliusstraße
DENW216	Düsseldorf-Bilk
DENW219	Köln-Weiden
DENW136	Dortmund Brackeler Straße
DENW171	Essen Hombrucher Straße 21/23
DENW151	Köln Neumarkt
DENW188	Oberhausen Mülheimer Straße 117
DENW175	Bonn Reuterstraße 24
DENW215	Essen-Frohnhausen
DENW208	Gelsenkirchen Kurt-Schumacher-Straße
DENW161	Essen Alfredstraße 9/11
DENW164	Köln Hohenstaufenring 57A
DENW148	Köln Justinianstraße

Als Modellgebiet für mittlere Windgeschwindigkeiten wurde entsprechend dem Angebot des Auftragnehmers der Clevische Ring in Köln ausgewählt, da nur für diese Messstation aus Tabelle 6-3 die erforderlichen Eingangsdaten beim Auftragnehmer vorlagen.

Die Umgebung der Messstation Clevischer Ring ist durch eine mehrstöckige Wohn- und Geschäftsbebauung mit vereinzelt Grünflächen geprägt. Insbesondere der Bereich östlich des Clevischen Rings ist eher locker bebaut.

Die Lage der Messstation sowie die Umgebung sind in Abbildung 6-3 dargestellt. Die für die Modellierung erforderlichen Daten wurden vom Umwelt- und Verbraucherschutzamt der Stadt Köln für dieses Projekt freigegeben bzw. zur Verfügung gestellt.

Zur Orientierung sind in Abbildung 6-3 außerdem die Umriss des Untersuchungs- und des Modellgebiets eingezeichnet. Die Abmessungen des Untersuchungsgebiets betragen ca. 900 m x 900 m. Das Modellgebiet ist zur Vermeidung von Randeffekten im Untersuchungsgebiet deutlich größer als das Untersuchungsgebiet, seine Abmessungen betragen hier ca. 1 500 m x 1 500 m.

Abbildung 6-3: Lage der Messstation Clevischer Ring und Umgebung sowie Umriss des Modellgebiets



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

6.2 Aufbereitung der Bebauungsdaten für die Modellgebiete

Die Bebauungsdaten sind die Grundlage sowohl für die Wärmebedarfsberechnung nach Abschnitt 6.4 in den drei in Abschnitt 6.1 ausgewählten Untersuchungsgebieten Berlin, Bremen und Köln als auch für die Ausbreitungsrechnungen gemäß Abschnitt 8, wo sie als Hindernisgeometrien für die Windfeldmodellierung und als Quellgeometrien für die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau verwendet wurden.

Für die drei Modellgebiete standen folgende Bebauungsdaten zur Verfügung:

- Grundriss
- Gebäudehöhe
- z. T. Anzahl Geschosse
- Gebäudenutzung

Das Baujahr der Gebäude oder eine Einordnung der Gebäude in Baualtersklassen stand nicht zur Verfügung. Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-6 zeigen die Grundrisse und Gebäudehöhen der drei Modellgebiete gemäß den von den Städten zur Verfügung gestellten Daten.

Basierend auf den vorhandenen Bebauungsdaten wurden die Gebäudegrundflächen und Gebäudevolumina berechnet. Fehlende Geschosshöhen wurden aus den Gebäudehöhen abgeleitet. Dazu wurde eine mittlere Geschosshöhe von 3 m angesetzt. Die Geschosshöhen der höchsten Gebäude wurden dann per Luftbild kontrolliert und ggf. angepasst.

Aus den Daten zur Gebäudenutzung wurde abgeleitet, ob ein Gebäude als emissionsrelevant eingestuft wird oder nicht. Tabelle 6-4 zeigt die Nutzungen, die als nicht emissionsrelevant festgelegt wurden. Als nicht emissionsrelevante Gebäude wurden zudem Gebäude mit einer Gebäudehöhe < 2 m definiert. Für die emissionsrelevanten Gebäude wurde im Rahmen der Wärmebedarfsberechnung in Abschnitt 6.4 auf Basis der Gebäudenutzung festgelegt, nach welcher Regel der Endenergiebedarf des jeweiligen Gebäudes zu berechnen ist.

Tabelle 6-5 zeigt jeweils für den Bereich des Untersuchungsgebietes gemäß Abschnitt 6.1 die Anzahl der emissionsrelevanten Gebäude, die Summe der Bruttogrundflächen, die Summe der Gebäudevolumina und die mittlere Gebäudehöhe. Die Bruttogrundfläche eines Gebäudes wurde dabei aus der Gebäudegrundfläche multipliziert mit der Anzahl der Geschosse des jeweiligen Gebäudes bestimmt.

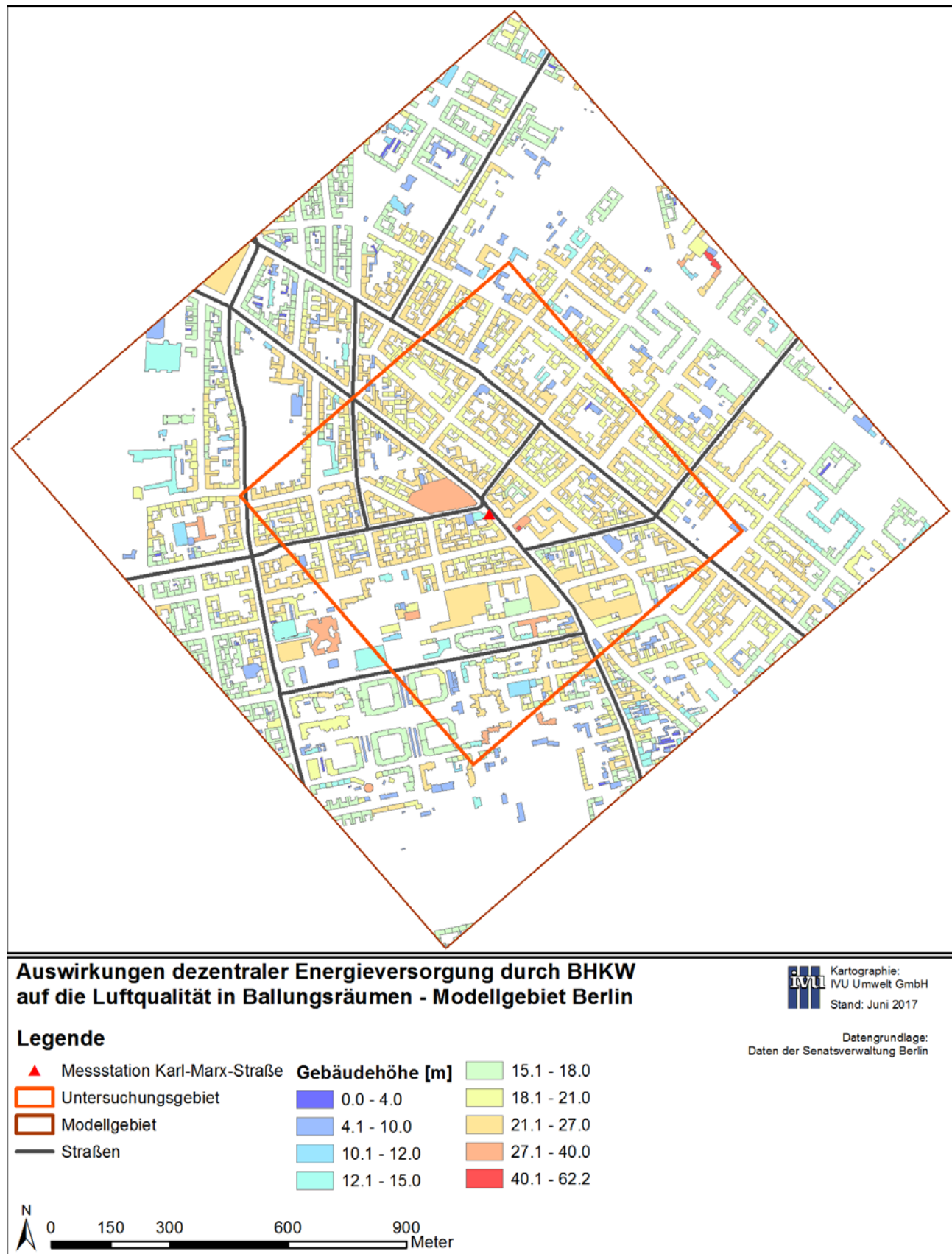
Tabelle 6-4: Nutzungsarten „Nicht emissionsrelevante Gebäude“

Berlin	Bremen	Köln
Abfallbeseitigung (Lagergebäude)	Doppelgarage	Betriebsgebäude für Schienenverkehr
Bedürfnisanstalt	Einzelgarage	Garage
Doppelgarage	Gebäude für Parken (allgemein)	Gebäude zum U-Bahnhof
Einzelgarage	Parken	Heizwerk
Elektrizitätsversorgung	Parkhaus	Kiosk
Gebäude für Land- u. Forstwirtschaft	Sammelgarage	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren
Kiosk	Schutzbunker	Parkhaus
Parken	Trafo, Umformer	Schuppen
Parkhaus	Ungenutztes Gebäude	Tiefgarage
Sammelgarage	Unterirdisches Gebäude	Trauerhalle
Schuppen		Umformer
Schutzbunker		
Stall		
Tiefgarage		
Umformerstation		
Umspannwerk		
Unterirdisches Gebäude (allgemein)		
Wasserturm		

Tabelle 6-5: Kenndaten der emissionsrelevanten Gebäude in den drei Untersuchungsgebieten

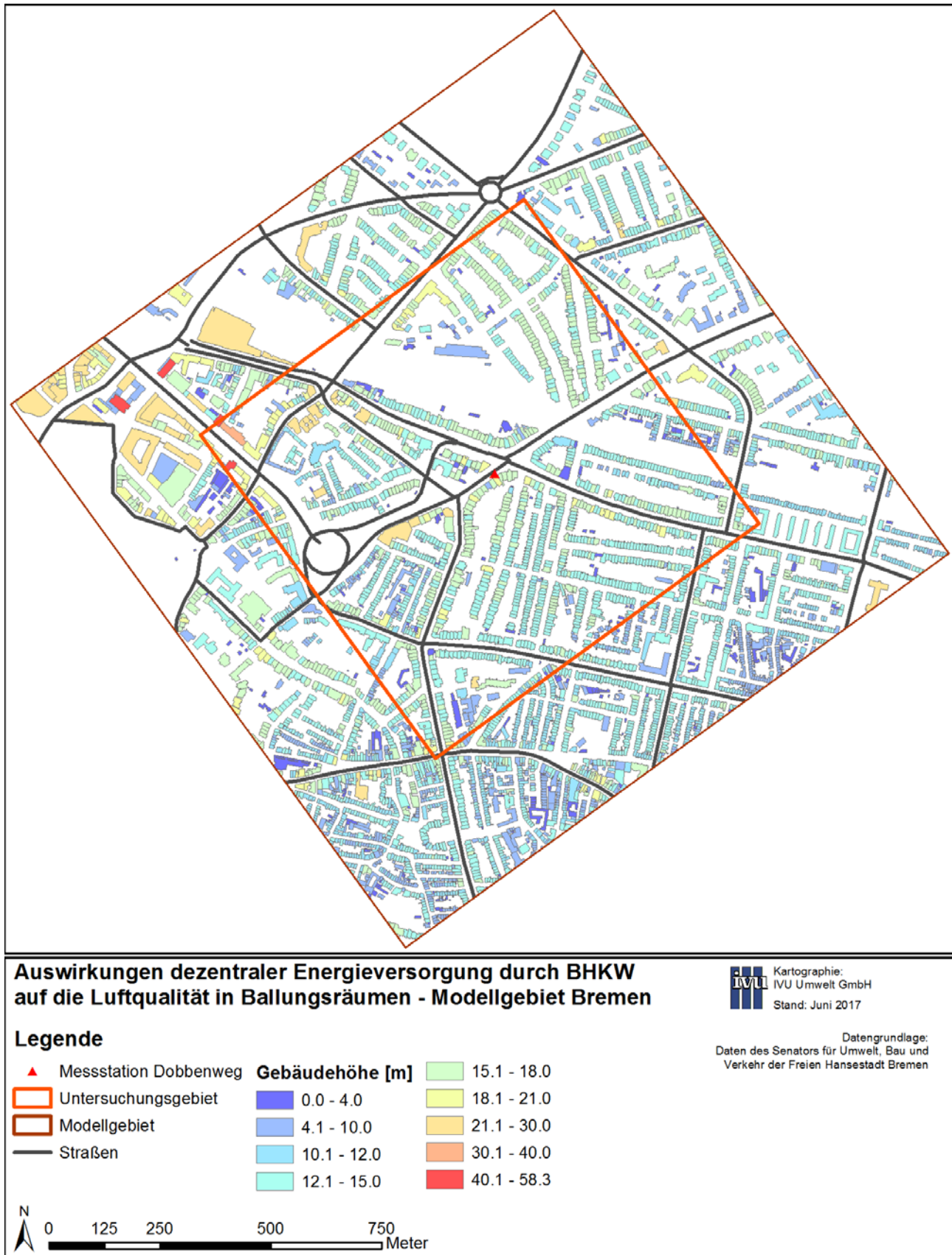
Stadt	Anzahl Gebäude	Bruttogrundfläche [m ²]	Gebäudevolumen [m ³]	mittlere Gebäudehöhe [m]
Berlin	683	1 603 973	6 646 579	20.9
Bremen	1 737	1 172 432	3 513 693	14.4
Köln	1 532	883 247	3 353 834	12.6

Abbildung 6-4: Modellgebiet Berlin mit Grundriss und Höhe der Gebäude



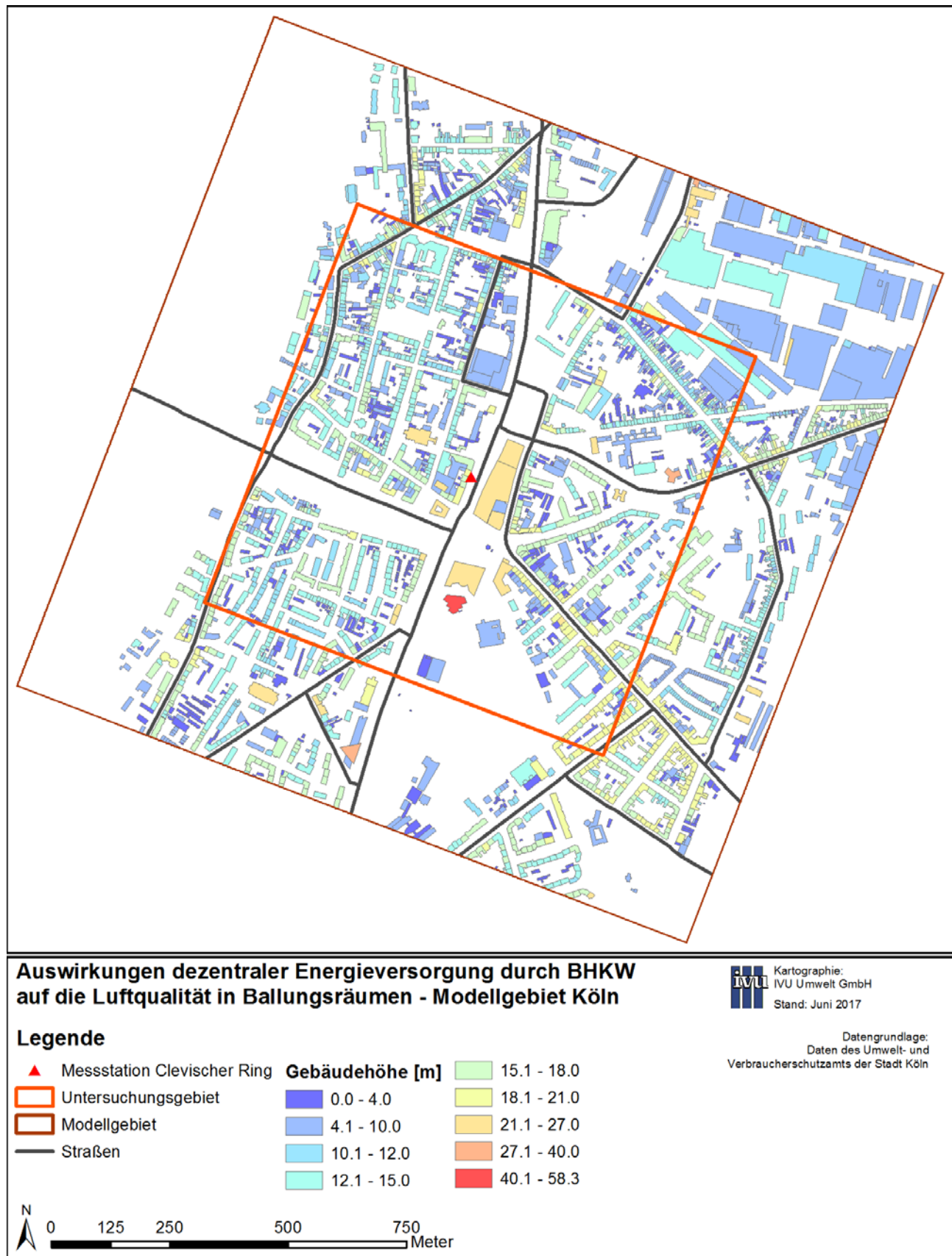
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 6-5: Modellgebiet Bremen mit Grundriss und Höhe der Gebäude



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 6-6: Modellgebiet Köln mit Grundriss und Höhe der Gebäude



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

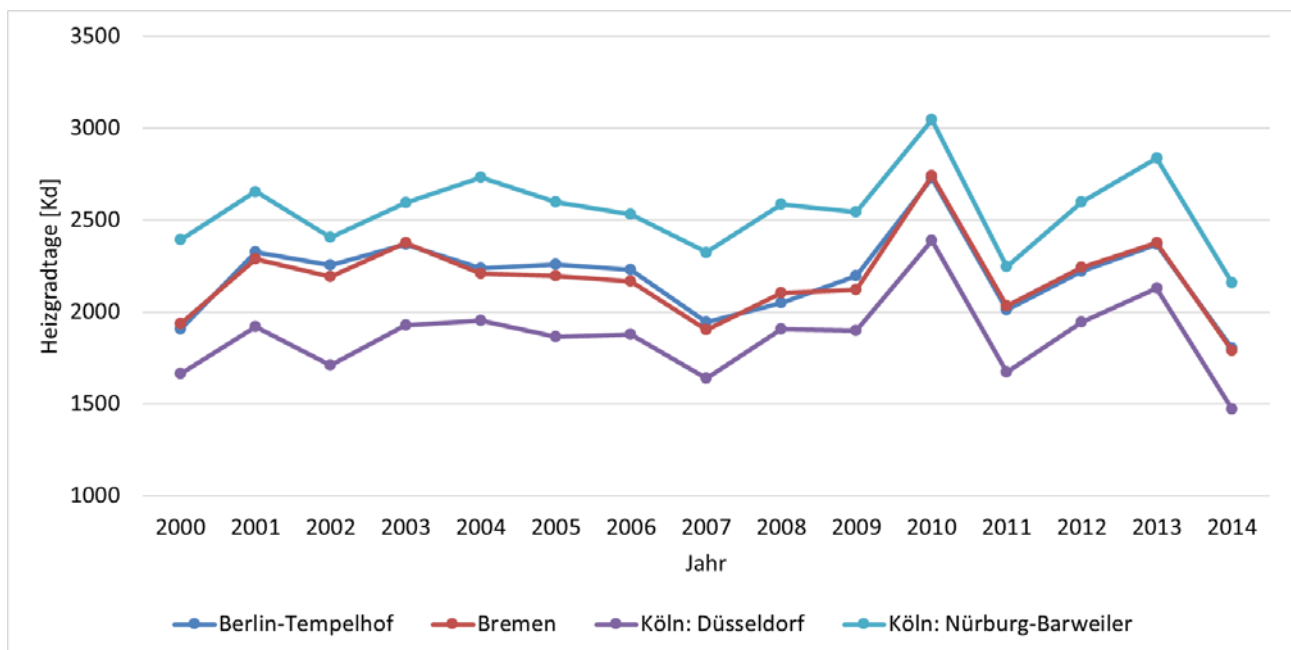
6.3 Meteorologische Daten

Als Bezugsjahr für die zu verwendenden meteorologischen Daten wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber das Jahr 2010 angesetzt. Grundlage für die Auswahl war die Überlegung, dass potenziell sich verstärkende negative Auswirkungen von gleichzeitig auftretendem hohem Wärmebedarf (Endenergiebedarf) mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen berücksichtigt werden sollen.

Im Jahr 2010 waren Januar, Februar und Dezember sehr kalt. Gleichzeitig wurden laut Umweltbundesamt an 73 % der verkehrsnahen Messstationen Überschreitungen des NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwertes von 40 µg/m³ festgestellt und an über 30 % dieser Stationen an mehr als 35 Tagen PM10-Tagesmittelwerte über 50 µg/m³ gemessen und somit ebenfalls Überschreitungen des Grenzwerts festgestellt (UBA, 2011; UBA, 2012). Das Jahr 2011 weist mehr Überschreitungen des Tagesmittelwertkriteriums von PM10 auf, aber weniger Überschreitungen des NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwertes (an 70 % der Stationen) (UBA, 2012; UBA, 2013), und es ist deutlich wärmer. Da NO₂ im Kontext des vorliegenden Projektes potentiell kritischer ist (für PM10 werden nach Abschnitt 5.3.4 durch den Einsatz von BHKW nur Minderemissionen erzeugt) und der Wärmebedarf im Jahr 2010 höher, wurde als Bezugsjahr für die meteorologischen Daten das Jahr 2010 festgelegt.

Abbildung 6-7 zeigt die Zeitreihe der Heizgradtage nach IWU (2017) von 2000 bis 2014 für die in Abschnitt 6.1 festgelegten Modellgebiete. Da in IWU (2017) keine Daten für Köln vorliegen, wurden alternativ entsprechend BMVBS (2007), Anlage 2, die Daten für Nürburg-Barweiler und Düsseldorf dargestellt. Demnach ist das Jahr 2010 auch lokal für die drei ausgewählten Modellgebiete das kälteste Jahr innerhalb dieser 15 Jahre.

Abbildung 6-7: Zeitreihe der Heizgradtage für die Modellgebiete 2000 – 2014 nach IWU (2017)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Für das gewählte meteorologische Bezugsjahr 2010 wurden vom Auftraggeber meteorologische Zeitreihen des DWD für die Stationen Berlin-Tempelhof, Bremen und Köln-Bonn bereitgestellt. Es lagen zum einen sogenannte AKTerms vor, die stündliche Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der Ausbreitungsklasse enthalten. Zum anderen wurde für jede der drei Stationen eine stündliche Zeitreihe der Lufttemperatur bereitgestellt.

In Tabelle 6-6 sind die mittlere Windgeschwindigkeit und die mittlere Temperatur aufgeführt, die sich aus den Daten des DWD für die drei Stationen in den Modellgebieten ergeben. Demnach hat das nach Abschnitt 6.1 als „Modellgebiet für niedrige Windgeschwindigkeiten“ klassifizierte Berlin hier im konkreten Bezugsjahr 2010 eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit als das als „Modellgebiet für mittlere Windgeschwindigkeiten“ klassifizierte Köln.

Tabelle 6-6: Mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere Temperatur für 2010

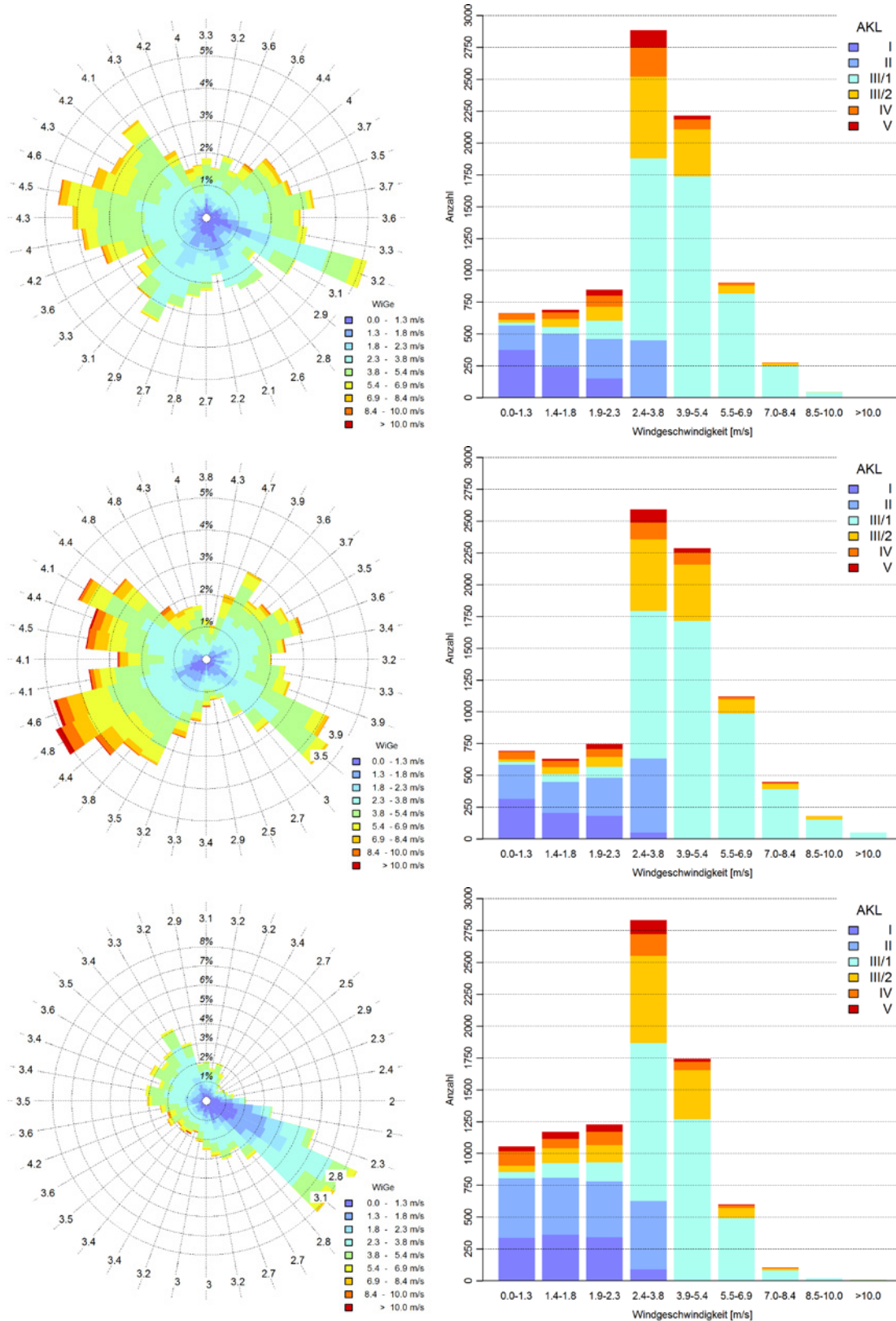
	Berlin	Bremen	Köln
mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	3.6	3.9	3.1
mittlere Temperatur [°C]	8.9	8.4	9.4

In Abbildung 6-8 sind die zugehörigen Windrichtungsverteilungen der Windgeschwindigkeiten sowie die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten und Ausbreitungsklassen (AKL) dargestellt. Die Zahlen am äußeren Rand der Windrichtungsverteilung geben die mittlere Windgeschwindigkeit der jeweiligen Windrichtung wieder.

Die Windrichtungsverteilungen von Berlin und Bremen stellen sich als bis zu einem gewissen Grad ähnlich dar. Beide zeigen vermehrt östliche und westliche Anströmrichtungen, nördliche und südliche Winde treten jedoch ebenfalls relativ häufig auf. Hohe Windgeschwindigkeiten treten vor allem bei westlichen Winden auf. In Köln hingegen dominieren südöstliche Winde sehr stark die Windrichtungsverteilung.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten und Ausbreitungsklassen sind für Berlin und Bremen ebenfalls relativ ähnlich, mit etwas höheren Anteilen in den höheren Windgeschwindigkeiten > 3.9 m/s für Bremen. Die Häufigkeitsverteilung für Köln ist in den unteren Windgeschwindigkeitsklassen < 2.4 m/s deutlich stärker besetzt als in Berlin oder Bremen, verbunden mit einer größeren Häufigkeit stabiler Ausbreitungsklassen, die auf schlechtere Ausbreitungsbedingungen im Vergleich zu Berlin und Bremen hinweisen.

Abbildung 6-8: Windrichtungsverteilung der Windgeschwindigkeiten (links) und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Ausbreitungsklassen (AKL, rechts). Die Zahlen am äußeren Rand der Windrichtungsverteilung geben die mittlere Windgeschwindigkeit der jeweiligen Windrichtung wieder. Oben: Berlin-Tempelhof. Mitte: Bremen. Unten: Köln-Bonn.



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten des DWD (IVU Umwelt GmbH)

6.4 Berechnung des Wärmebedarfs in den Modellgebieten

6.4.1 Methodik

6.4.1.1 Wohngebäude

Da für die Modellgebiete weder gebäudebezogenen Wärmebedarfsdaten noch das Gebäudealter zur Verfügung standen, musste der Wärmebedarf nach der Gebäudegröße aus statistischen Erhebungen abgeleitet werden.

In einer Untersuchung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung aus dem Jahr 2012 (BBSR, 2012) zur Novelle der EnEV (EnEV, 2009) wurden Vergleichswerte für den Verbrauch bei Wohngebäuden bestimmt. Es wurden Verbrauchsdaten von 64 000 Gebäuden ausgewertet.

Ergebnis war unter anderem, dass der durchschnittliche Wärmebedarf (angegeben als Endenergieverbrauch) unter anderem wesentlich auch von der Gebäudegröße abhängt.

Es wurden die in BBSR (2012) verwendeten Gebäude-Größenklassen übernommen:

- $\leq 200 \text{ m}^2$ (Einfamilienhaus)
- $200 \text{ m}^2 \leq 500 \text{ m}^2$ (Mehrfamilienhaus klein)
- $500 \text{ m}^2 \leq 2.000 \text{ m}^2$ (Mehrfamilienhaus mittel)
- $> 2.000 \text{ m}^2$ (Mehrfamilienhaus groß)

In BBSR (2012) wurden die Gebäude-Größenklassen so gewählt, dass sie den üblichen Gebäudegrößen von Einfamilienhäusern, kleinen Mehrfamilienhäusern bis fünf Wohneinheiten, mittleren Mehrfamilienhäusern bis 20 Wohneinheiten und großen Mehrfamilienhäusern mit mehr als 20 Wohneinheiten entsprechen.

Die in BBSR (2012) angegebenen Vergleichswerte für den Endenergieverbrauch beziehen sich entsprechend der VDI-Richtlinie 3807 auf die meteorologische Messstation Würzburg (BBSR, 2015) und lassen sich so auch auf andere Klimastationen mit einem „Klimafaktor“ umrechnen.

Für die Szenarien auf lokaler Ebene gemäß Abbildung 5-46 wird als Energiestandard der Gebäude der Mittelwert über alle Sanierungszustände angesetzt (im Folgenden als „Mittelwert“ bezeichnet). Für die weitere Variation der Szenarien in Abschnitt 9.1 ist eine Variation des Energiestandards der Gebäude vorgesehen. Für die „untere Abschätzung“ wurde der Mittelwert für Neubauten nach EnEV (2002) angesetzt, für die „obere Abschätzung“ wurde der Mittelwert für komplett unsanierte Gebäude verwendet (jeweils abgeleitet aus BBSR (2012)).

Der Mittelwert sowie die untere und die obere Abschätzung des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten wurden nach den Vergleichswerten in der aus BBSR (2012) zusammengestellten Tabelle 6-7 gebäudeweise errechnet:

Tabelle 6-7: Flächenbezogener Endenergieverbrauch (Energieträger Gas/Öl)

	Mittelwert [kWh/m ² *a]	Standardabweichung [kWh/m ² *a]	davon Warmwasser [kWh/m ² *a]
Nettogrundfläche <= 200 m²			
untere Abschätzung	85	25	22
Mittelwert	151	56	27
obere Abschätzung	176	61	32
Nettogrundfläche 200-500 m²			
untere Abschätzung	87	25	19
Mittelwert	135	43	27
obere Abschätzung	156	50	27
Nettogrundfläche 500-2000 m²			
untere Abschätzung	84	22	22
Mittelwert	122	41	27
obere Abschätzung	139	42	27
Nettogrundfläche >2000 m²			
untere Abschätzung	87	20	22
Mittelwert	108	37	27
obere Abschätzung	137	39	27

Die Werte sind jeweils bezogen auf die Nettogrundfläche NGF. Die Umrechnung von Bruttogrundfläche BGF zu NGF wurde für Wohngebäude pauschal mit $c = 0.85$ vorgenommen (Bogenstätter, 2007).

Die Bestimmung des Endenergiebedarfs separat für jedes Wohngebäude und die betrachteten Energiestandards erfolgte somit wie folgt:

Heizung: $EEB_{HZ} = EEV_{HZ} * NGF * KF$

Warmwasser: $EEB_{WW} = EEV_{WW} * NGF$

mit

EEB = Endenergiebedarf [kWh/a]

EEV = Endenergieverbrauch [kWh/(m²*a)],
bezogen auf die meteorologische Station Würzburg

HZ = Heizung

WW = Warmwasser

NGF = Nettogrundfläche = $c * \text{Bruttogrundfläche}$

c = 0.85

KF = Klimafaktor = HGT_i / HGT_w

HGT_i = Heizgradtage für Berlin, Bremen, Köln im Jahr 2010,
bestimmt nach VDI 3807 bei einer Heizgrenztemperatur von 15°C (GBG, 2013)

HGT_w = Heizgradtage langjähriges Mittel Würzburg,
aus (IVU, 2017) für eine Heizgrenztemperatur von 15°C

6.4.1.2 Nichtwohngebäude

Für die Nichtwohngebäude wurden den Gebäuden aus den Modellgebieten die jeweiligen Vergleichswerte (Mittelwerte) aus der "Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand" (BMVBS 2009) zugewiesen.

Die Vergleichswerte wurden in BMVBS (2009) vergleichbar zu denen für Wohngebäude (BBSR, 2012) ermittelt. Auch sie beziehen sich auf die meteorologische Messstation Würzburg und auf die NGF. In den NWG (Nichtwohngebäude)-Regeln sind für Gebäude, die nach BWZK (Bauwerkszuordnungskatalog, BMVBS 2009) zuzuordnen sind, Faktoren für die Umrechnung der Bruttogrundfläche in die Nettogrundfläche ($c = \text{BGF}/\text{NGF}$) angegeben. Für die restlichen Gebäude wurde nach Nutzungsgruppe ein Umrechnungsfaktor von $c = 0.9$ angesetzt.

Bei den Nichtwohngebäuden wurde im Rahmen der Variation des Energiestandards der Gebäude zur Bestimmung des Endenergiebedarfs als „untere Abschätzung“ $2/3$ des Mittelwerts und als „obere Abschätzung“ der Mittelwert multipliziert mit $4/3$ angesetzt.

6.4.2 Ergebnisse

Tabelle 6-8 bis Tabelle 6-10 stellen, jeweils für die Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln, neben den angewendeten Klimafaktoren, der Anzahl der emissionsrelevanten Gebäude mit ihrer gesamten und ihrer mittleren Nettogrundfläche den errechneten absoluten und spezifischen Endenergiebedarf der Gebäude für Heizung und Warmwasser für die betrachteten Energiestandards der Gebäude (Mittelwert, untere Abschätzung, obere Abschätzung) im Jahr 2020 dar.

Tabelle 6-8: Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Berlin

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Klimafaktor	1.15		
Anzahl emissionsrelevanter Gebäude	683		
Summe NGF [m ²]	1 373 374.6		
mittlere NGF [m ²]	2010.8		
abs. Endenergiebedarf Heizung [MWh/a]	145 057	103 333	187 491
abs. Endenergiebedarf Warmwasser [MWh/a]	32 672	25 796	34 511
abs. Endenergiebedarf [MWh/a]	177 729	129 130	222 003
Anteil Endenergiebedarf Warmwasser [%]	18.4%	20.0%	15.5%
spez. Endenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² *a)]	105.6	75.2	136.5
spez. Endenergiebedarf Warmwasser [kWh/(m ² *a)]	23.8	18.8	25.1
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² *a)]	129.4	94.0	161.6

Tabelle 6-9: Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Bremen

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Klimafaktor			1.16
Anzahl emissionsrelevanter Gebäude			1 737
Summe NGF [m ²]			996 885.2
mittlere NGF [m ²]			573.9
abs. Endenergiebedarf Heizung [MWh/a]	115 674	75 840	141 020
abs. Endenergiebedarf Warmwasser [MWh/a]	25 366	19 601	26 117
abs. Endenergiebedarf [MWh/a]	141 039	95 441	167 137
Anteil Endenergiebedarf Warmwasser [%]	18.0%	20.5%	15.6%
spez. Endenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² *a)]	116.0	76.1	141.5
spez. Endenergiebedarf Warmwasser [kWh/(m ² *a)]	25.5	19.7	26.2
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² *a)]	141.5	95.7	167.7

Tabelle 6-10: Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Untersuchungsgebiet Köln

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Klimafaktor			1.03
Anzahl emissionsrelevanter Gebäude			1 532
Summe NGF [m ²]			757 922.2
mittlere NGF [m ²]			494,7
abs. Endenergiebedarf Heizung [MWh/a]	83 305	54 686	104 181
abs. Endenergiebedarf Warmwasser [MWh/a]	17 752	13 491	19 091
abs. Endenergiebedarf [MWh/a]	101 056	68 177	123 272
Anteil Endenergiebedarf Warmwasser [%]	17.6%	19.8%	15.5%
spez. Endenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² *a)]	109.9	72.2	137.5
spez. Endenergiebedarf Warmwasser [kWh/(m ² *a)]	23.4	17.8	25.2
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² *a)]	133.3	90.0	162.6

6.5 Berechnung der BHKW-bedingten Emissionsänderungen in den Modellgebieten

6.5.1 Vorgehensweise

Auf Basis des in Abschnitt 6.4 bestimmten Endenergiebedarfs durch Heizung und Warmwasser (Wärmebedarf) für die drei Untersuchungsgebiete und der Vorgaben aus der Definition der lokalen Szenarien entsprechend Abbildung 5-46 wurden die durch den Einsatz von Mini-BHKW bedingten Emissionsänderungen ermittelt.

Dazu wurde im ersten Schritt pro Szenario der Endenergiebedarf des jeweiligen Untersuchungsgebiets aufgeteilt nach Art der Erzeugung. In Tabelle 6-11 ist dies beispielhaft für das Untersuchungsgebiet Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt) durchgeführt. In Szenario 1a wird 1 % des Endenergiebedarfs im Untersuchungsgebiet durch BHKW erzeugt, das entspricht im betrachteten Jahr 2020 1 777.3 MWh. Da wärmegeführte BHKW-Anlagen aus wirtschaftlichen Gründen so ausgelegt werden, dass sie auch im Volllastbetrieb nur einen Teil des maximalen Heizenergiebedarfes der angeschlossenen Abnehmer decken, wird die benötigte Restwärme durch Spitzenlastkessel erzeugt (Abschnitt 6.7.1). Der durch Spitzenlastkessel abgedeckte Endenergiebedarf wurde bestimmt als Anteil bezogen auf den zuvor bestimmten, durch BHKW abgedeckten Endenergiebedarf. Der Anteil ergibt sich nach Abschnitt 6.7.1 aus der Annahme, dass ein BHKW über ein Jahr etwa 70 % des Endenergiebedarfs abdeckt und ein Spitzenlastkessel die restlichen 30 %. Er beträgt damit 42.9%. Im Beispiel ergibt sich daraus, dass im Untersuchungsgebiet ein Endenergiebedarf von 761.7 MWh durch Spitzenlastkessel abgedeckt wird. Der restliche Endenergiebedarf im Untersuchungsgebiet von 175 189.5 MWh wird weiterhin je nach Szenario durch Gas- bzw. Ölheizkessel gedeckt.

Tabelle 6-11: Aufteilung des Endenergiebedarfs nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)

	Endenergiebedarf [MWh/a]
Endenergiebedarf durch BHKW gedeckt	1 777.3
Endenergiebedarf Spitzenlast durch Gaskessel gedeckt	761.7
Endenergiebedarf durch Gas-/Ölkessel gedeckt	175 189.5
Summe	177 728.5

Im nächsten Schritt wurde zunächst der durch BHKW gedeckte Endenergiebedarf auf die Leistungsklassen der BHKW verteilt. Im Beispiel für Szenario 1a entspricht dies der Verteilung A aus Tabelle 5-32. Dann wurde für BHKW, Spitzenlastkessel sowie die durch BHKW und Spitzenlastkessel ersetzten Gas- bzw. Ölheizkessel analog zu Abschnitt 5.3.1 und Abschnitt 5.3.3 der jeweilige Erdgaseinsatz bestimmt (Tabelle 6-12). Dabei wurde davon ausgegangen, dass Spitzenlastkessel ausschließlich Gasheizkessel sind. In Tabelle 6-12 ebenfalls angegeben ist aus informativen Gründen der Erdgaseinsatz der Gas- bzw. Ölheizkessel, die den restlichen Endenergiebedarf im Untersuchungsgebiet decken. Diese Werte werden im weiteren Verlauf des Projekts nicht mehr verwendet.

Tabelle 6-12: Bestimmung des Erdgaseinsatzes nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)

	Summe	< 2 kW	2-10 kW	10-20 kW	20-50 kW
Endenergiebedarf durch BHKW gedeckt [MWh/a]	1 777.3	53.4	364.5	654.6	704.8
Erdgaseinsatz BHKW [MWh/a]	2 680.1	89.0	607.4	918.1	1 065.6
Erdgaseinsatz Gasheizung Spitzenlast [MWh/a]	846.3				
Erdgaseinsatz Gas-/Ölheizung, die durch BHKW+Spitzenlastkessel ersetzt wird [MWh/a]	2 821.1				

	Summe	< 2 kW	2-10 kW	10-20 kW	20-50 kW
Erdgaseinsatz Gas-/Ölheizung [MWh/a]	194 655.0				

Sind die Brennstoffeinsätze der einzelnen Energieerzeuger bekannt, können daraus unter Verwendung der Emissionsfaktoren aus Abschnitt 5.3 die Emissionen berechnet werden. Tabelle 6-13 gibt beispielhaft die berechneten Emissionen für das Untersuchungsgebiet Berlin im Szenario 1a an. Die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau auf lokaler Ebene bestimmen sich dabei aus der Summe der Emissionen von BHKW und Spitzenlastkesseln abzüglich der vermiedenen Emissionen der durch BHKW und Spitzenlastkessel ersetzten Gas- bzw. Ölheizkessel.

In Tabelle 6-13 ebenfalls angegeben sind aus informativen Gründen die Emissionen der Gas- bzw. Ölheizkessel, die im Beispiel-Szenario 1a den restlichen Endenergiebedarf im Untersuchungsgebiet decken. Diese Werte werden im weiteren Verlauf des Projekts nicht mehr verwendet.

Tabelle 6-13: Berechnung der Emissionen nach Art der Erzeugung am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin für Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt)

	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
BHKW-Emissionen	878.0	0.0	0.0	0.0	61.7
Emissionen Spitzenlastkessel	82.9	1.5	0.9	0.9	2.0
vermiedene Emissionen Gas-/Ölkessel	276.2	5.1	3.0	3.0	6.8
BHKW-bedingte Emissionsänderung	684.6	-3.6	-2.1	-2.1	57.0
durch restliche Gas-/Ölkessel erzeugte Emissionen	19 060.6	350.4	210.2	210.2	469.5

6.5.2 BHKW-Emissionen

Die Emissionen der Mini-BHKW wurden entsprechend der in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Vorgehensweise für alle 16 Szenarien aus Abbildung 5-46 für die drei Untersuchungsgebiete Berlin, Bremen und Köln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-14 bis Tabelle 6-16 aufgeführt.

Die Emissionsmengen der BHKW in den Untersuchungsgebieten sind abhängig von der Anzahl BHKW (Minimal- oder Maximalszenario sowie Anteil am Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet, der durch BHKW gedeckt wird) und von den Emissionsfaktoren der BHKW (hoch oder niedrig). Die Emissionsmengen unterscheiden sich nicht für Szenarien, die sich nur hinsichtlich des Brennstoffes bei den vermiedenen Emissionen unterscheiden (Gas oder Öl).

Die Emissionsmengen für SO₂, PM10 und PM2.5 sind Null, weil gemäß den Vorgaben in Abschnitt 5.3.1 für BHKW nur NO_x- und NMVOC-Emissionen betrachtet wurden.

Tabelle 6-14: Modellgebiet Berlin, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	878.0	0.0	0.0	0.0	61.7
		1b	1 769.4	0.0	0.0	0.0	124.4
	Öl	2a	878.0	0.0	0.0	0.0	61.7
		2b	1 769.4	0.0	0.0	0.0	124.4
niedrig	Gas	3a	301.5	0.0	0.0	0.0	30.9
		3b	607.6	0.0	0.0	0.0	62.2
	Öl	4a	301.5	0.0	0.0	0.0	30.9
		4b	607.6	0.0	0.0	0.0	62.2
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	3 512.0	0.0	0.0	0.0	247.0
		5b	7 077.5	0.0	0.0	0.0	497.8
	Öl	6a	3 512.0	0.0	0.0	0.0	247.0
		6b	7 077.5	0.0	0.0	0.0	497.8
niedrig	Gas	7a	1 206.0	0.0	0.0	0.0	123.5
		7b	2 430.5	0.0	0.0	0.0	248.9
	Öl	8a	1 206.0	0.0	0.0	0.0	123.5
		8b	2 430.5	0.0	0.0	0.0	248.9

Tabelle 6-15: Modellgebiet Bremen, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	696.8	0.0	0.0	0.0	49.0
		1b	1404.1	0.0	0.0	0.0	98.8
	Öl	2a	696.8	0.0	0.0	0.0	49.0
		2b	1404.1	0.0	0.0	0.0	98.8
niedrig	Gas	3a	239.3	0.0	0.0	0.0	24.5
		3b	482.2	0.0	0.0	0.0	49.4
	Öl	4a	239.3	0.0	0.0	0.0	24.5
		4b	482.2	0.0	0.0	0.0	49.4
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	2 787.0	0.0	0.0	0.0	196.0
		5b	5 616.5	0.0	0.0	0.0	395.0
	Öl	6a	2 787.0	0.0	0.0	0.0	196.0
		6b	5 616.5	0.0	0.0	0.0	395.0
niedrig	Gas	7a	957.1	0.0	0.0	0.0	98.0
		7b	1 928.7	0.0	0.0	0.0	197.5

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
	Öl	8a	957.1	0.0	0.0	0.0	98.0
		8b	1 928.7	0.0	0.0	0.0	197.5

Tabelle 6-16: Modellgebiet Köln, durch BHKW im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	499.2	0.0	0.0	0.0	35.1
		1b	1 006.1	0.0	0.0	0.0	70.8
	Öl	2a	499.2	0.0	0.0	0.0	35.1
		2b	1 006.1	0.0	0.0	0.0	70.8
niedrig	Gas	3a	171.4	0.0	0.0	0.0	17.6
		3b	345.5	0.0	0.0	0.0	35.4
	Öl	4a	171.4	0.0	0.0	0.0	17.6
		4b	345.5	0.0	0.0	0.0	35.4
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	1 996.9	0.0	0.0	0.0	140.4
		5b	4 024.3	0.0	0.0	0.0	283.0
	Öl	6a	1 996.9	0.0	0.0	0.0	140.4
		6b	4 024.3	0.0	0.0	0.0	283.0
niedrig	Gas	7a	685.8	0.0	0.0	0.0	70.2
		7b	1 382.0	0.0	0.0	0.0	141.5
	Öl	8a	685.8	0.0	0.0	0.0	70.2
		8b	1 382.0	0.0	0.0	0.0	141.5

6.5.3 Emissionen der Spitzenlastkessel

Die Emissionen der Spitzenlastkessel wurden entsprechend der in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Vorgehensweise für alle 16 Szenarien aus Abbildung 5-46 für die drei Untersuchungsgebiete Berlin, Bremen und Köln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-17 bis Tabelle 6-19 aufgeführt.

Die Emissionsmengen der Spitzenlastkessel wurden anteilig über den durch BHKW abgedeckten Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet bestimmt und sind damit abhängig von der Anzahl BHKW (Minimal- oder Maximalszenario sowie Anteil am Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet, der durch BHKW gedeckt wird) im Untersuchungsgebiet. Da es sich bei den Spitzenlastkesseln durchweg um Gasheizkessel handelt, unterscheiden sich die Emissionsmengen nicht für Szenarien, die sich hinsichtlich der Emissionsfaktoren der BHKW (hoch oder niedrig) oder des Brennstoffes bei den vermiedenen Emissionen unterscheiden (Gas oder Öl).

Tabelle 6-17: Modellgebiet Berlin, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	82.9	1.5	0.9	0.9	2.0
		1b	165.7	3.0	1.8	1.8	4.1
	Öl	2a	82.9	1.5	0.9	0.9	2.0
		2b	165.7	3.0	1.8	1.8	4.1
niedrig	Gas	3a	82.9	1.5	0.9	0.9	2.0
		3b	165.7	3.0	1.8	1.8	4.1
	Öl	4a	82.9	1.5	0.9	0.9	2.0
		4b	165.7	3.0	1.8	1.8	4.1
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	331.5	6.1	3.7	3.7	8.2
		5b	663.0	12.2	7.3	7.3	16.3
	Öl	6a	331.5	6.1	3.7	3.7	8.2
		6b	663.0	12.2	7.3	7.3	16.3
niedrig	Gas	7a	331.5	6.1	3.7	3.7	8.2
		7b	663.0	12.2	7.3	7.3	16.3
	Öl	8a	331.5	6.1	3.7	3.7	8.2
		8b	663.0	12.2	7.3	7.3	16.3

Tabelle 6-18: Modellgebiet Bremen, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	65.8	1.2	0.7	0.7	1.6
		1b	131.5	2.4	1.5	1.5	3.2
	Öl	2a	65.8	1.2	0.7	0.7	1.6
		2b	131.5	2.4	1.5	1.5	3.2
niedrig	Gas	3a	65.8	1.2	0.7	0.7	1.6
		3b	131.5	2.4	1.5	1.5	3.2
	Öl	4a	65.8	1.2	0.7	0.7	1.6
		4b	131.5	2.4	1.5	1.5	3.2
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	263.1	4.8	2.9	2.9	6.5
		5b	526.1	9.7	5.8	5.8	13.0
	Öl	6a	263.1	4.8	2.9	2.9	6.5
		6b	526.1	9.7	5.8	5.8	13.0
niedrig	Gas	7a	263.1	4.8	2.9	2.9	6.5

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
		7b	526.1	9.7	5.8	5.8	13.0
	Öl	8a	263.1	4.8	2.9	2.9	6.5
		8b	526.1	9.7	5.8	5.8	13.0

Tabelle 6-19: Modellgebiet Köln, durch Spitzenlastkessel im Untersuchungsgebiet erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	47.1	0.9	0.5	0.5	1.2
		1b	94.2	1.7	1.0	1.0	2.3
	Öl	2a	47.1	0.9	0.5	0.5	1.2
		2b	94.2	1.7	1.0	1.0	2.3
niedrig	Gas	3a	47.1	0.9	0.5	0.5	1.2
		3b	94.2	1.7	1.0	1.0	2.3
	Öl	4a	47.1	0.9	0.5	0.5	1.2
		4b	94.2	1.7	1.0	1.0	2.3
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	188.5	3.5	2.1	2.1	4.6
		5b	377.0	6.9	4.2	4.2	9.3
	Öl	6a	188.5	3.5	2.1	2.1	4.6
		6b	377.0	6.9	4.2	4.2	9.3
niedrig	Gas	7a	188.5	3.5	2.1	2.1	4.6
		7b	377.0	6.9	4.2	4.2	9.3
	Öl	8a	188.5	3.5	2.1	2.1	4.6
		8b	377.0	6.9	4.2	4.2	9.3

6.5.4 Vermiedene Emissionen

Die Emissionen der durch BHKW und Spitzenlastkessel ersetzten Gas- bzw. Ölheizkessel („vermiedene Emissionen“) wurden entsprechend der in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Vorgehensweise für alle 16 Szenarien aus Abbildung 5-46 für die drei Untersuchungsgebiete Berlin, Bremen und Köln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-20 bis Tabelle 6-22 aufgeführt.

Die Mengen der vermiedenen Emissionen in den Untersuchungsgebieten sind abhängig von der Anzahl BHKW (Minimal- oder Maximalszenario sowie Anteil am Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet, der durch BHKW gedeckt wird) und vom Brennstoff der durch BHKW und Spitzenlastkessel ersetzten Heizkessel (Gas oder Öl). Die Emissionsmengen unterscheiden sich nicht für Szenarien, die sich hinsichtlich der Emissionsfaktoren der BHKW unterscheiden.

Tabelle 6-20: Modellgebiet Berlin, durch Gas- /Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	276.2	5.1	3.0	3.0	6.8
		1b	552.5	10.2	6.1	6.1	13.6
	Öl	2a	469.4	640.3	14.1	14.1	18.0
		2b	938.8	1 280.5	28.2	28.2	35.9
niedrig	Gas	3a	276.2	5.1	3.0	3.0	6.8
		3b	552.5	10.2	6.1	6.1	13.6
	Öl	4a	469.4	640.3	14.1	14.1	18.0
		4b	938.8	1 280.5	28.2	28.2	35.9
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	1 105.0	20.3	12.2	12.2	27.2
		5b	2 209.9	40.6	24.4	24.4	54.4
	Öl	6a	1 877.5	2 561.0	56.3	56.3	71.8
		6b	3 755.1	5 122.0	112.7	112.7	143.7
niedrig	Gas	7a	1 105.0	20.3	12.2	12.2	27.2
		7b	2 209.9	40.6	24.4	24.4	54.4
	Öl	8a	1 877.5	2 561.0	56.3	56.3	71.8
		8b	3 755.1	5 122.0	112.7	112.7	143.7

Tabelle 6-21: Modellgebiet Bremen, durch Gas-/Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NM VOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	219.2	4.0	2.4	2.4	5.4
		1b	438.4	8.1	4.8	4.8	10.8
	Öl	2a	372.5	508.1	11.2	11.2	14.3
		2b	745.0	1 016.2	22.4	22.4	28.5
niedrig	Gas	3a	219.2	4.0	2.4	2.4	5.4
		3b	438.4	8.1	4.8	4.8	10.8
	Öl	4a	372.5	508.1	11.2	11.2	14.3
		4b	745.0	1 016.2	22.4	22.4	28.5
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	876.9	16.1	9.7	9.7	21.6
		5b	1 753.7	32.2	19.3	19.3	43.2
	Öl	6a	1 489.9	2 032.3	44.7	44.7	57.0
		6b	2 979.9	4 064.7	89.4	89.4	114.0

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
niedrig	Gas	7a	876.9	16.1	9.7	9.7	21.6
		7b	1 753.7	32.2	19.3	19.3	43.2
	Öl	8a	1 489.9	2 032.3	44.7	44.7	57.0
		8b	2 979.9	4 064.7	89.4	89.4	114.0

Tabelle 6-22: Modellgebiet Köln, durch Gas-/Ölheizkessel im Untersuchungsgebiet nicht mehr erzeugte Emissionen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	157.1	2.9	1.7	1.7	3.9
		1b	314.1	5.8	3.5	3.5	7.7
	Öl	2a	266.9	364.0	8.0	8.0	10.2
		2b	533.8	728.1	16.0	16.0	20.4
niedrig	Gas	3a	157.1	2.9	1.7	1.7	3.9
		3b	314.1	5.8	3.5	3.5	7.7
	Öl	4a	266.9	364.0	8.0	8.0	10.2
		4b	533.8	728.1	16.0	16.0	20.4
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	628.3	11.5	6.9	6.9	15.5
		5b	1 256.6	23.1	13.9	13.9	31.0
	Öl	6a	1 067.6	1 456.2	32.0	32.0	40.8
		6b	2 135.1	2 912.4	64.1	64.1	81.7
niedrig	Gas	7a	628.3	11.5	6.9	6.9	15.5
		7b	1 256.6	23.1	13.9	13.9	31.0
	Öl	8a	1 067.6	1 456.2	32.0	32.0	40.8
		8b	2 135.1	2 912.4	64.1	64.1	81.7

6.5.5 Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau

Die durch den Einsatz von Mini-BHKW bedingten Emissionsänderungen als Summe der Emissionen aus BHKW (Abschnitt 6.5.2) und Spitzenlastkesseln (Abschnitt 6.5.3) abzüglich der vermiedenen Emissionen (Abschnitt 6.5.4) wurden entsprechend der in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Vorgehensweise für alle 16 Szenarien aus Abbildung 5-46 für die drei Untersuchungsgebiete Berlin, Bremen und Köln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-23 bis Tabelle 6-25 aufgeführt.

Da die BHKW-Emissionsmengen für SO₂, PM10 und PM2.5 Null sind (Abschnitt 6.5.2), ergeben sich für diese drei Stoffe durchweg Emissionsminderungen.

Tabelle 6-23: Modellgebiet Berlin, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	684.6	-3.6	-2.1	-2.1	57.0
		1b	1 382.6	-7.1	-4.3	-4.3	114.9
	Öl	2a	491.5	-638.7	-13.2	-13.2	45.8
		2b	996.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	92.6
niedrig	Gas	3a	108.1	-3.6	-2.1	-2.1	26.1
		3b	220.9	-7.1	-4.3	-4.3	52.7
	Öl	4a	-85.0	-638.7	-13.2	-13.2	15.0
		4b	-165.4	-1 277.5	-26.3	-26.3	30.4
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	2 738.5	-14.2	-8.5	-8.5	227.9
		5b	5 530.5	-28.4	-17.1	-17.1	459.7
	Öl	6a	1 966.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	183.3
		6b	3 985.4	-5 109.8	-105.4	-105.4	370.4
niedrig	Gas	7a	432.6	-14.2	-8.5	-8.5	104.4
		7b	883.5	-28.4	-17.1	-17.1	210.8
	Öl	8a	-340.0	-2 554.9	-52.7	-52.7	59.8
		8b	-661.6	-5 109.8	-105.4	-105.4	121.5

Tabelle 6-24: Modellgebiet Bremen, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	543.3	-2.8	-1.7	-1.7	45.2
		1b	1 097.2	-5.6	-3.4	-3.4	91.2
	Öl	2a	390.0	-506.9	-10.5	-10.5	36.4
		2b	790.7	-1 013.7	-20.9	-20.9	73.5
niedrig	Gas	3a	85.8	-2.8	-1.7	-1.7	20.7
		3b	175.3	-5.6	-3.4	-3.4	41.8
	Öl	4a	-67.5	-506.9	-10.5	-10.5	11.9
		4b	-131.3	-1 013.7	-20.9	-20.9	24.1
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	2 173.2	-11.3	-6.8	-6.8	180.9
		5b	4 388.9	-22.6	-13.5	-13.5	364.8
	Öl	6a	1 560.1	-2 027.5	-41.8	-41.8	145.5
		6b	3 162.7	-4 055.0	-83.6	-83.6	294.0

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
niedrig	Gas	7a	343.3	-11.3	-6.8	-6.8	82.9
		7b	701.1	-22.6	-13.5	-13.5	167.3
	Öl	8a	-269.8	-2 027.5	-41.8	-41.8	47.5
		8b	-525.0	-4 055.0	-83.6	-83.6	96.5

Tabelle 6-25: Modellgebiet Köln, Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Untersuchungsgebiet

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	389.3	-2.0	-1.2	-1.2	32.4
		1b	786.2	-4.0	-2.4	-2.4	65.3
	Öl	2a	279.5	-363.2	-7.5	-7.5	26.1
		2b	566.5	-726.4	-15.0	-15.0	52.7
niedrig	Gas	3a	61.5	-2.0	-1.2	-1.2	14.8
		3b	125.6	-4.0	-2.4	-2.4	30.0
	Öl	4a	-48.3	-363.2	-7.5	-7.5	8.5
		4b	-94.0	-726.4	-15.0	-15.0	17.3
Maximalszenario							
hoch	Gas	5a	1 557.1	-8.1	-4.9	-4.9	129.6
		5b	3 144.7	-16.2	-9.7	-9.7	261.4
	Öl	6a	1 117.8	-1 452.7	-30.0	-30.0	104.2
		6b	2 266.1	-2 905.4	-59.9	-59.9	210.6
niedrig	Gas	7a	246.0	-8.1	-4.9	-4.9	59.4
		7b	502.4	-16.2	-9.7	-9.7	119.8
	Öl	8a	-193.3	-1 452.7	-30.0	-30.0	34.0
		8b	-376.2	-2 905.4	-59.9	-59.9	69.1

6.6 Abschätzung des Anteils der direkten NO₂-Emissionen

Auf Anfrage wurden von maßgeblichen Herstellern keine Messwerte für NO₂ von Mini-BHKWs zur Verfügung gestellt.

Es liegt nur eine Messreihe der Fachhochschule Nürtingen² für das Modul EC-Power XRG1 15 vor (vgl. Tabelle 6-26).

Tabelle 6-26: Konzentrationen von Stickoxiden im Abgas Modul EC-Power XRG1 15 (Messreihe der Fachhochschule Nürtingen)

Datum der Messung		16.12. 2008	16.12. 2008	16.12. 2008	16.12. 2008	16.12. 2008	16.12. 2008	16.12. 2008	18.12. 2008
Abgas-temperatur	°C	51.3	50.7	49.5	47.4	46.9	46.6	45.5	50.6
Last	kW _{el}	15.0	13.5	12.5	11.0	9.5	8.0	6.5	15.0
NO	ppm	106.9	57.8	41.3	40.7	48.5	85.3	193.2	157.6
NO ₂	ppm	25.5	20.5	18.2	16.7	16.5	19.2	22.2	27.9
NO _x	ppm	132.4	78.1	59.4	57.4	65.0	104.6	220.9	185.5
NO ₂ /NO _x		19 %	26 %	31 %	29%	25 %	18 %	10 %	15 %

Danach liegen je nach modulierter elektrischer Leistung die NO₂-Werte zwischen 10 % und 31 % der NO_x-Werte. Bei Volllast (maximale elektrische Leistung, hier 15 kW) liegen die NO₂-Werte zwischen 15 % und 19 %.

6.7 Erstellung von Jahresganglinien für die BHKW-Emissionen

6.7.1 Methodik

Da zu den Gebäudedaten der Modellgebiete nur die Bruttogrundflächen vorlagen, ließen sich keine sinnvollen Modellgebäude ableiten, die die Modellgebiete hätten repräsentieren können. Deshalb wurde auf eine dynamische thermische Gebäudesimulation verzichtet, für die Gebäudedaten wie U-Werte, Fensterflächen und Orientierung etc. hätten vorliegen müssen. Da auch das Gebäudealter nicht zur Verfügung stand, konnte auch nicht auf die entsprechenden Werte der Gebäudetypologie Deutschland (IWU, 2015) zurückgegriffen werden.

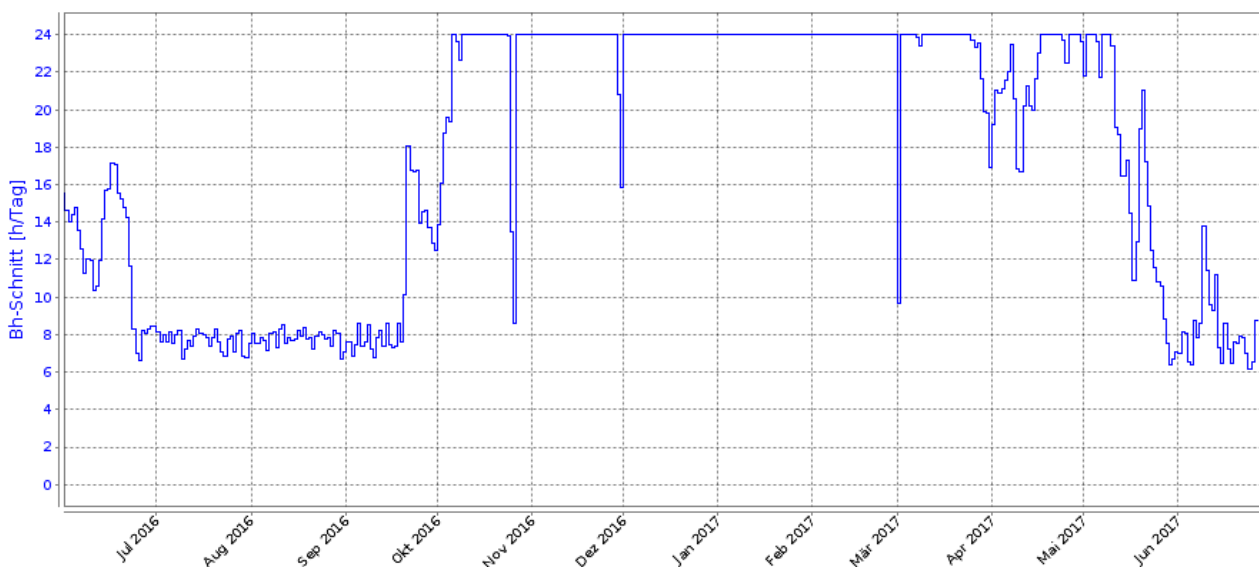
Das von solares bauen GmbH mit dem Auftraggeber abgestimmte Verfahren zur Bestimmung des für die Immissionsmodellierung in Abschnitt 8 notwendigen durchschnittlichen Jahresgangs des Wärmebedarfs verteilt die Summe des Wärmebedarfs aller Gebäude des jeweiligen Modellgebiets nach Heizgradstunden des meteorologischen Bezugsjahrs 2010. Die Heizgradstunden wurden aus der Temperaturzeitreihe der jeweiligen Messstation (Abschnitt 6.3) errechnet.

Üblicherweise wird die Leistung einer wärmegeführten BHKW-Anlage aus wirtschaftlichen Gründen so ausgelegt, dass sie auch im Volllastbetrieb nur einen Teil des maximalen Heizenergiebedarfes der

² Für das Projekt zur Verfügung gestellt von Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas, Wissenschaftlicher Leiter RRI, Fakultät Technik/Maschinenbau, Hochschule Reutlingen, Messgerät Testo 1350 XL

angeschlossenen Abnehmer deckt, die benötigte Restwärme liefert ein Spitzenlastkessel. Der Anteil des BHKW an der Deckung des Wärmebedarfs liegt in den meisten Fällen zwischen 50 - 100%. Da es hierzu keinen statistisch erhobenen Mittelwert gibt, wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass für die Ermittlung der Jahresgänge ein Anteil des BHKW in Höhe von 70 % und des Spitzenlastkessels in Höhe von 30 % angenommen wird. Abbildung 6-9 zeigt beispielhaft die Jahresganglinie eines BHKW, das über ein Jahr etwa 70 % des Wärmebedarfs abdeckt. In den Monaten November bis April läuft das BHKW bis zu 24 Stunden am Tag durch, und die Emissionen des BHKWs verteilen sich in dieser Zeit nahezu gleichmäßig über den Tag. Der Spitzenlastkessel erzeugt die „Restwärme“, sobald der Wärmebedarf die Wärmeerzeugung aus dem BHKW übersteigt, entsprechend verteilen sich die Emissionen des Spitzenlastkessels.

Abbildung 6-9: Beispiel für die Betriebsstunden (Bh) pro Tag eines typisch ausgelegten BHKWs, das etwa 70 % der Wärmemenge eines Gebäudes erzeugt



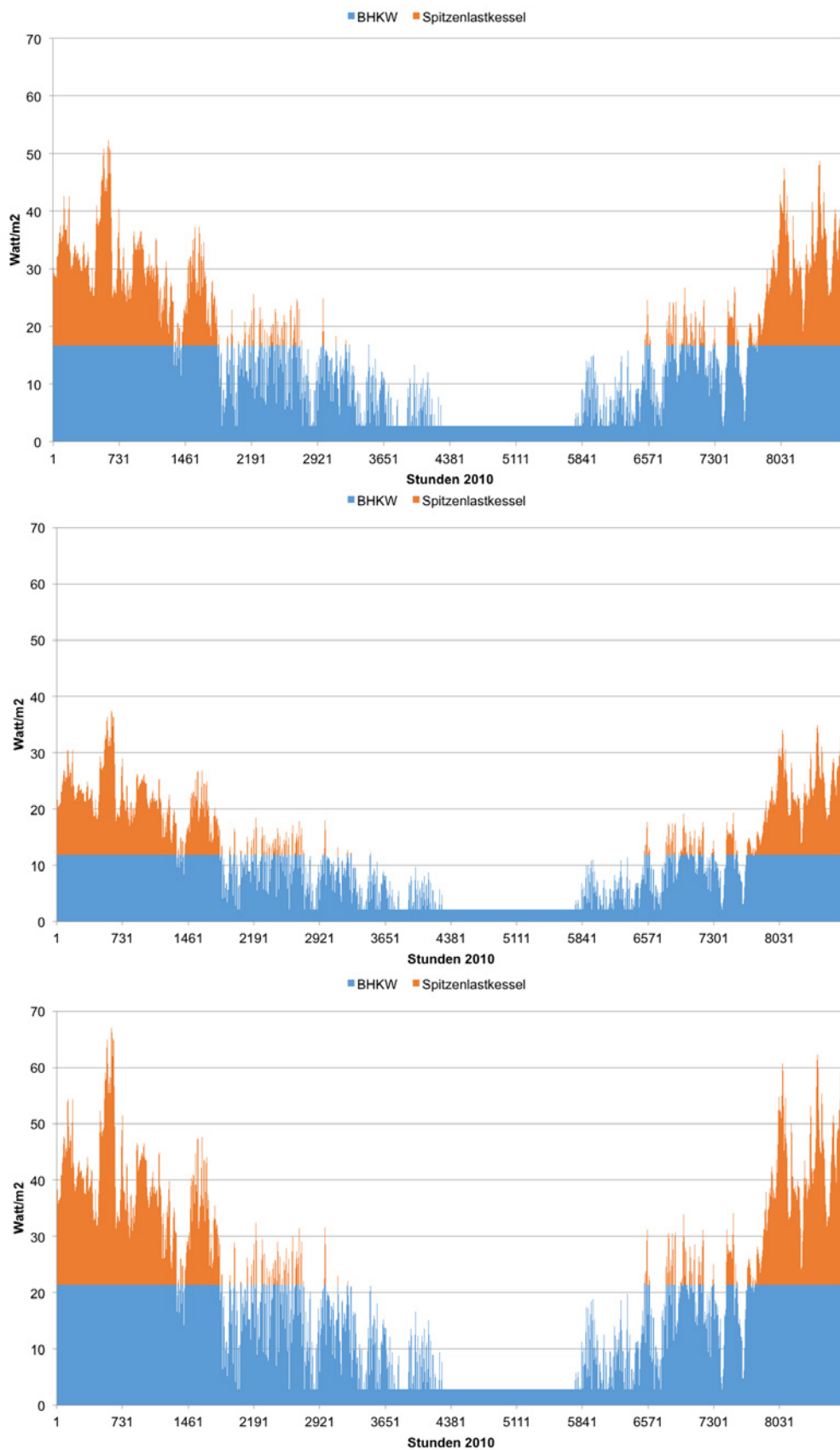
Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Um das Verfahren zu plausibilisieren, wurde gemäß Abschnitt 6.7.3 eine Jahresganglinie mittels dynamischer thermischer Gebäudesimulation für das Untersuchungsgebiet Köln für ein fiktives „1-Zonen-Gebäude“ erstellt, welches hinsichtlich der Gebäudegröße dem Mittelwert aller Gebäude im Untersuchungsgebiet Köln entspricht, und mit der gemäß Abschnitt 6.7.2 über die Heizgradstunden ermittelten Jahresganglinie von Köln verglichen.

6.7.2 Ergebnisse

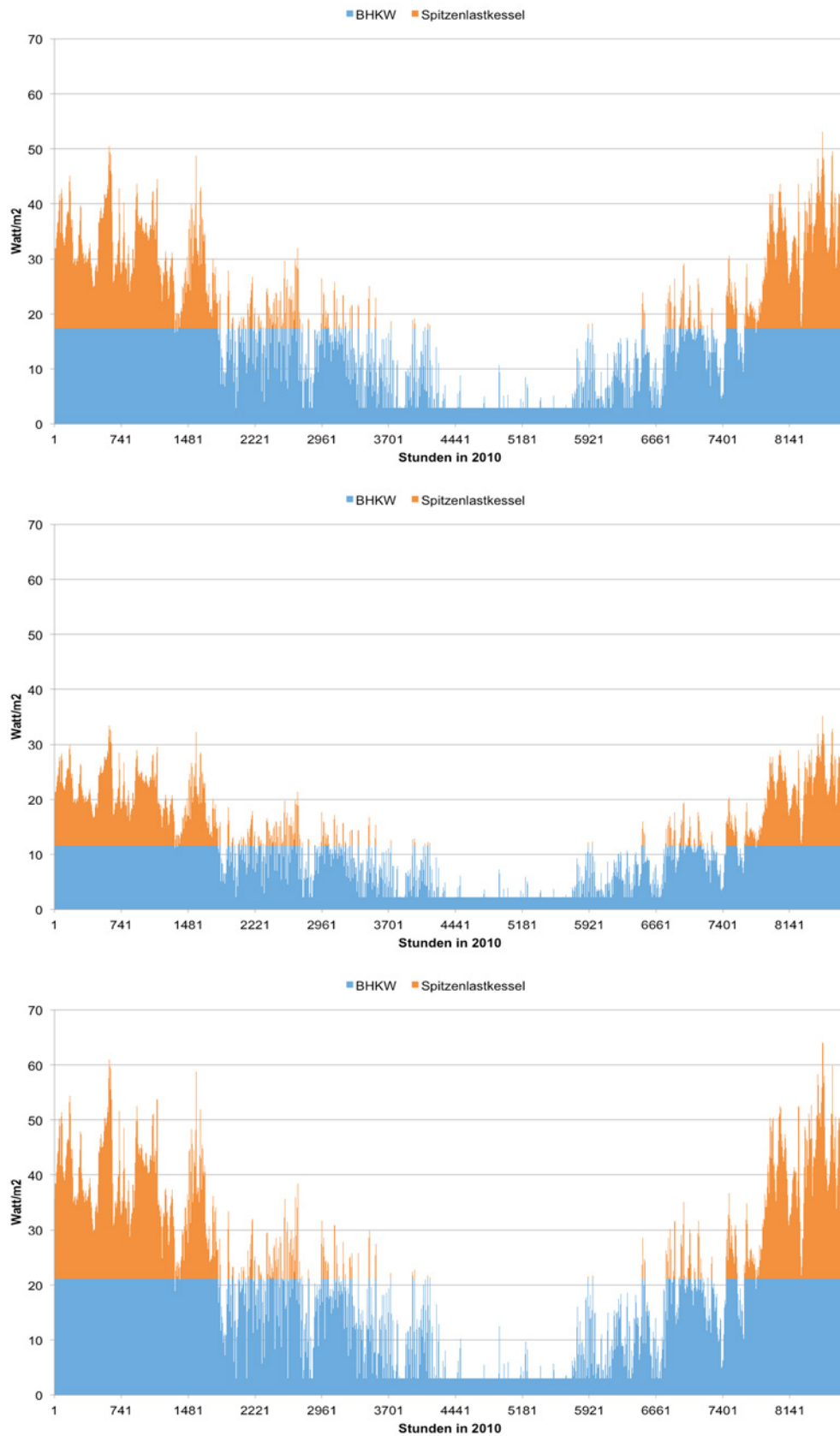
Nach dem in Abschnitt 6.7.1 dargestellten Verfahren ergeben sich folgende Jahresganglinien des Wärmebedarfs für die Gebäude in den Untersuchungsgebieten der drei Modellgebiete, je nach Energiestandard der Gebäude (Mittelwert, untere Abschätzung, obere Abschätzung) und aufgeteilt nach BHKW und Spitzenlastkessel (Abbildung 6-10 bis Abbildung 6-12).

Abbildung 6-10: Jahresganglinie für Modellgebiet Berlin gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten)



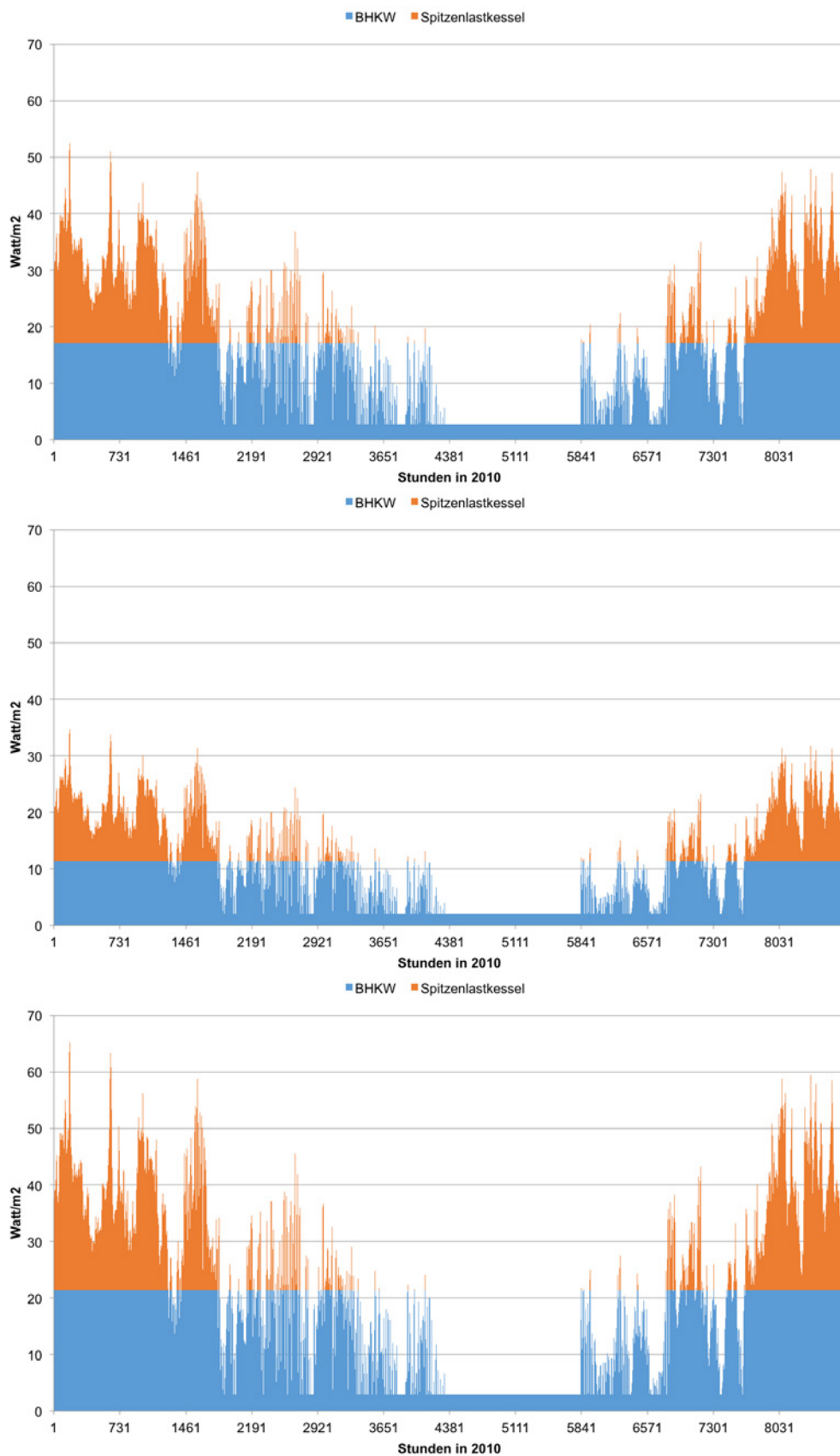
Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Abbildung 6-11: Jahresganglinie für Modellgebiet Bremen gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Abbildung 6-12: Jahresganglinie für Modellgebiet Köln gemäß Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) für die Energiestandards Mittelwert (oben), untere Abschätzung (Mitte), obere Abschätzung (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

6.7.3 Vergleich mit den Ergebnissen einer thermischen Simulation

Um abschätzen zu können, in welcher Größenordnung sich die Abweichungen der in Abschnitt 6.7.2 dargestellten Jahresganglinien auf der Grundlage von Heizgradstunden im Vergleich zu realen Gebäuden bewegen, wurde vergleichend eine dynamische Gebäudesimulation mittels des Programms TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program) durchgeführt. Mit TRNSYS wurde die Jahresganglinie des Wärmebedarfs (BHKW + Spitzenlastkessel) für ein Wohngebäude im Untersuchungsgebiet Köln ermittelt.

Entsprechend der Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde ein Heizwärmebedarfswert (Endenergiebedarf durch Heizung) anhand der Ergebnisse der allgemeinen statistischen Auswertung der Gebäudegröße als Ansatz gewählt (Abschnitt 6.4).

Aufbauend auf dieser Datengrundlage wurde mittels dynamischer Gebäudesimulation (TRNSYS) ein fiktives „1-Zonen-Gebäude“ erstellt, welches hinsichtlich der Gebäudegröße dem Mittelwert aller 1532 Gebäude des Modellgebiets entspricht:

- Nettogrundfläche: 495 m²
- 3-geschossig
- Geschosshöhe = 3.0 m

Als Grundlage für die Geometrie wurde ein Mehrfamilienhaus mit Ost-West Ausrichtung und angrenzendem Gebäude auf der Nordseite genommen (Tabelle 6-27).

Tabelle 6-27: Geometriedaten des simulierten Gebäudes

Bauteil	Fläche [m ²]
Außenbauteile	
Bodenplatte gegen unbeheizten Keller	187
Dach (30° Neigung)	215
Außenwand Ost und West	jeweils 138
Außenwand Süd	127
Außenwand Nord (für Energiestandards „Mittelwert“ und „untere Abschätzung“ als Wand gegen Nachbarhaus berechnet, für Energiestandard „obere Abschätzung“ als Wand nach außen)	127
Innenbauteile	
Geschossdecke	374
Massive Innenwände	468
Leichte Innenwände	468
Fenster	
Fenster West	34.5
Fenster Ost	22.5
Fenster Süd	10.5
Fenster Nord (nur im oberen Szenario)	10.0

Zur Bestimmung der Parameter der Simulation wurden Bauteile mit entsprechend fiktiven U-Werten und g-Werten sowie fiktive interne Wärmequellen mit entsprechendem Lüftungsverhalten angesetzt. Die Parameter wurden so gewählt, dass der statistisch bestimmte Heizwärmebedarfswert der drei

betrachteten Energiestandards „Mittelwert“, „untere Abschätzung“ und „obere Abschätzung“ erreicht wurde.

Die Randbedingungen sind in nachfolgend in Tabelle 6-28 zusammengefasst.

Tabelle 6-28: Bauphysikalische Eigenschaften des simulierten Gebäudes

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Außenwand	U = 0.39 W/m ² K (8 cm Dämmung)	U = 0.23 W/m ² K (18 cm Dämmung)	U = 0.44 W/m ² K (12 cm Dämmung)
Dach	U = 0.39 W/m ² K (14 cm Dämmung)	U = 0.23 W/m ² K (16 cm Dämmung)	U = 0.44 W/m ² K (12 cm Dämmung)
Boden gegen unbeheizten Keller (fx = 0,5)	U = 0.61 W/m ² K (6 cm Dämmung)	U = 0.33 W/m ² K (12 cm Dämmung)	U = 0.84 W/m ² K (4 cm Dämmung)
Fenster	U = 1.8 W/m ² K g = 60%	U = 1.4 W/m ² K g = 60%	U = 1.8 W/m ² K g = 60%
Winterliche Verschattung durch Nebengebäude	50%	50%	50%
Verluste Heizwärme/Endenergie	15%	10%	20%

Bezüglich des Nutzerverhaltens wurden folgende Parameter angenommen:

- Interne Wärmequelle: 2.1 W/m² konstant
- Soll-Wert Heizung: 20°C (keine Nachtabenkung)
- ein konstanter Luftwechsel von 0,5 h⁻¹ wird angenommen (Abluftanlage)

Als Klimadatensatz wurden die Daten des DWD für Köln für das Bezugsjahr 2010 aus Abschnitt 6.3 verwendet. Da für eine dynamische Simulation Strahlungsdaten als Stundenwerte zusätzlich notwendig sind, wurden aus Satellitendaten ermittelte Werte benutzt (Meteonorm-Datensatz der Firma Meteotest, Bern).

Der aus der Simulation resultierende Endenergiebedarf entspricht für die drei betrachteten Energiestandards weitgehend dem Heizwärmebedarfswert (Endenergiebedarf durch Heizung) aus der allgemeinen statistischen Auswertung in Abschnitt 6.4 mit einer maximalen Abweichung von 5 % an (Tabelle 6-29).

Tabelle 6-29: Ergebnisse der dynamischen Simulation

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Endenergiebedarf Simulation [kWh/(m ² *a)]	105.4	73.5	130.2
Endenergiebedarf laut Abschnitt 6.4 [kWh/m ² *a] (SOLL)	109.9	72.2	137.5
Abweichung	-4.1%	+1.9%	-5.2%

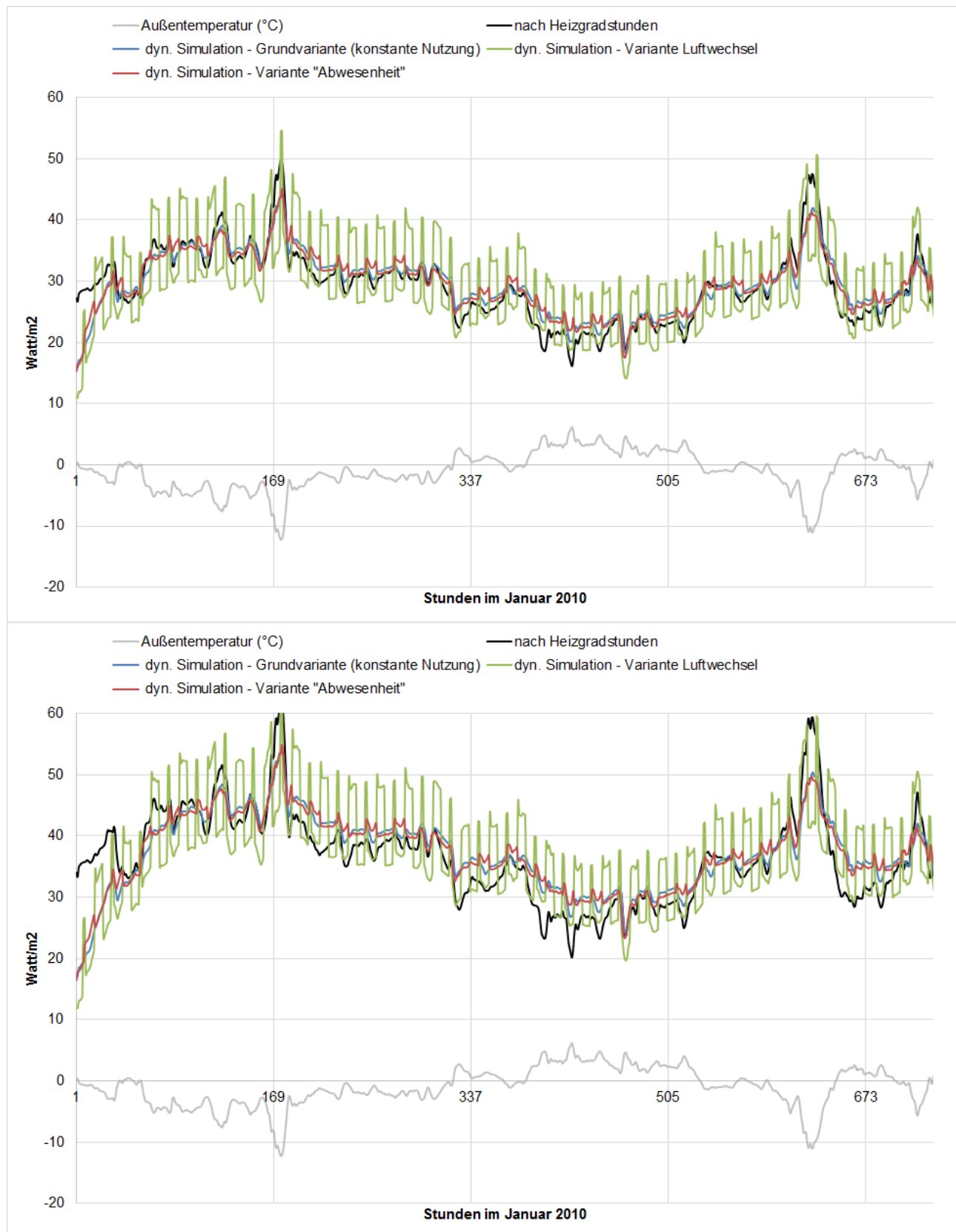
Die sich aus der dynamischen Simulation ergebenden Ganglinien wurden mit der mittels Verteilung nach Heizgradstunden (Außentemperaturen) bestimmten Jahresganglinie aus Abschnitt 6.4 verglichen. Parallel wurde ein Vergleich mit leicht veränderten dynamischen Simulationen geführt. Dabei wurden folgende Varianten betrachtet:

- „Luftwechsel“: statt das Gebäude konstant zu belüften ($\text{Luftwechsel} = 0.5 \text{ h}^{-1}$), wird eine variable Lüftung vorgesehen: von 7:00 Uhr bis 9:00 Uhr und von 17:00 Uhr bis 23:00 Uhr wird ein erhöhter Luftwechsel von 0.7 h^{-1} angenommen, in der restlichen Zeit ein reduzierter Luftwechsel von 0.3 h^{-1}
- „Abwesenheit tagsüber“: unter der Woche von 9:00 Uhr bis 17:00 Uhr werden reduzierte interne Lasten (0.8 W/m^2 statt 2.1 W/m^2) angesetzt, von 17:00 Uhr bis 9:00 Uhr und am Wochenende betragen die internen Lasten 2.5 W/m^2 .

Die Ergebnisse der Berechnungen werden im Folgenden exemplarisch für die Monate Januar und März 2010 verglichen (Abbildung 6-13, Abbildung 6-14). Eine Darstellung der Ganglinien für das ganze Jahr findet sich in Abbildung 6-16.

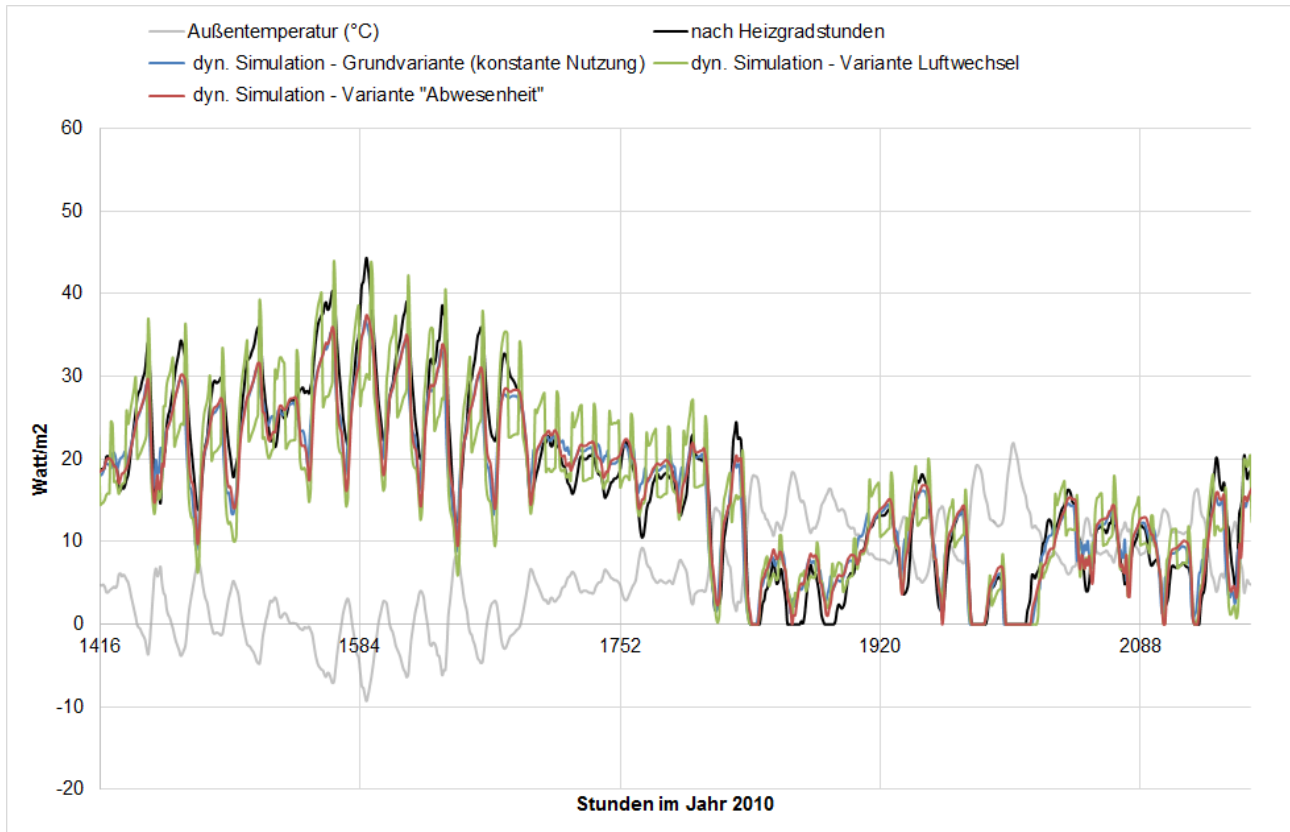
Im Monat Januar 2010 haben die Grundvariante der dynamischen Simulation und das Heizgradstunden-Verfahren einen sehr ähnlichen Verlauf. Bei der Variante mit einem unregelmäßigen Luftwechsel sind kurzfristige Schwankungen sichtbar, die eine deutlich höhere Abweichung zur Grundvariante darstellen. Eine Änderung in den Belegungszeiten des Gebäudes (Variante Abwesenheit) ergibt nur geringe Abweichungen zur Grundvariante (Abbildung 6-13, Mittelwert oben und obere Abschätzung unten). Im Monat März liegen die Ganglinien der Grundvariante der dynamischen Simulation, das Heizgradstunden-Verfahren sowie die Ganglinien der Varianten unregelmäßiger Luftwechsel und Belegungszeiten des Gebäudes noch näher beieinander (Abbildung 6-14).

Abbildung 6-13: Stündlicher Heizendenergiebedarf im Januar 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten des Nutzerverhaltens (oben: Mittelwert, unten: obere Abschätzung)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

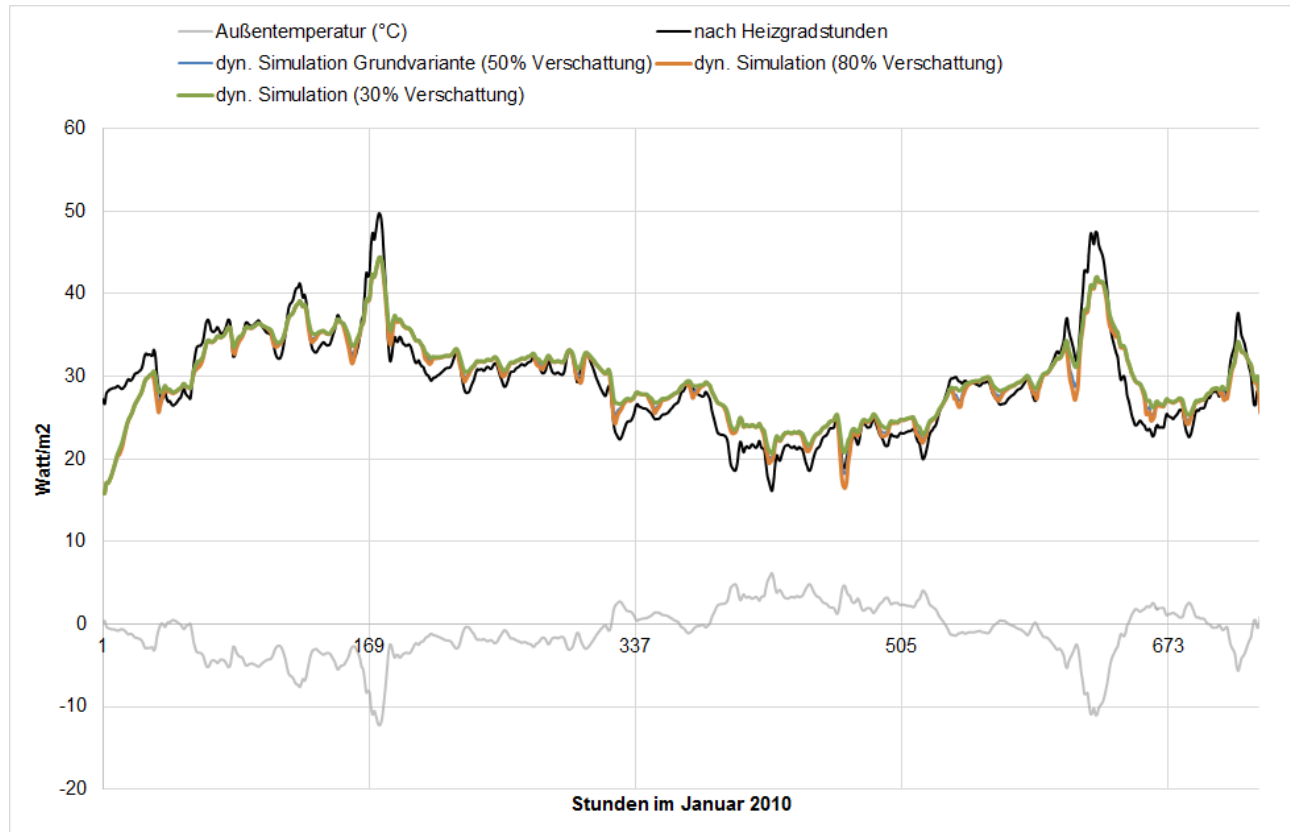
Abbildung 6-14: Stündlicher Heizendenergiebedarf im März 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten des Nutzerverhaltens (Mittelwert)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Zusätzlich wurden zwei Varianten mit veränderten Verschattungssituationen mit TRNSYS simuliert. Statt mit einem Verschattungsfaktor der Fenster von 50 % zu rechnen, wurde einerseits ein Faktor von 30 %, andererseits von 80 % verwendet. Eine Änderung der Verschattungssituation ergibt ebenfalls nur geringe Abweichungen der Ganglinien (Abbildung 6-15).

Abbildung 6-15: Stündlicher Heizendenergiebedarf im Januar 2010 für unterschiedliche Berechnungsmethoden und Varianten der Verschattungssituation (Mittelwert)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Folgende Ergebnisse können aus diesem Vergleich entnommen werden (Tabelle 6-30):

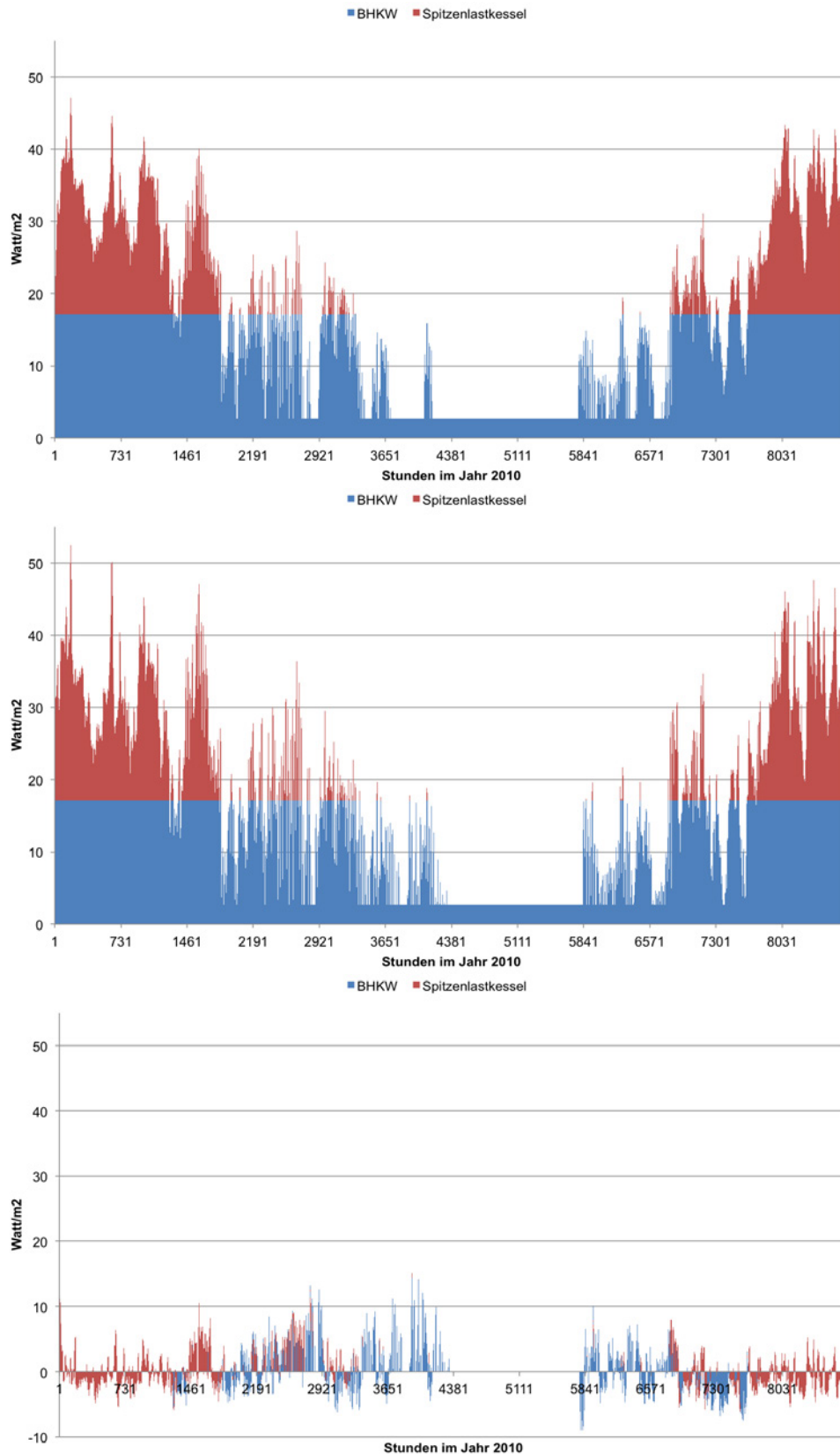
- Die Standardabweichung der Stundenwerte des Heizwärmebedarfs zwischen dem Heizgradstunden-Verfahren und der TRNSYS-Simulation liegt, je nach betrachtetem Energiestandard, zwischen 2.2 und 3.7 W/m².
- Die Standardabweichungen zwischen zwei dynamischen Gebäudesimulationen (z. B. Änderung des Lüftungsverhaltens) liegen schon höher als die Abweichung zwischen dynamischer Simulation und Heizgradstunden-Verfahren.

Tabelle 6-30: Standardabweichungen des stündlichen Heizendenergiebedarfs für unterschiedliche Berechnungsmethoden

	Mittelwert	untere Abschätzung	obere Abschätzung
Standardabweichung dynamische Simulation zu Heizgradstunden-Verfahren [W/m²]	2.6	2.2	3.7
Standardabweichung dynamische Simulation – Variante „Luftwechsel“ zu Grundvariante [W/m²]	3.5	3.1	3.7

In Abbildung 6-16 (unten) sind die geringen Abweichungen zwischen der Ganglinie mittels dynamischer Gebäudesimulation (Abbildung 6-16, oben) und der Ganglinie mittels Heizgradstunden-Verfahren (Abbildung 6-16, Mitte) für das ganze Jahr 2010 dargestellt.

Abbildung 6-16: Jahresganglinie der zwei Wärmeerzeuger (BHKW, Spitzenlastkessel) im Energiestandard „Mittelwert“ bei Verwendung der dynamischen Simulation (oben) und des Heizgradstunden-Verfahrens (Mitte) sowie Abweichung der Jahresganglinien des Heizgradstunden-Verfahrens im Vergleich zur dynamischen Simulation (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (solares bauen)

Als Ergebnis der durchgeführten Vergleichsrechnungen kann zusammengefasst werden, dass die Genauigkeit der Jahresganglinien mittels Heizgradstunden-Verfahren für die vorliegende Untersuchung der Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen völlig ausreichend ist.

6.8 Berechnung von typischen Straßenverkehrsemissionen für die Modellgebiete

Für die drei betrachteten Modellgebiete nach Abschnitt 6.1 wurden typische Emissionen des Straßenverkehrs für das Prognosejahr 2020 bestimmt. Die Emissionsberechnung wurde in allen drei Fällen mit dem Emissionsmodell IMMIS^{em} in der Version 6.0 (IVU Umwelt, 2015) durchgeführt, das auf dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) in der Version 3.2 (INFRAS, 2014) basiert.

Für das Modellgebiet Berlin wurde das in Abbildung 6-4 dargestellte Straßennetz berücksichtigt, das aus der Fortschreibung des Berliner Luftreinhalteplans 2009 – 2020 (IVU Umwelt, 2011a) entnommen wurde. Das Straßennetz bildet die Berliner Hauptstraßen ab. Die Kfz-Flottenzusammensetzung für Berlin wurde aus IVU Umwelt (2014b) für das Bezugsjahr 2020 übernommen. Dort wurde die Berliner Kfz-Flotte, die auf Informationen der Senatsverwaltung Berlin zur realen Kfz-Flottenzusammensetzung basiert, für die Jahre 2013 bis 2020 fortgeschrieben.

Für das Modellgebiet Bremen wurde das in Abbildung 6-5 dargestellte Straßennetz berücksichtigt, das aus der Aktualisierung des Bremer Luftreinhalteplans (Jänich et al., 2011) zur Verfügung gestellt wurde. Verwendet wurden Straßen mit einem DTV > 5 000. Als Kfz-Flottenzusammensetzung für Bremen wurde die Standard-Flottenzusammensetzung nach HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) für 2020 angesetzt.

Für das Modellgebiet Köln wurde das in Abbildung 6-6 dargestellte Straßennetz berücksichtigt, das von der Stadt Köln zur Verfügung gestellt wurde. Als Kfz-Flottenzusammensetzung für Köln wurde ebenfalls die Standard-Flottenzusammensetzung nach HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) für 2020 angesetzt.

In Tabelle 6-31 sind die Emissionssummen des Kfz-Verkehrs im jeweiligen Untersuchungsgebiet für die drei Modellgebiete im Bezugsjahr 2020 dargestellt. Da im HBEFA 3.2 keine Emissionsfaktoren zu NMVOC vorliegen, wurden ersatzweise NMHC gewählt, die eine Untergruppe der NMVOC bilden. Die angegebenen NO₂-Emissionen stellen den Anteil der NO₂-Direktemissionen an den NO_x-Emissionen dar.

Tabelle 6-31: Emissionen des Kfz-Verkehrs im Untersuchungsgebiet, Bezugsjahr 2020

	Berlin	Bremen	Köln
NO _x [kg/a]	6 590.2	7 062.1	10 052.2
NO ₂ [kg/a]	1 474.7	1 688.9	2 292.8
SO ₂ [kg/a]	20.5	23.5	30.4
PM ₁₀ [kg/a]	1 017.9	1 271.5	2 037.6
PM _{2.5} [kg/a]	445.5	565.3	610.5
NMHC [kg/a]	4 982.7	2 183.2	2 723.4

7 Immissionsmodellierung auf nationaler Ebene

7.1 Verwendeter Modellansatz

Die rechnerische Bestimmung von NO_2 - und PM_{10} -Immissionen erfordert die Anwendung eines chemischen Transportmodells, da NO_2 überwiegend über chemische Prozesse gebildet wird. Auch die PM_{10} -Immission wird nicht nur durch die direkten PM_{10} -Emissionen verursacht, sondern zu einem großen Teil durch die sekundäre Aerosolbildung, in der aus gasförmigen Vorläuferstoffen wie NO_2 , SO_2 und NH_3 sekundäre Partikel wie Sulfat, Nitrat und Ammonium entstehen.

Im Rahmen dieses Projekts wurde dazu das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG) verwendet, das an der FU Berlin entwickelt wurde (Stern, 2003, 2006a, 2010c; Stern et al., 2008). Mit dem RCG-Modell lassen sich die Ursachen für Luftbelastungen analysieren und die Beiträge von unterschiedlichen Emittenten zur Luftqualität bestimmen. Die Anwendung von sogenannten genesteten Feldern erlaubt es, je nach Fragestellung und Gebietsgröße, unterschiedlich hohe räumliche Auflösung abzubilden.

Das RCG-Modell wurde in den letzten Jahren vielfach auf Bundes- und Länderebene im Rahmen der Erstellung von Luftreinhalteplänen und der Berechnung von Hintergrundkonzentrationen (z. B. IVU Umwelt, 2006, 2009, 2011b, 2012a, 2012b, 2014a, 2016, 2017a), der Maßnahmenanalyse oder zur Analyse grenzüberschreitender Schadstofftransporte (Stern, 2006b, 2010a, 2010b) eingesetzt und ist das Ausbreitungsmodell im vom Umweltbundesamt beauftragten PAREST-Projekt zur Entwicklung von Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung (Bultjes et al., 2012; Stern, 2013) und dem Nachfolgeprojekt „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014).

Das RCG-Modell berechnet die Konzentration von Schadstoffen flächendeckend in Abhängigkeit von der Emission, von physikalischen und chemischen Prozessen während des Transportvorgangs in der Atmosphäre sowie von meteorologischen und topographischen Einflüssen. Dazu wird der relevante Ausbreitungsraum, der ganz Europa oder auch nur eine Stadt oder ein Emittentengebiet umfassen kann, mit einem dreidimensionalen Gitter überspannt, in dessen Gitterzellen die Berechnung der Konzentrationen erfolgt. Das RCG-Modell betrachtet alle in den EU-Richtlinien für Luftqualität festgelegten Schadstoffe wie z. B. Feinstaub, Stickstoffoxide oder Ozon. Die Berechnung der Konzentrationen erfolgt auf Stundenbasis für das ganze Jahr.

Zur Behandlung der chemischen Reaktionen in der Gasphase wird der Carbon Bond-IV-Mechanismus (CBM-IV) benutzt. Dieser Mechanismus ist ein so genannter „lumped-structure“-Mechanismus, bei dem die Kohlenwasserstoffe in symbolische Gruppen entsprechend den Bindungseigenschaften der C-Atome aufgeteilt werden (Gery et al., 1989). Der Mechanismus enthält die von Carter (1996) entwickelte 1-Produkt-Isopren-Chemie. Der CBM-IV-Mechanismus im RCG-Modell entspricht der im CMAQ-Modellsystem der US EPA verwendeten Form (Gipson and Young, 1999).

Der photochemische Gasphasenmechanismus enthält auch die Gasphasenoxidation des Schwefeldioxids zu Schwefelsäure und eine einfache Parametrisierung der Nassphasenoxidation unter Berücksichtigung der O_3 - und H_2O_2 -Reaktionen in der Nassphase (Beekmann et al., 2007).

Die Aerosolbehandlung in RCG wird relativ einfach gehandhabt, um den Charakter eines operationell einsetzbaren Langfristmodells nicht zu verlieren. Das RCG-Modell unterscheidet folgende Partikelarten im Größenbereich kleiner $10\text{ }\mu\text{m}$:

- primär emittierte anthropogene und natürliche Partikel (organisch und anorganisch),
- über physikalische und chemische Prozesse aus anthropogenen und natürlichen Vorläuferstoffen sekundär gebildete organische und anorganische Partikel.

Ein anorganisches Aerosolmodul (ISORROPIA; Nenes et al., 1999) behandelt die thermodynamischen Gleichgewichtsreaktionen der Sulfat-, Nitrat- und Ammoniumaerosolkomponenten (SO_4 , NO_3 , NH_4) sowie von Na und Cl in Abhängigkeit von Temperatur, Feuchte und den Gasphasenkonzentrationen von Salpetersäure, Schwefelsäure und Ammoniak. Die anorganischen Aerosole werden unter dem Begriff SIA zusammengefasst. Ein organisches Modul (SORGAM; Schell et al., 2001) liefert die Konzentrationen der organischen Aerosole, die unter dem Begriff SOA zusammengefasst werden. Damit setzt sich PM10 wie folgt zusammen:

$$\text{PM}_{10} = \text{PM}_{25} + \text{PM}_{\text{CO}} + \text{SIA} + \text{SOA} + \text{Na} + \text{Cl}$$

PM25 und PMCO bezeichnen die primär emittierten Aerosole im Größenbereich $\leq 2.5 \mu\text{m}$ bzw. im Größenbereich $> 2.5 \mu\text{m}$ und $\leq 10 \mu\text{m}$, SIA und SOA die Summe der anorganischen bzw. organischen Aerosole. Na und Cl sind die betrachteten Seesalzkomponenten. Dynamische Prozesse, die zur Größenänderung von Aerosolen beitragen, wie die Koagulation und die Kondensation, werden nicht betrachtet. Alle PM10-Komponenten werden transportiert und unterliegen der nassen und trockenen Deposition.

Das RCG-Modell enthält ein detailliertes Modul zur Berechnung der Entfernung von Schadstoffen aus der Atmosphäre durch trockene Deposition. Die trockene Ablagerung von Gasen und Partikeln erfolgt durch Transport aus der atmosphärischen Grenzschicht zur Oberfläche, wo die Schadstoffe aufgenommen werden. Die Entfernung der Luftbeimengungen aus der Atmosphäre wird, analog zum Stromfluss, durch einen elektrischen Schaltkreis über Widerstandsgesetze beschrieben. Der Transport von Gasen durch die bodennahe Atmosphäre zu einer Oberfläche wird danach durch einen „atmosphärischen Widerstand“ und einen „Oberflächenwiderstand“ bestimmt. Der atmosphärische Widerstand setzt sich zusammen aus dem turbulenten Widerstand, der vom Turbulenzzustand der bodennahen Atmosphäre abhängt, und dem quasi-laminaren oder viskosen Widerstand, der eine Funktion des Zustandes der Oberfläche und der molekularen Diffusivität der Luftbeimengung ist. Der Oberflächenwiderstand charakterisiert den Transfer durch die Oberfläche von Pflanzen, Böden oder Wasser und wird durch Größen wie dem Öffnungszustand der Stomata, Reifegrad der Pflanzen und der Feuchtigkeit der Unterlage gekennzeichnet.

Die komplexen physikalischen Prozesse innerhalb („in-cloud-scavenging“) und unterhalb („below-cloud-scavenging“) von Wolken, die zur nassen Deposition führen, werden mit Hilfe einfacher Auswaschkoeffizienten parametrisiert. „In-cloud-scavenging“ umfasst alle innerhalb einer Wolke ablaufenden Prozesse wie Tröpfchenbildung durch Anlagerung von Wasser an Aerosolen und die Aufnahme von Spurenstoffen in Wolkentröpfchen. Die Effektivität der Spurenstoffaufnahme in Tropfen wird durch die Löslichkeit der Gase in Wasser sowie durch den pH-Wert und die chemische Zusammensetzung des Tropfens bestimmt. Die mögliche Dissoziation der Spurenstoffe und chemische Reaktionen in der Nassphase tragen zur weiteren Komplexität bei. Mit „below-cloud-scavenging“ wird das Einfangen von Spurenstoffen durch fallende Hydrometeore unterhalb einer Wolke bezeichnet. Die Wirksamkeit dieses Prozesses wird im Wesentlichen bestimmt durch die Intensität des Niederschlags und die Größenverteilung der Regentropfen. Die gesamte mit dem Niederschlag am Boden deponierte Spurenstoffmenge setzt sich aus den Beiträgen dieser beiden Prozesse zusammen. Mit der Definition von Auswaschkoeffizienten werden alle zur nassen Deposition beitragenden Effekte in einer aus Messungen oder theoretischen Überlegungen abgeleiteten Größe zusammengefasst (Seinfeld und Pandis, 1998). Die im RCG-Modell verwendeten Auswaschkoeffizienten werden für Gase in Abhängigkeit von der Löslichkeit des Gases berechnet. Die dazu verwendeten Henrykonstanten berücksichtigen, unter der Annahme eines konstanten pH-Wertes von 5, das Säure/Basengleichgewicht (effektive Henry-Konstante). Zusätzlich wird die Temperaturabhängigkeit der Henry-Konstante berücksichtigt.

Emissionen der Stoffgruppen SO_x , NO_x , CO, NH_3 , PM10, PM2.5 und VOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der

Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d. h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verarbeitet jahresspezifische Emissionsdaten für alle benötigten Spezies unterteilt nach Verursachergruppen. Für jede Verursachergruppe werden im Modell, ausgehend von den Jahreswerten, stündliche Emissionen abgeleitet. Die dazu verwendeten Monats-, Wochentag- und Stundenfaktoren berücksichtigen die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen.

Bei den Kohlenwasserstoffen verlangt das Modell die Gesamtemissionen für die definierten Verursachergruppen und ein zu jeder Verursachergruppe gehöriges Kohlenwasserstoffprofil, das die prozentualen Anteile der spezifischen Kohlenwasserstoffe an der Gesamtemission der Verursachergruppe angibt. Jeder Kohlenwasserstoff wird dann den entsprechenden Klassen des verwendeten chemischen Mechanismus (CBM-IV) zugeordnet. Biogene VOC- und NO_x -Emissionen, Seesalzemissionen sowie die Aufwirbelung von Staub aus naturbelassenen Böden werden stündlich modellintern auf Basis von Landnutzungsdaten, meteorologischen Daten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

Die Anwendung des RCG-Modells zur Abschätzung der Änderung des nationalen Hintergrunds durch den verstärkten Betrieb von BHKW erfolgte in den zwei Skalen:

- europäische Skala in einer Auflösung von 0.5° Länge und 0.25° Breite (ca. $28 \times 32 \text{ km}^2$, Modellgebiet Nest 0),
- nationale Skala Deutschland in einer Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite (ca. $7 \times 8 \text{ km}^2$, Modellgebiet Nest 1),

Die europaweite Rechnung liefert dabei die Hintergrundkonzentrationen für die nationale Skala („one-way-nesting“). Die durch den vermehrten Einsatz von BHKW geänderten Emissionen wurden im Modellgebiet Nest 1, Deutschland, berücksichtigt.

Die vom Modell benötigten dreidimensionalen meteorologischen Eingangsdaten für die RCG-Modellierung wurden mit dem an der FU Berlin entwickelten diagnostischen Analysesystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Procedures for Environmental Research; Reimer & Scherer, 1992; Kerschbaumer & Reimer, 2003) erstellt. Das TRAMPER-System basiert auf einer Optimalen Interpolation der verfügbaren meteorologischen Daten. Der Interpolation zugrunde gelegt wurden die meteorologischen Datensätze des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Form von Radiosonden- und Pilotmeldungen der synoptischen Aerologiestationen sowie stündliche und dreistündliche Beobachtungen von Teilen der synoptischen Beobachtungsnetze der in der World Meteorological Organisation (WMO) organisierten Wetterdienste. Die meteorologischen Felder werden auf die gewünschte Auflösung interpoliert, wobei über verschiedene Grenzschichtmodule (Massekonsistenz, Hang-, Berg- und Talwind usw.) eine Anpassung an die hoch aufgelöste Topographie und Landnutzung erfolgt. Als meteorologisches Referenzjahr wurde 2010 verwendet (siehe auch Abschnitt 6.3).

7.2 Verortung und Verteilung der Emissionen in Deutschland

7.2.1 Emissionen Basisszenario APS 2020

Die Abschätzung der Änderung des Hintergrunds durch den verstärkten Betrieb von BHKW im Jahre 2020 basiert auf in dem UBA-Projekt "Luftqualität 2020/2030" (UBA, 2014) erarbeiteten Emissionsprognosen. Die Emissionsszenarien in „Luftqualität 2020/2030“ wurden in größtmöglicher Konsistenz mit den Energie- und Treibhausgasemissionsszenarien der Studie „Politiksznarien für den Klimaschutz VI“ (Öko-Institut 2013) (PSz VI) entwickelt. Das hier verwendete Energieszenario „Aktuelle Politik Szenario“ (APS) bildet alle bereits beschlossenen energie- und klimapolitischen Maßnahmen ab. Diese nationalen Angaben wurden räumlich

verteilt (Europa in einer Gitterauflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite, Deutschland in einer Auflösung von 0.03125° Länge und 0.015625° Breite; siehe UBA (2014)).

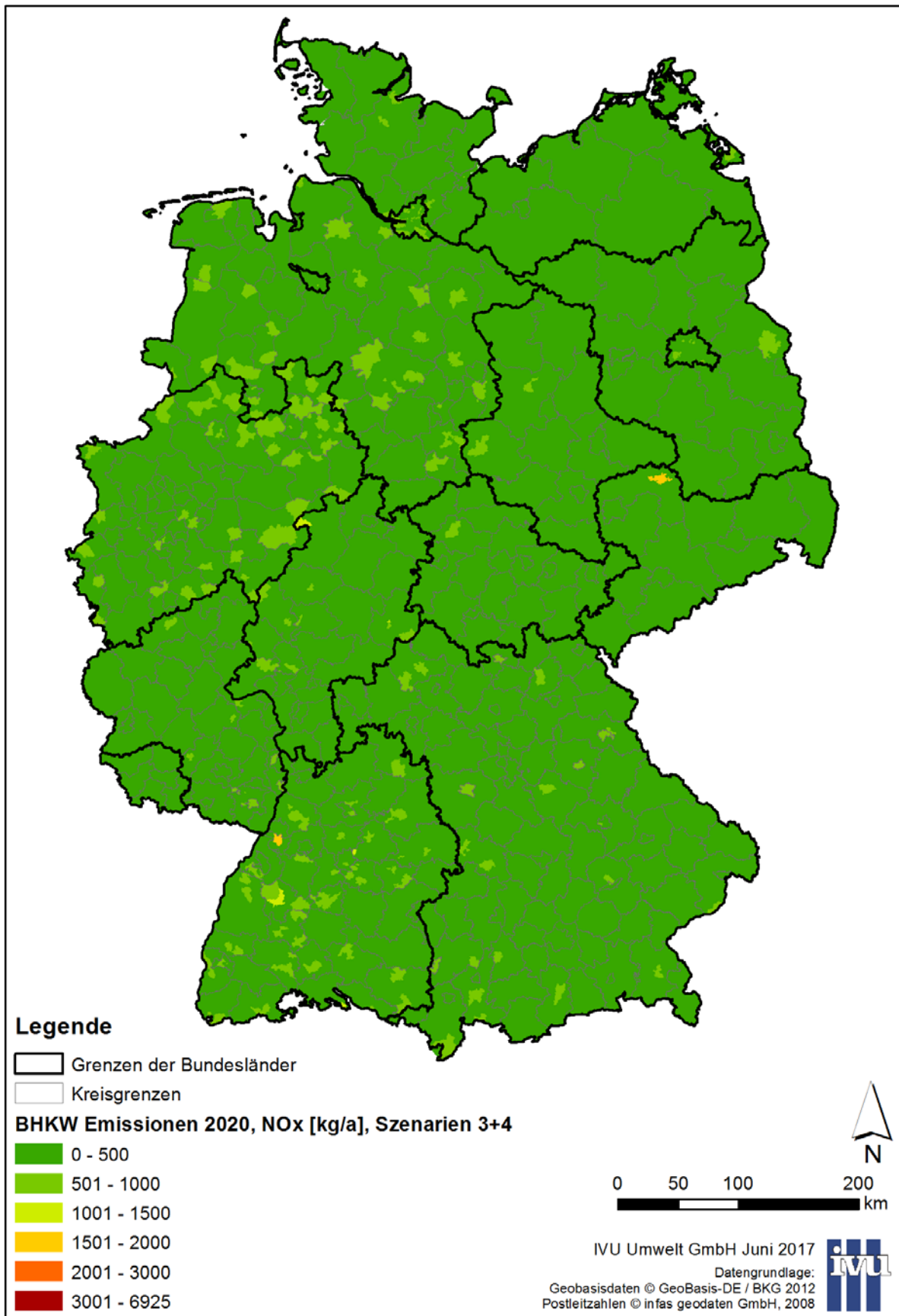
7.2.2 BHKW-Emissionen

Die in Abschnitt 5.3.1 berechneten BHKW-Emissionen für NO_x und NMVOC für die acht nationalen Szenarien nach Tabelle 5-1 bzw. Abbildung 5-46 wurden entsprechend der räumlichen Verteilung der Mini-BHKW aus Abschnitt 5.4.3 auf der Postleitzahl-Ebene verteilt. Anschließend erfolgte die Umlegung der Emissionen auf das RCG-Raster im Nest 1 mit einer Auflösung von ca. 7 x 8 km² auf Basis der Anteile der Postleitzahl-Flächen an den Rasterflächen.

Abbildung 7-1 und Abbildung 7-3 zeigen in gleicher Klasseneinteilung beispielhaft die räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene. Die beiden Abbildungen zeigen die Spannbreite der Emissionen: Abbildung 7-1 zeigt mit den auf den niedrigen Emissionsfaktoren für BHKW beruhenden BHKW-Emissionen im Minimalszenario den unteren Rand der Spannbreite auf (Szenarien 3 und 4), Abbildung 7-3 mit den auf den hohen Emissionsfaktoren für BHKW beruhenden BHKW-Emissionen im Maximalszenario den oberen Rand (Szenarien 5 und 6).

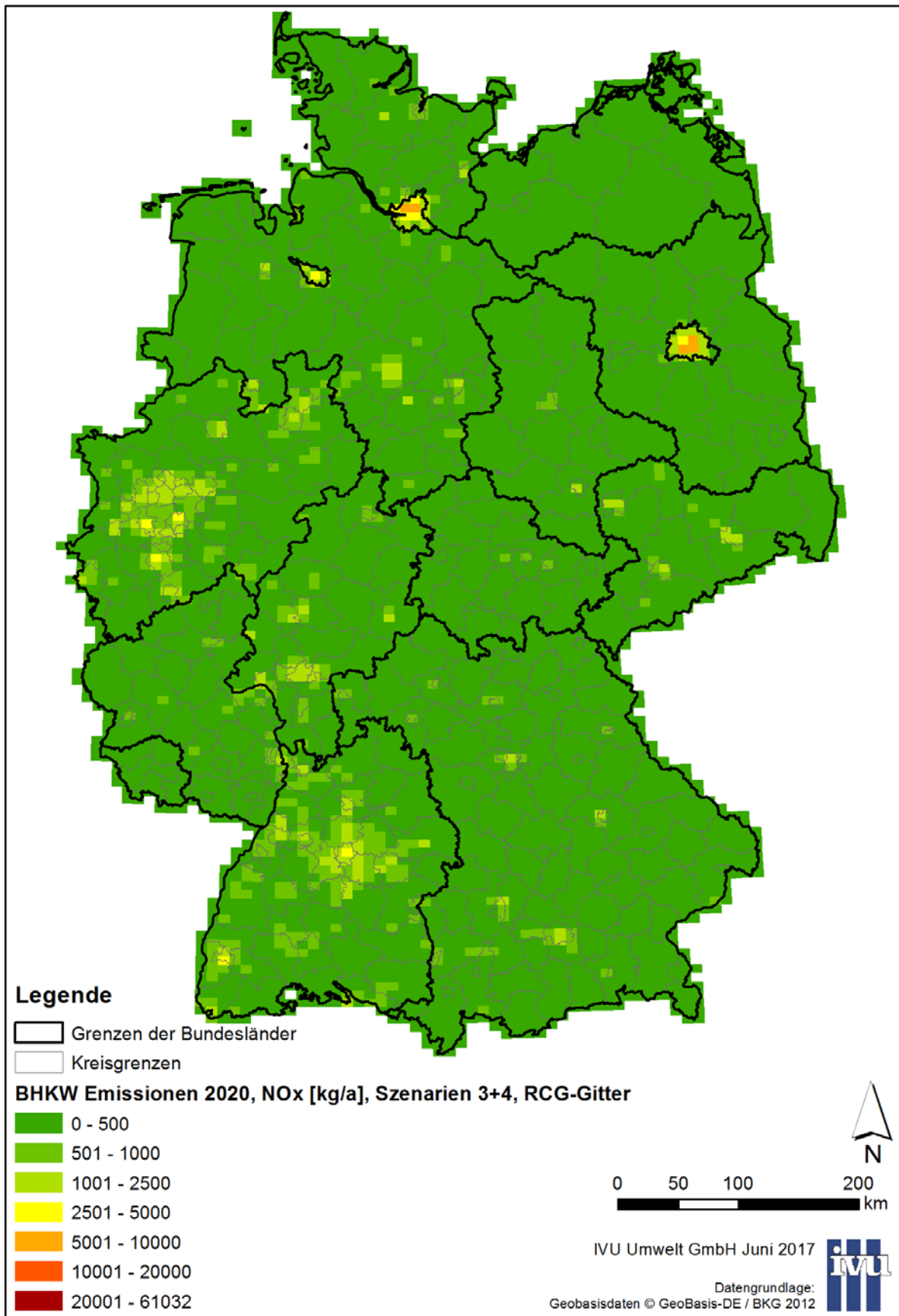
Abbildung 7-2 bzw. Abbildung 7-4 zeigen in gleicher Klasseneinteilung die jeweils zugehörige räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 im RCG-Gitter. Im Raster sind die Ballungsräume anhand der Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen gut zu erkennen. Die Ballungsräume wurden bei der Verteilung der BHKW auf die Postleitzahlen in Abschnitt 5.4.3 nicht explizit als solche berücksichtigt. Dass sie dennoch zu erkennen sind, liegt im Wesentlichen daran, dass die prognostizierten Zubauten zwar zufällig gleichverteilt auf die Postleitzahlen verteilt wurden, dass aber die Postleitzahl-Bereiche in den Ballungsräumen im Allgemeinen eine kleinere Fläche aufweisen als außerhalb, so dass in den Ballungsräumen mehr BHKW pro Fläche stehen. Dies wird erst bei der Darstellung der Emissionen in einem gleichmäßigen Raster deutlich.

Abbildung 7-1: Räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene, Minimalszenario mit niedrigen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 3 und 4)



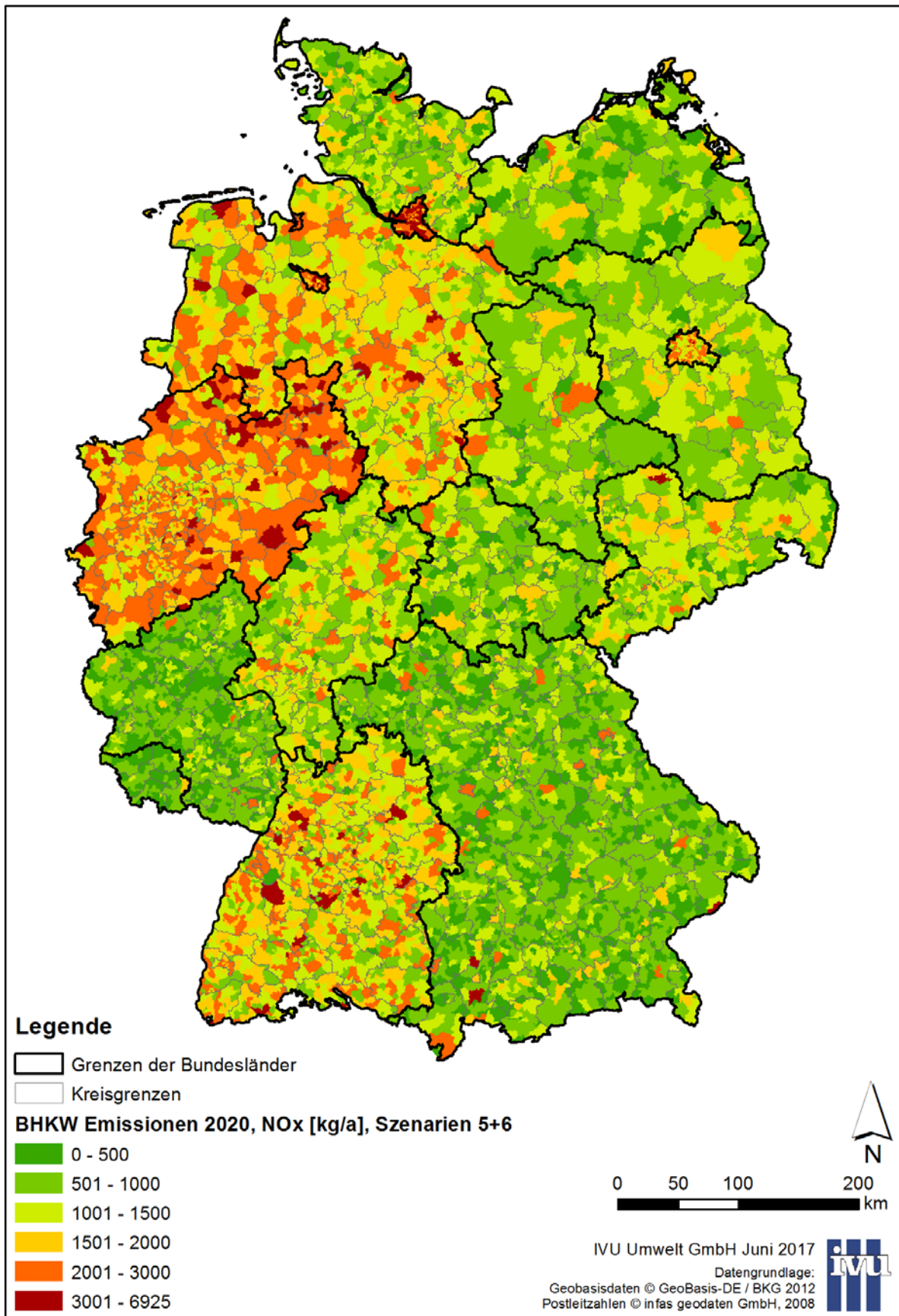
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-2: Räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 im RCG-Gitter, Minimalszenario mit niedrigen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 3 und 4)



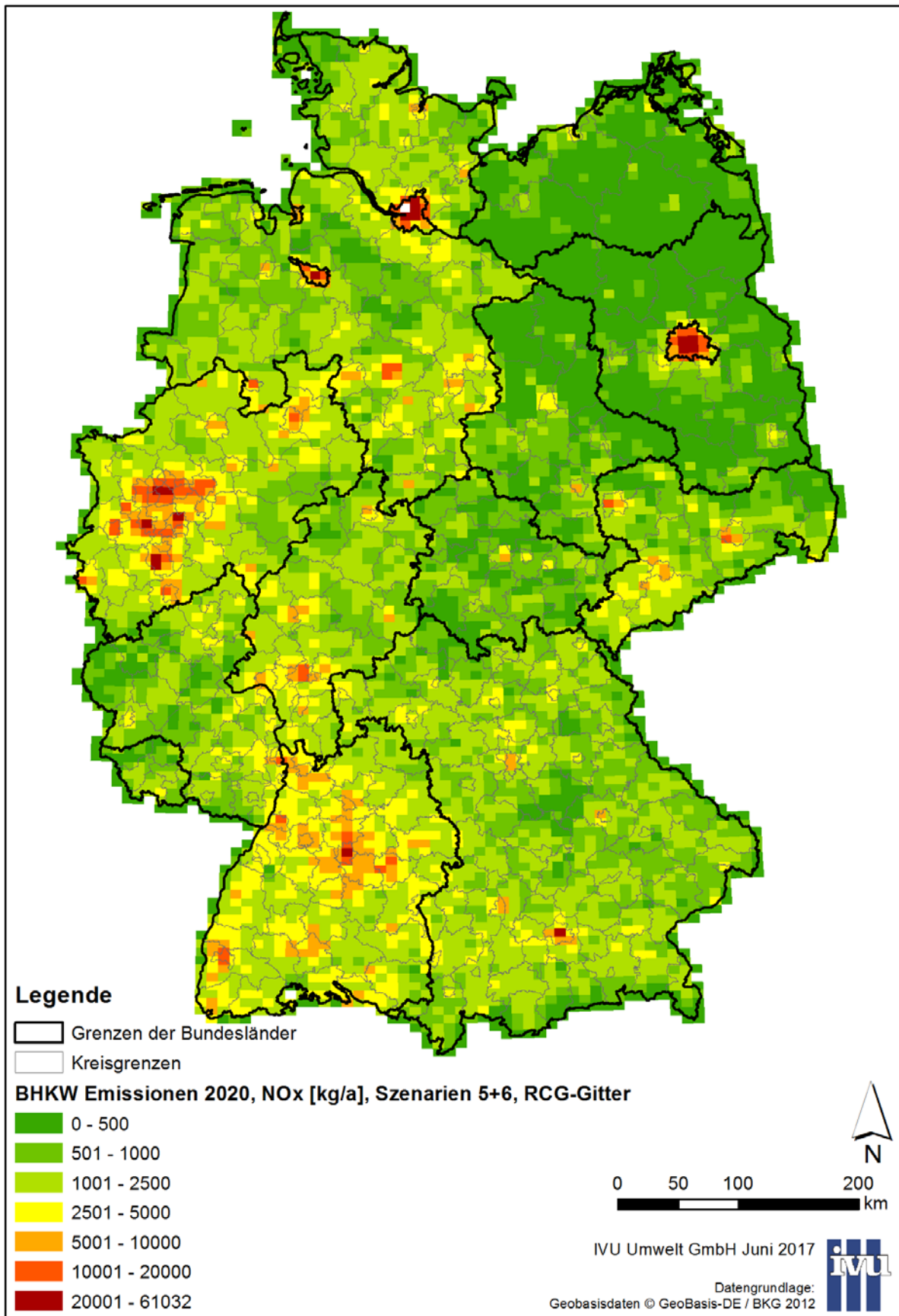
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-3: Räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 auf Postleitzahl-Ebene, Maximalszenario mit hohen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 5 und 6)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-4: Räumliche Verteilung der BHKW-NO_x-Emissionen in der Prognose 2020 im RCG-Gitter, Maximalszenario mit hohen BHKW-Emissionsfaktoren (Szenarien 5 und 6)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

7.2.3 Einarbeitung der BHKW-Szenarien in die Emissionsdatenbasis APS2020

Die Ausbreitungsrechnungen auf nationaler Ebene wurden für die Szenarien 1 bis 8 gemäß Tabelle 5-1 bzw. Abbildung 5-46 durchgeführt.

Grundlage der Einarbeitung der BHKW-Emissionen in das APS2020-Szenario ist die in Abschnitt 7.2.2 diskutierte räumliche Verteilung der BHKW-Emissionen in Deutschland. Durch den vermehrten Einsatz von BHKW kommt es zu lokalen Änderungen in den Emissionen der Verursachergruppe Energiewirtschaft (SNAP 1) und den Emissionen der Kleinf Feuerungsanlagen (SNAP2). Vermiedene Emissionen aus der Stromerzeugung durch den vermehrten Einsatz von BHKW gemäß Abschnitt 5.3.2 wurden von der RCG-Verursachergruppe Energiewirtschaft und vermiedene Emissionen aus der Wärmeerzeugung mit Gas- oder Öl durch den vermehrten Einsatz von BHKW gemäß Abschnitt 5.3.3 wurden von der RCG-Verursachergruppe Kleinverbraucher abgezogen. Entstehende Emissionen durch den verstärkten Einsatz von BHKW gemäß Abschnitt 7.2.2 wurden entsprechend behandelt.

Je nach Schadstoff ergeben sich daher in der Bilanzsumme entweder Zu- oder Abnahmen der Gesamtemissionen. So kommt es z. B. für das Szenario 1 (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, BHKW ersetzen Gasheizkessel) im Mittel über Deutschland im Vergleich zum APS2020-Szenario zu einer Zunahme der NO_x-Emissionen um ca. 1019 t/a (Tabelle 7-1). Die SO₂-Emissionen nehmen dagegen um circa 1216 t/a ab. Insgesamt liegen die durch den vermehrten Einsatz von BHKW bedingten Änderungen der NO_x-Gesamtemissionen aus APS2020 im Mittel über Deutschland bei maximal 0.5 % (Tabelle 7-2). Bei SO₂ ergeben sich entsprechende Änderungen der Gesamtemissionen von maximal 2.2 %, bei PM10 von maximal 0.1 %, bei PM2.5 von maximal 0.3 % und bei NMVOC von deutlich unter 0.1%.

Tabelle 7-1: In Deutschland durch BHKW erzeugte Emissionsänderungen im Jahr 2020 und Gesamtemissionen gemäß APS2020

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [t/a]	SO ₂ [t/a]	PM10 [t/a]	PM2.5 [t/a]	NMVOC [t/a]
Gesamtemissionen	--	APS2020	1 011 793.4	362 735.6	232 118.4	99 791.1	1 203 873.7
Minimalszenario							
hoch	Gas	1	1 018.6	-1 215.9	-77.7	-70.8	145.8
	Öl	2	454.4	-3 071.4	-110.0	-103.1	113.2
niedrig	Gas	3	-1 395.7	-1 215.9	-77.7	-70.8	16.5
	Öl	4	-1 959.9	-3 071.4	-110.0	-103.1	-16.1
Maximalszenario							
hoch	Gas	5	2 659.8	-3 215.1	-205.5	-187.3	383.2
	Öl	6	1 168.0	-8 121.3	-290.8	-272.6	297.0
niedrig	Gas	7	-3 702.1	-3 215.1	-205.5	-187.3	42.5
	Öl	8	-5 194.0	-8 121.3	-290.8	-272.6	-43.7

Tabelle 7-2: Relativer Anteil der in Deutschland durch BHKW erzeugten Emissionsänderungen im Jahr 2020 an den Gesamtemissionen gemäß APS2020

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [%]	SO ₂ [%]	PM10 [%]	PM2.5 [%]	NM VOC [%]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1	0.10 %	-0.34 %	-0.03 %	-0.07 %	0.01 %
	Öl	2	0.04 %	-0.85 %	-0.05 %	-0.10 %	0.01 %
niedrig	Gas	3	-0.14 %	-0.34 %	-0.03 %	-0.07 %	0.00 %
	Öl	4	-0.19 %	-0.85 %	-0.05 %	-0.10 %	0.00 %
Maximalszenario							
hoch	Gas	5	0.26 %	-0.89 %	-0.09 %	-0.19 %	0.03 %
	Öl	6	0.12 %	-2.24 %	-0.13 %	-0.27 %	0.02 %
niedrig	Gas	7	-0.37 %	-0.89 %	-0.09 %	-0.19 %	0.00 %
	Öl	8	-0.51 %	-2.24 %	-0.13 %	-0.27 %	0.00 %

7.3 Ergebnis der Immissionsmodellierung

Das RCG-Modell wurde im ersten Schritt auf das europäische Modellgebiet in der Auflösung 0.5° Länge und 0.25° Breite und danach auf das deutsche Modellgebiet in der Auflösung 0.125° Breite und 0.0625° Länge angewandt. In beiden Skalen wurden die Emissionen des APS2020-Szenarios verwendet. Die meteorologischen Daten beschreiben das Jahr 2010. Ausgewertet wurden nur die Ergebnisse der Berechnungen für Deutschland. Die europaweite Rechnung liefert lediglich die Hintergrundkonzentrationen für die deutschlandweiten Rechnung („one-way-nesting“). Abbildung 7-5 bis Abbildung 7-9 zeigen die mit dem RCG-Modell berechneten Jahresmittelwerte 2020 für die Stoffe NO₂, NO_x, PM10, PM2.5 und SO₂. Diese Prognosen basieren auf den prognostizierten Emissionsentwicklungen des Szenario APS2020. Eine ausführliche Diskussion der prognostizierten Immissionsentwicklungen kann in UBA (2014) gefunden werden. Wie in Abschnitt 7.2.3 beschrieben, wurden die verschiedenen Szenarien über einen möglichen verstärkten Einsatz von BHKW in die APS2020 Datenbasis eingearbeitet.

Die durch den vermehrten Einsatz von BHKW geänderten Emissionen wurden im Modellgebiet Deutschland für die acht ausgewählten Szenarien berücksichtigt. Mit diesen modifizierten Emissionsdatensätzen wurden die Berechnungen im deutschen Modellgebiet wiederholt. Da die Auswirkungen der durch den BHKW-Einsatz bewirkten Immissionsänderungen gering sind, werden diese für die acht Szenarien im Wesentlichen tabellarisch zusammengefasst. In der Fläche werden die bewirkten absoluten und relativen Immissionsveränderungen nur beispielhaft für das Szenario 8 dargestellt, das Szenario mit den stärksten NO_x-Emissionsänderungen (siehe Abschnitt 5.3.4).

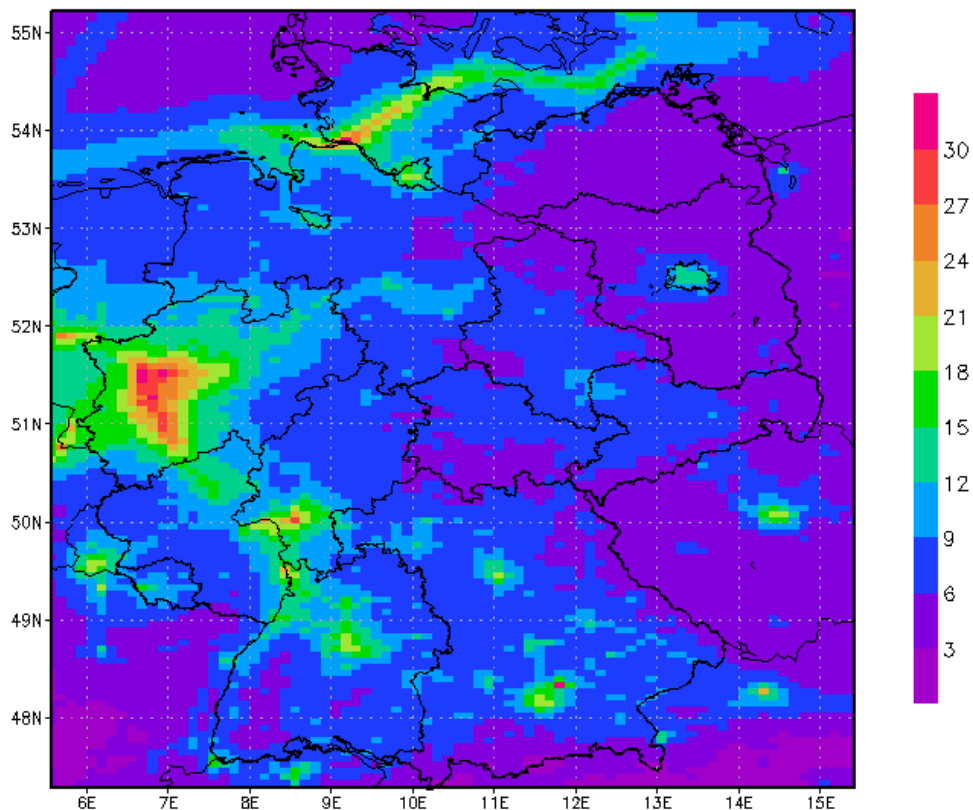
Abbildung 7-10 bis Abbildung 7-14 zeigen die durch das Szenario 8 bewirkten absoluten und relativen Konzentrationsänderungen 2020 für die Stoffe NO₂, NO_x, PM10, PM2.5 und SO₂. Für alle Stoffe kommt es unter Szenario 8 zu Abnahmen der Ausgangskonzentrationen APS2020. Das Szenario 8 bewirkt eine Minderung der deutschlandweiten NO_x-Emissionen um ca. 5 194 t (siehe Abschnitt 5.3.4).

Dementsprechend kommt es zu Abnahmen der in Abbildung 7-5 dargestellten NO₂-Immissionsverteilung von sehr geringen Werten bis zu 0.26 µg/m³ (Abbildung 7-10). Relativ entspricht dies Abnahmen von sehr geringen Werten bis knapp über 2 %. Bei den NO_x-Konzentrationsverteilungen können lokal auf Basis von Szenario 8 Abnahmen bis knapp 0.6 µg/m³ oder 2.7 % erreicht werden. Größere Änderungen ergeben sich hauptsächlich in den Ballungsräumen. Die entsprechenden absoluten und relativen maximalen Abnahmen

liegen für PM₁₀ bei 0.14 µg/m³ bzw. 0.9 %, für PM_{2.5} bei 0.14 µg/m³ und 1.2 %, für SO₂ bei 0.71 µg/m³ bzw. 16.4 %.

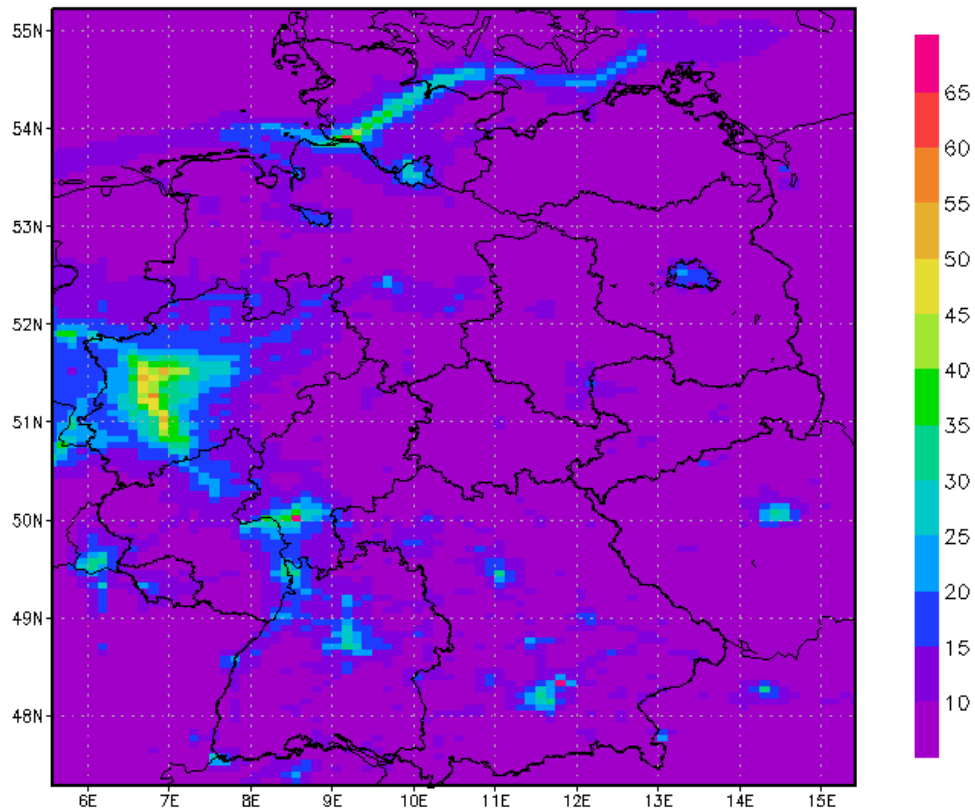
Tabelle 7-3 bis Tabelle 7-4 zeigen die Bandbreiten der absoluten und relativen Immissionsänderungen bedingt durch den verstärkten Einsatz von BHKW für alle Szenarien. Für die Stickoxide kommt es je nach Szenario zu Zu- oder Abnahmen der Jahresmittelwerte 2020 (Tabelle 7-3). Bei allen anderen Stoffen ergeben sich nur Abnahmen (Tabelle 7-4). Insgesamt sind die absoluten Änderungen mit Werten größtenteils deutlich unter 0.5 µg/m³ aber als gering zu betrachten. Bei den relativen Änderungen ergeben sich nur für SO₂ größere Abnahmen (Tabelle 7-4) bei allerdings recht niedrigen Ausgangskonzentrationen (Abbildung 7-9).

Abbildung 7-5: Berechnete NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³. Emissionsszenario APS2020



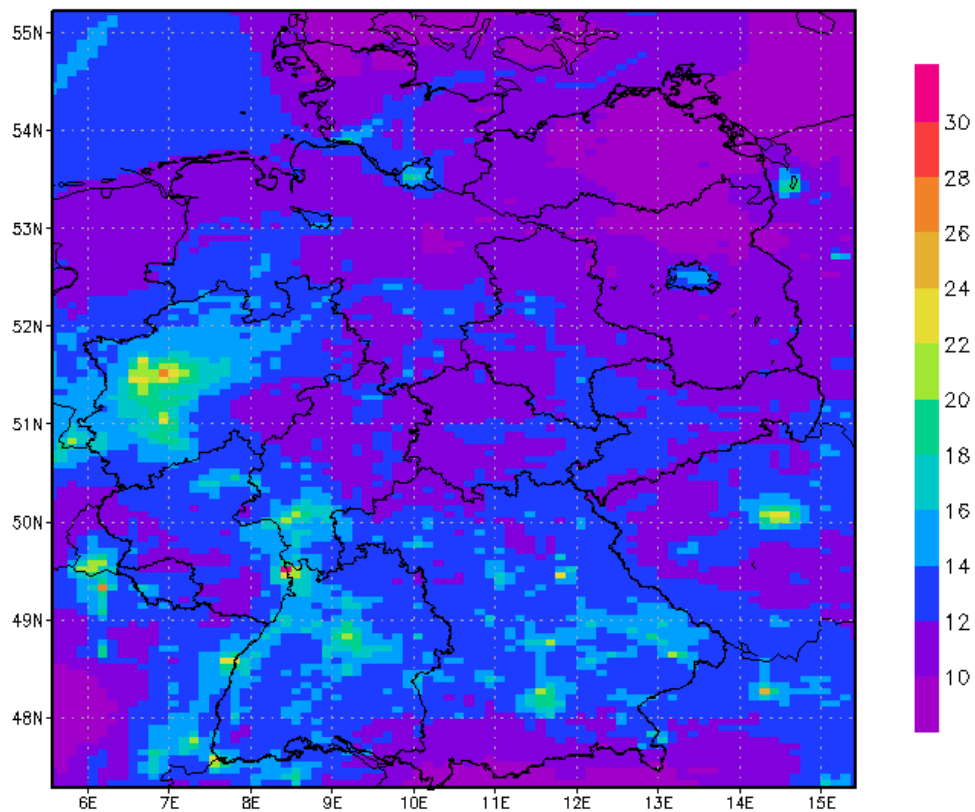
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-6: Berechnete NO_x -Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Emissionsszenario APS2020



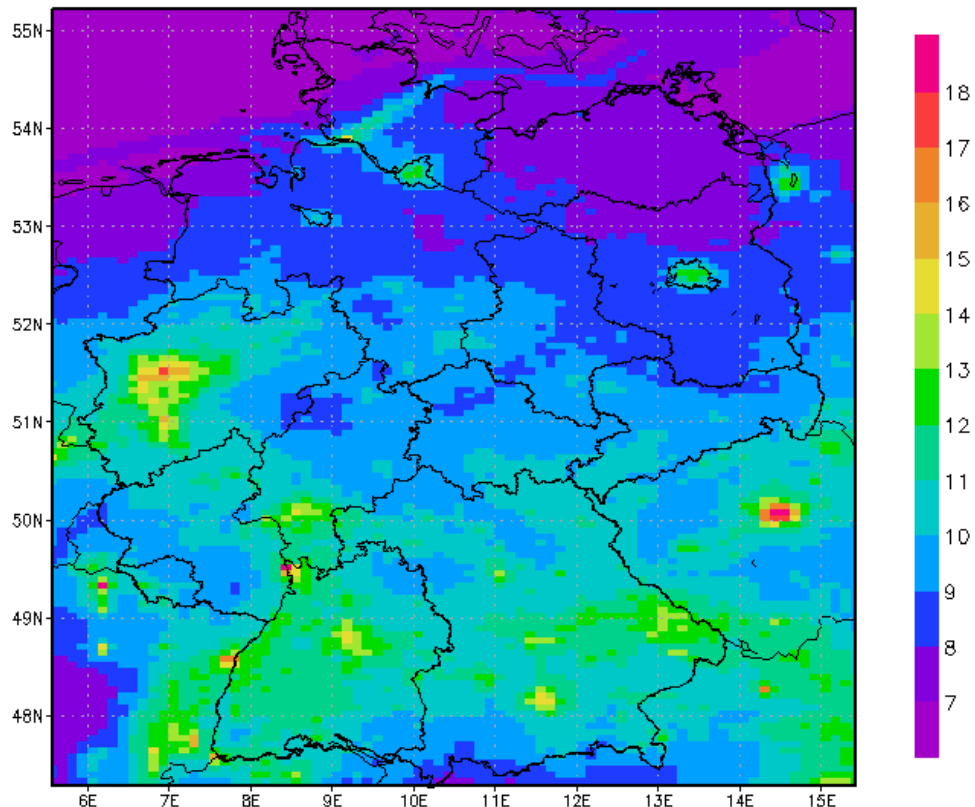
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-7: Berechnete PM_{10} -Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Emissionsszenario APS2020



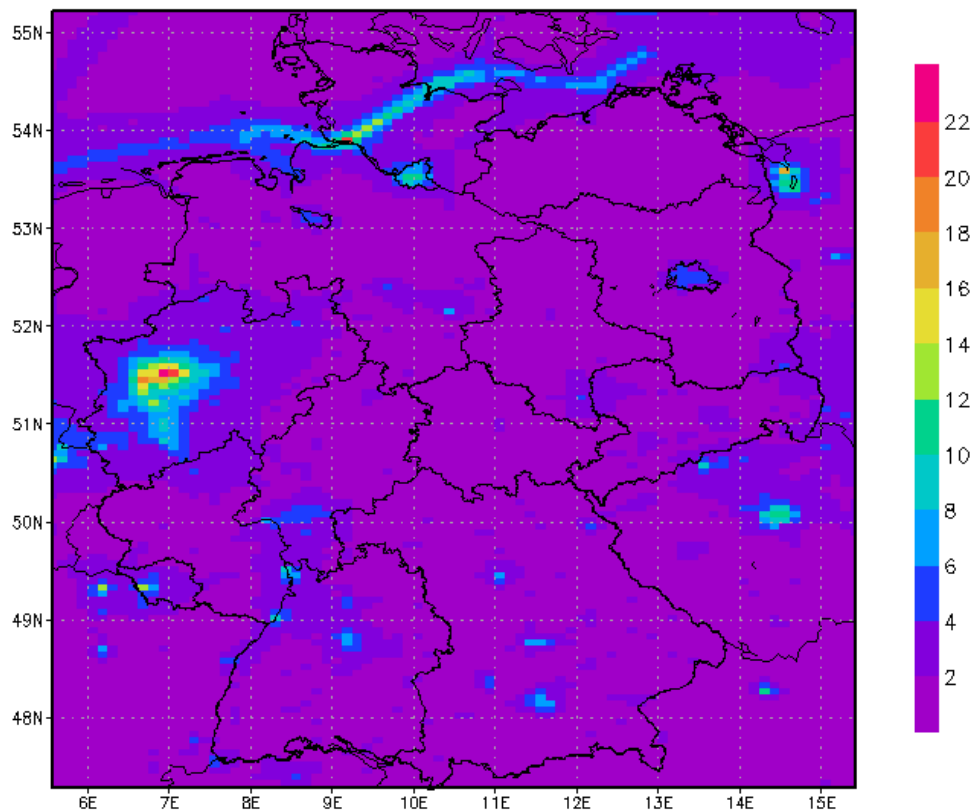
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-8: Berechnete PM_{2.5}-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Emissionsszenario APS2020



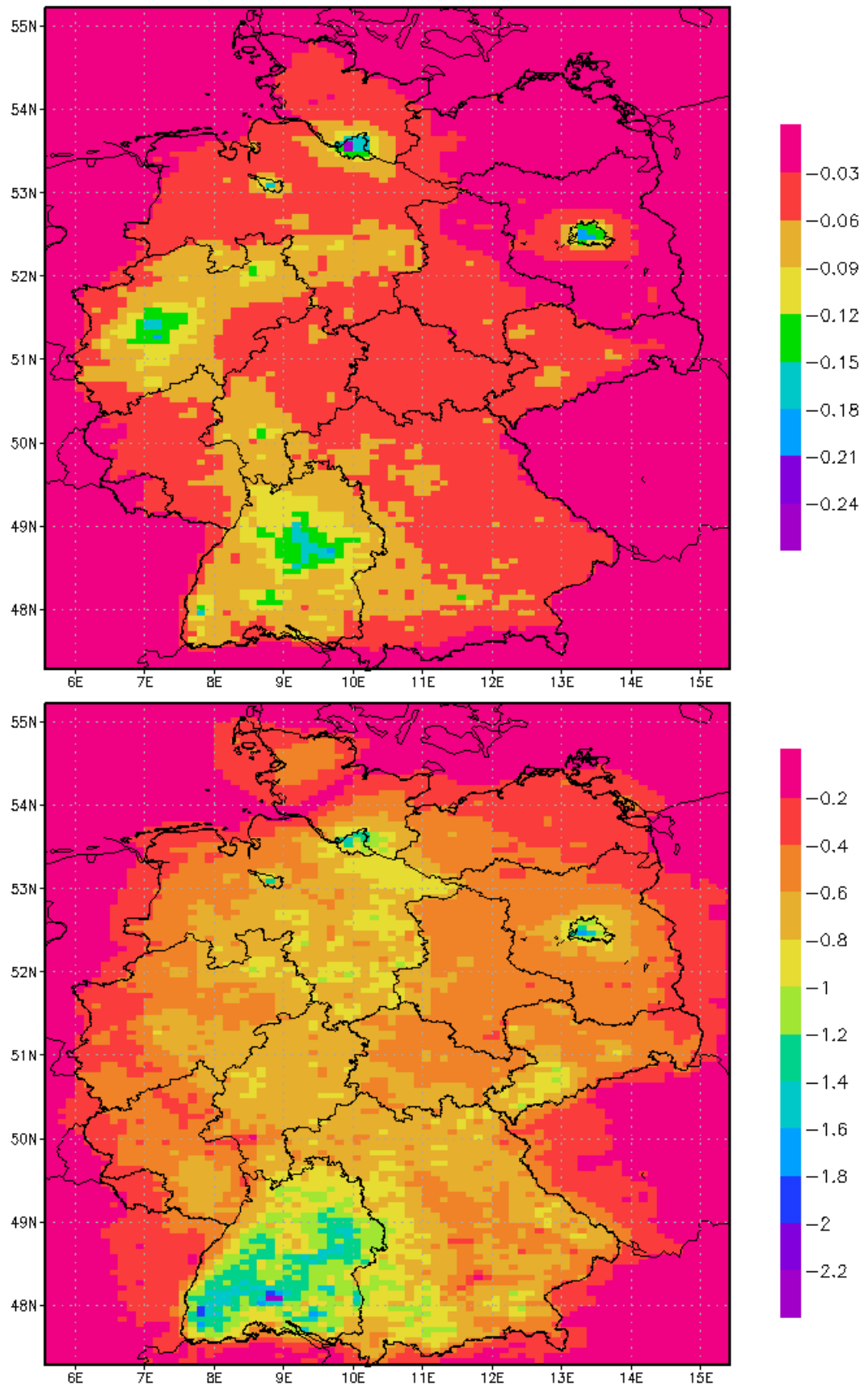
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-9: Berechnete SO₂-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Emissionsszenario APS2020



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

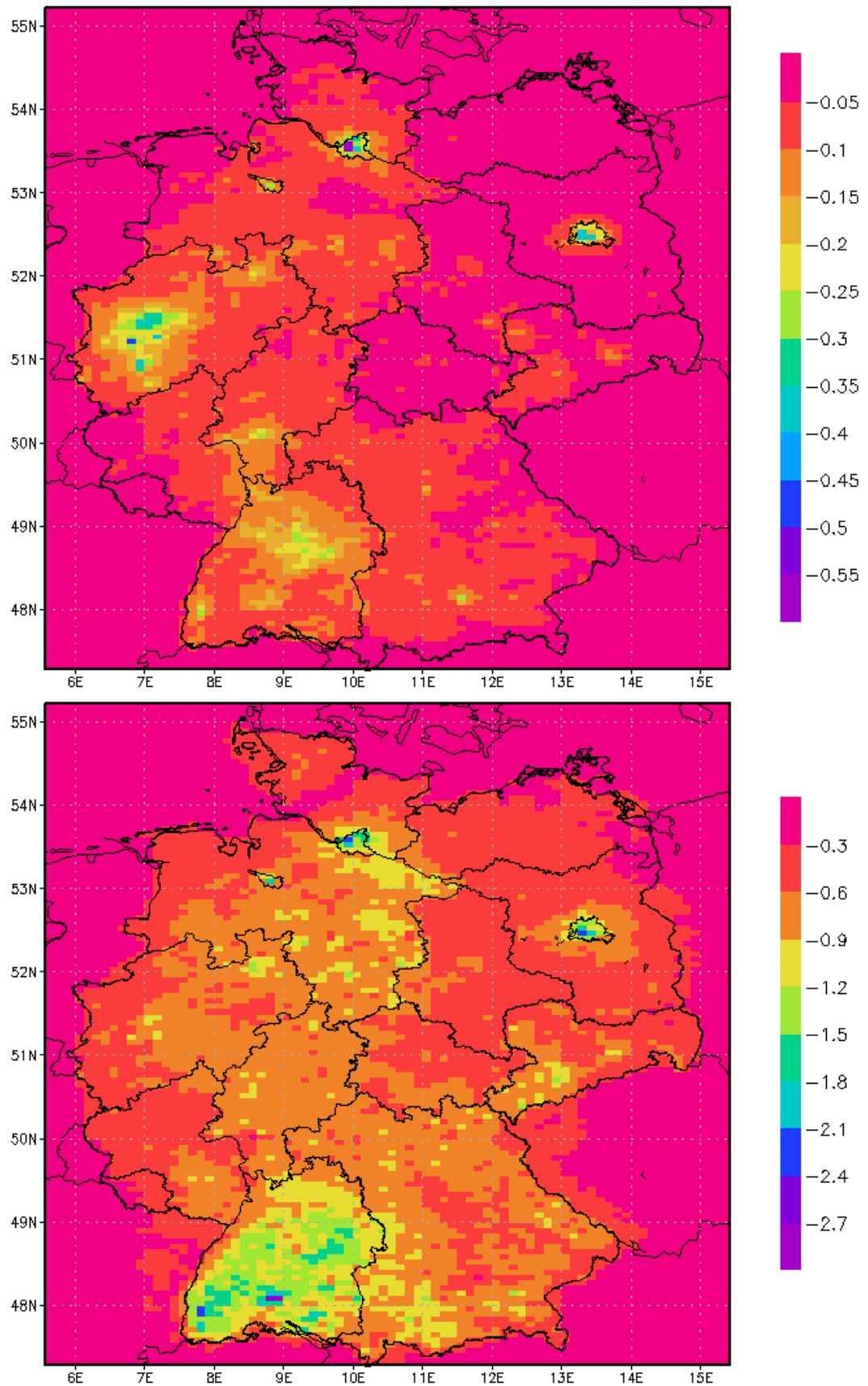
Abbildung 7-10: Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der NO_2 -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

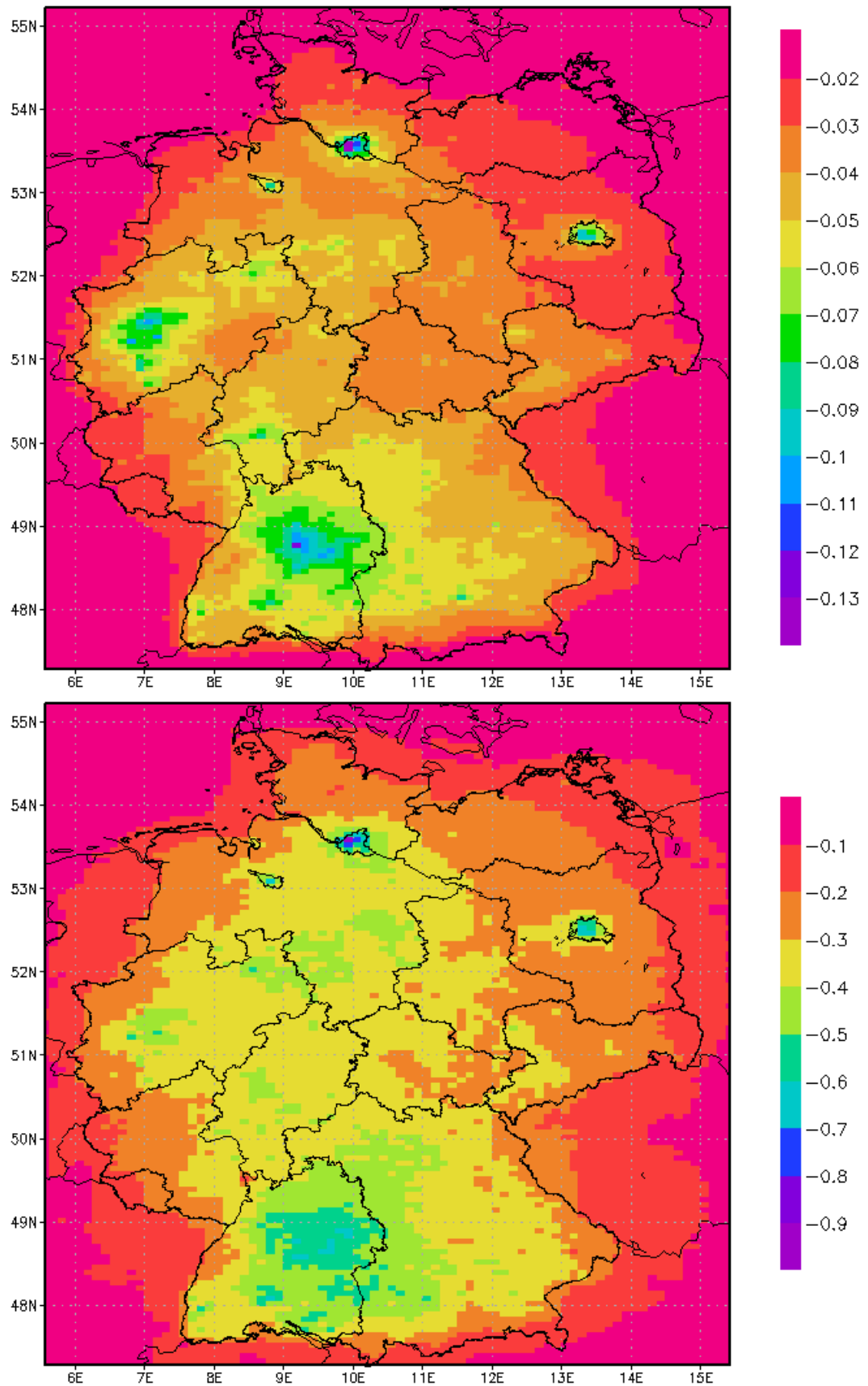
Abbildung 7-11: Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der NO_x -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

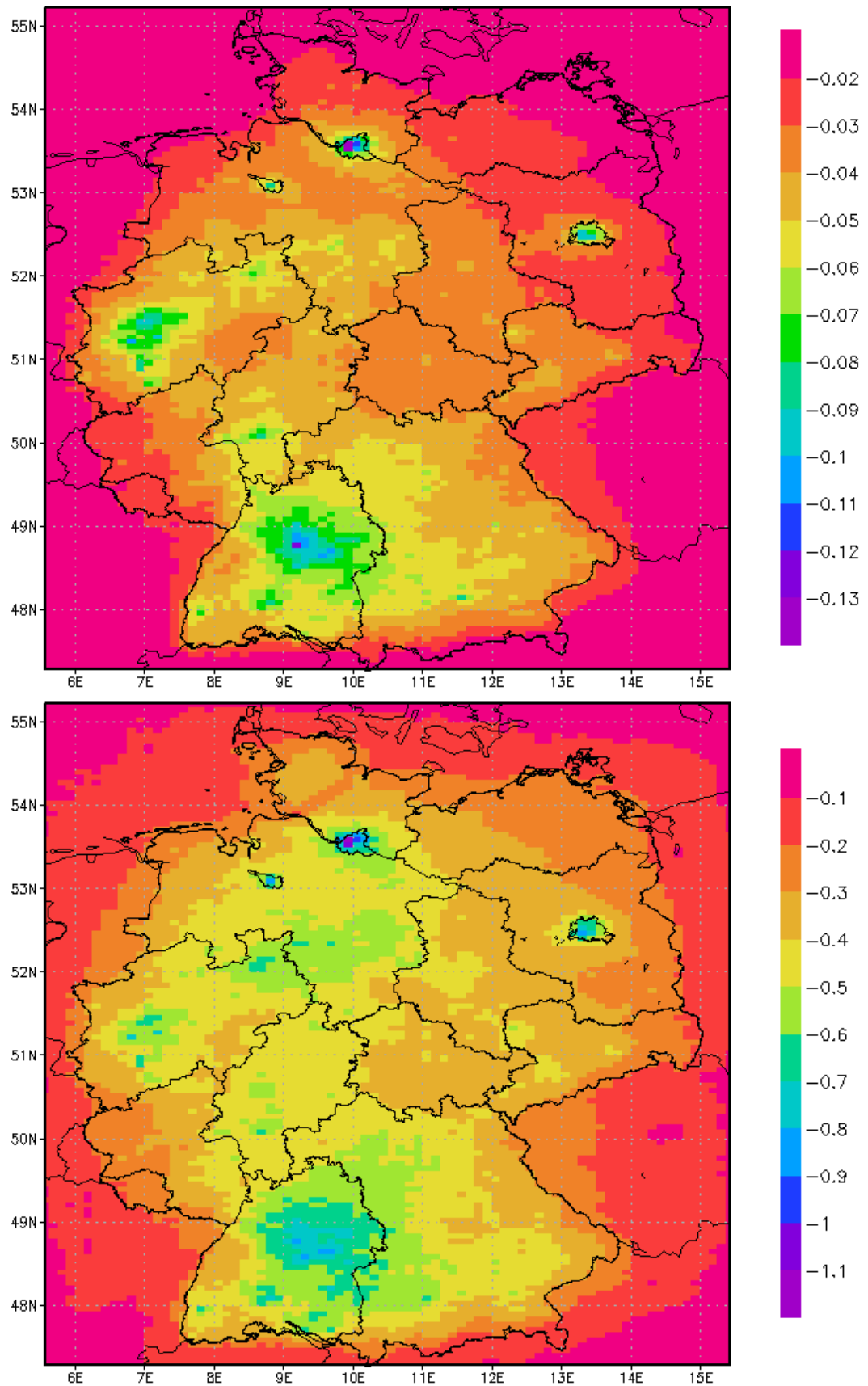
Abbildung 7-12: Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der PM₁₀-Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

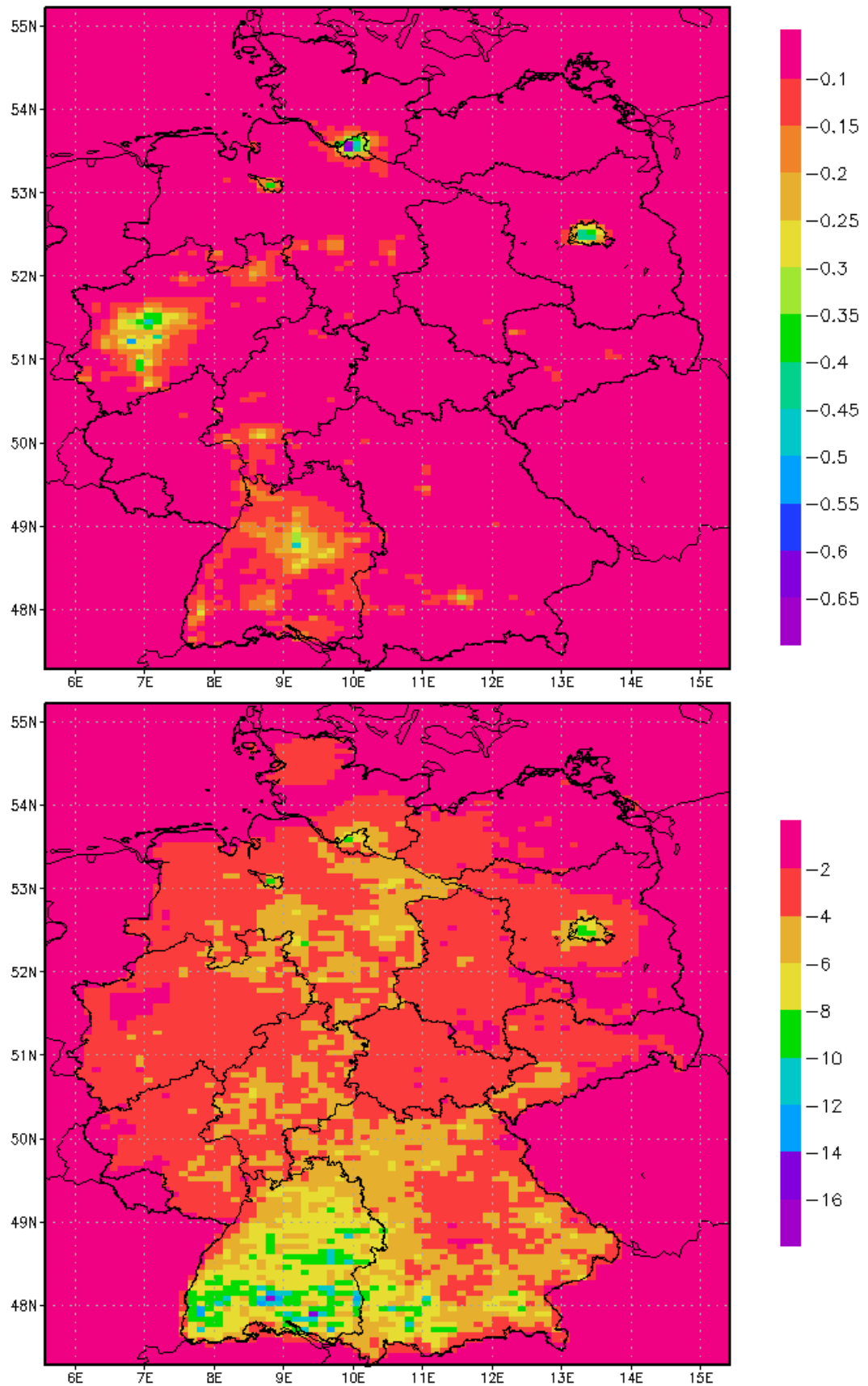
Abbildung 7-13: Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der PM2.5-Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 7-14: Absolute (oben, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und relative Änderungen (unten, in %) der SO_2 -Jahresmittelwerte 2020 als Folge eines verstärkten Einsatzes von BHKW: Szenario 8 zu APS2020.



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Tabelle 7-3: Bandbreite der absoluten und relativen NO₂-und NO_x-Immissionsänderungen (Jahresmittelwerte) in Deutschland für BHKW-Szenarien 1 bis 8. Bezug APS2020-Szenario.

	Absolute Differenzen [µg/m ³]		Relative Differenzen [%]		
	Min	Max	Min	Max	Kommentar
NO ₂					
Szenario 1	0.00	0.07	0.0 %	0.5 %	nur Zunahmen
Szenario 2	0.00	0.04	0.0 %	0.3 %	nur Zunahmen
Szenario 3	-0.07	0.00	-0.6 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 4	-0.09	0.00	-0.8 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 5	0.00	0.19	0.0 %	1.3 %	nur Zunahmen
Szenario 6	0.00	0.12	0.0 %	0.9 %	nur Zunahmen
Szenario 7	-0.20	0.00	-1.6 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 8	-0.26	0.00	-2.3 %	0.0 %	nur Abnahmen
NO _x					
Szenario 1	0.00	0.17	0.0 %	0.9 %	nur Zunahmen
Szenario 2	0.00	0.12	0.0 %	0.6 %	nur Zunahmen
Szenario 3	-0.14	0.00	-0.7 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 4	-0.19	0.00	-1.0 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 5	0.00	0.51	0.0 %	2.6 %	nur Zunahmen
Szenario 6	0.00	0.37	0.0 %	1.8 %	nur Zunahmen
Szenario 7	-0.41	0.00	-1.9 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 8	-0.58	0.00	-2.7 %	0.0 %	nur Abnahmen

Tabelle 7-4: Bandbreite der absoluten und relativen PM10-, PM2.5- und SO₂-Immissionsänderungen (Jahresmittelwerte) in Deutschland für BHKW-Szenarien 1 bis 8. Bezug APS2020-Szenario.

	Absolute Differenzen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Relative Differenzen [%]		
	Min	Max	Min	Max	Kommentar
PM10					
Szenario 1	-0.02	0.00	-0.2 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 2	-0.05	0.00	-0.3 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 3	-0.02	0.00	-0.1 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 4	-0.05	0.00	-0.3 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 5	-0.07	0.00	-0.4 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 6	-0.14	0.00	-0.9 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 7	-0.07	0.00	-0.4 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 8	-0.14	0.00	-0.9 %	0.0 %	nur Abnahmen
PM2.5					
Szenario 1	-0.02	0.00	-0.2 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 2	-0.05	0.00	-0.4 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 3	-0.02	0.00	-0.2 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 4	-0.05	0.00	-0.4 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 5	-0.07	0.00	-0.6 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 6	-0.14	0.00	-1.2 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 7	-0.07	0.00	-0.6 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 8	-0.14	0.00	-1.2 %	0.0 %	nur Abnahmen
SO ₂					
Szenario 1	-0.10	0.00	-2.1 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 2	-0.24	0.00	-6.0 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 3	-0.10	0.00	-2.1 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 4	-0.24	0.00	-6.0 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 5	-0.28	0.00	-7.8 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 6	-0.71	0.00	-16.3 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 7	-0.28	0.00	-7.9 %	0.0 %	nur Abnahmen
Szenario 8	-0.71	0.00	-16.4 %	0.0 %	nur Abnahmen

8 Immissionsmodellierung auf lokaler Ebene

8.1 Vorgehensweise Modellierung

8.1.1 Windfeldmodellierung mit MISKAM

8.1.1.1 Modellbeschreibung

MISKAM (Mikroskaliges Strömungs- und Ausbreitungsmodell; Eichhorn, 2013) ist ein dreidimensionales nicht-hydrostatisches numerisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell zur kleinräumigen Berechnung von Windverteilungen und Immissionskonzentrationen in bebauten Gebieten.

Die Simulation der Strömungsverhältnisse im Modellgebiet basiert auf den vollständigen dreidimensionalen Bewegungsgleichungen (prognostischer Modellansatz) in Form der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS). Für die auf den berechneten Strömungsverhältnissen aufbauende Ausbreitungsrechnung wird in MISKAM die Advektions-Diffusions-Gleichung verwendet.

Das Modellgebiet wird durch ein räumliches Gitter in geeigneter Auflösung dargestellt. MISKAM erlaubt sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung variable Gitterweiten. Gebäude und andere Strömungshindernisse werden explizit als 3D-Objekte in der Auflösung der Rechnung zu Grunde liegenden Modellgitters berücksichtigt.

Im hier vorliegenden Projekt wurden mit MISKAM die Wind- und Turbulenzfelder für definierte meteorologische Zustände berechnet und diese in eine Windfeldbibliothek für LASAT konvertiert. Für die Berücksichtigung der mit MISKAM ermittelten Turbulenzen in LASAT wurde dabei die von Letzel et al. (2012) empfohlene Turbulenzkopplung verwendet. Die Ausbreitungsmodellierung erfolgte dann auf Basis dieser Windfeldbibliothek in LASAT (Abschnitt 8.1.2).

Wenn MISKAM auch zur Ausbreitungsrechnung eingesetzt wird, sind – neben der Bebauungsgeometrie im Modellgebiet – als weitere Eingangsdaten meteorologische Daten in Form einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) sowie die Daten der zu berücksichtigenden Emissionen im Modellgebiet erforderlich. Letztere können als Punkt-, Linien- und Volumenquellen angegeben werden, die modellintern alle in Volumenquellen umgerechnet werden. Für Punktquellen kann eine feste Vertikalgeschwindigkeit (Austrittsgeschwindigkeit der Luft, z. B. aus einem Kamin) vorgegeben werden. Die verkehrserzeugte Turbulenz im Straßenraum ist in MISKAM selbst nicht enthalten. Sie kann im Postprocessing über einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden, der dann wirkt, wenn eine vorzugebende Schwellenwindgeschwindigkeit unterschritten wird. Die Verwendung von Zeitreihen anstelle von AKS ist mit MISKAM nur mit großem rechen- und datentechnischen Aufwand zu realisieren und in der allgemeinen Anwendung bis heute nicht üblich. Die Ergebnisse liegen daher im Allgemeinen als Jahresmittelwerte vor, Kurzzeitkennwerte werden über statistische Ansätze abgeleitet.

MISKAM wurde für die Simulation der Ausbreitung nicht-reaktiver Substanzen entwickelt. Da NO_2 eine chemisch reaktive Substanz ist, werden entsprechende Ausbreitungsrechnungen mit MISKAM zunächst für NO_x durchgeführt. Die Ableitung der NO_2 -Belastung findet dann extern im Postprocessing (Abschnitt 8.7) statt.

8.1.1.2 Eingangsdaten

Wesentliche Eingangsdaten für die Windfeldmodellierung sind die Bebauungsdaten im Modellgebiet. Die in Abschnitt 6.2 dargestellten drei Modellgebiete wurden in der Horizontalen konstant mit einer Gitterweite von 2.2 m gerastert, um einerseits den Straßenbereich und die Gebäude hinreichend genau aufzulösen und

andererseits trotz der Größe der Modellgebiete vertretbare Rechenzeiten und Speicheranforderungen zu erhalten. In der Vertikalen erstrecken sich die Modellgebiete bis in eine Höhe von 500 m, die mit rund 40 Schichten aufgelöst wurde.

Grundsätzlich sind in MISKAM in der Horizontalen auch variable Gitterweiten möglich. Da die hier zu berechnenden Windfelder aber als Eingangsdaten für eine Ausbreitungsrechnung mit LASAT erstellt wurden und LASAT ein äquidistantes Gitter benötigt, wurde das gesamte Modellgebiet mit einem äquidistanten Gitter aufgelöst.

Eine weitere Anforderung von LASAT an das Modellgebiet ist, dass die Kanten des Modellgebiets in Nord/Süd- bzw. West/Ost-Richtung ausgerichtet sind. Für jedes Modellgebiet wurden daher alle Gebäude- und alle Straßengeometrien so gedreht, dass im Bereich der Messstation die Gebäudekanten und der Straßenverlauf möglichst gitterparallel liegen. Auf diese Weise werden zumindest im Bereich der Messstation treppenförmige Artefakte in der Abbildung der Geometrien durch das Modellgitter gering gehalten. Analog zur Drehung der Modellgebietsgeometrien wurde dann für die Ausbreitungsrechnungen in LASAT eine Drehung der Windrichtungen in den antreibenden AKTerm vorgenommen (Abschnitt 8.1.2.2).

Die in Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-6 dargestellten Gebäudedaten wurden für die Modellierung in das jeweilige Modellgitter überführt. Es wurde eine Bodenrauigkeit von 20 cm im Modellgebiet angesetzt. Für jedes der drei Modellgebiete wurden die Wind- und Turbulenzfelder für 36 Windrichtungen erzeugt.

8.1.2 Ausbreitungsmodellierung mit LASAT

8.1.2.1 Modellbeschreibung

Das Ausbreitungsmodell LASAT (Janicke, 2015) ist ein Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (KRdL, 2004) und die Grundlage des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 der TA Luft (2002). Es berechnet für ein dreidimensionales Modellgebiet die Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre, indem es für ein repräsentatives Ensemble von Spurenstoff-Partikeln die Bewegung im Strömungsfeld mit Hilfe eines stochastischen Prozesses simuliert (Lagrange-Verfahren).

Das Modellgebiet wird durch ein räumliches Gitter in geeigneter Auflösung dargestellt. LASAT verwendet in horizontaler Richtung ein äquidistantes Gitter, in vertikaler Richtung sind variable Gitterweiten möglich. Die Verwendung mehrerer ineinander geschachtelter Netze zur feineren Auflösung einzelner Bereiche innerhalb eines Modellgebiets ist möglich und erlaubt so auch die Abdeckung ganzer Stadtgebiete oder Regionen in angemessener Auflösung. Gebäude und andere Strömungshindernisse werden explizit als 3D-Objekte in der Auflösung des der Rechnung zu Grunde liegenden Modellgitters berücksichtigt.

Um mit LASAT Wind- und Turbulenzfelder zu ermitteln, sind dort verschiedene Ansätze implementiert. In ebenem Gelände ohne Gebäude werden die meteorologischen Größen durch ein ebenes Grenzschichtmodell beschrieben. Für komplexes Gelände mit oder ohne Gebäude ist ein diagnostisches Windfeldmodell integriert. Die Steigung des Geländes sollte dabei den Wert 1:5 nicht überschreiten (TA Luft, 2002).

Im hier vorliegenden Projekt wurde das Wind- und Turbulenzfeld nicht mit LASAT ermittelt, sondern mit MISKAM eine Windfeldbibliothek für LASAT erstellt (Abschnitt 8.1.1). Zum Antrieb der Ausbreitungsrechnungen im jeweiligen Modellgebiet wurden die in Abschnitt 6.3 beschriebenen AKTerm, d. h. die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsstärke des DWD, verwendet. Auf Basis dieser Antriebs-Zeitreihen und der mit MISKAM erstellten Windfeldbibliothek wurde dann mit LASAT die Ausbreitung modelliert.

Mögliche Eingangsdaten für die Berechnungen sind die Bebauungsgeometrie im Modellgebiet, meteorologische Daten als Zeitreihe oder Ausbreitungsstärkenstatistik sowie die zu berücksichtigenden Emissionen im Modellgebiet. Emissionen können als Punkt-, Linien-, Flächen-, Raster- und Volumenquellen

angegeben und mit Freisetzungseigenschaften, z. B. Winkel, Geschwindigkeitsstreuung und Abklingfunktion, versehen werden. Abgasfahnenüberhöhungen können über gängige Eingangsdaten wie Wärmestrom oder Volumenstrom und Temperatur berücksichtigt werden. Sowohl die meteorologischen Daten als auch die Quellstärken der einzelnen Quellorte können als Zeitreihe vorgegeben werden. Die Ergebnisse werden für jeden Zeitschritt der Zeitreihe berechnet und können beliebig aggregiert ausgegeben werden, so dass Aussagen sowohl zu Kurzzeitkennwerten als auch zu Jahresmittelwerte direkt aus den Ergebnissen abgeleitet werden können. Die verkehrserzeugte Turbulenz im Straßenraum wird in LASAT als Eigenschaft der Emissionsquelle parametrisiert und nimmt mit Abstand von der Quelle ab.

Wie MISKAM wurde auch LASAT für die Simulation der Ausbreitung nicht-reaktiver Substanzen entwickelt und kann nur chemische Umsetzungen erster Ordnung für Einzelstoffe simulieren. Da NO_2 eine chemisch reaktive Substanz ist, werden entsprechende Ausbreitungsrechnungen auch mit LASAT zunächst für NO_x durchgeführt. Die Ableitung der NO_2 -Belastung findet dann extern im Postprocessing (Abschnitt 8.7) statt.

8.1.2.2 Eingangsdaten

Meteorologische Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung mit LASAT sind die mit MISKAM erstellten Wind- und Turbulenzfelder in Form einer Windfelddbibliothek sowie als Antrieb die in Abschnitt 6.3 beschriebenen AKTerm des DWD. Dazu wurde eine Drehung der in den AKTerm enthaltenen Windrichtungen analog zur Drehung der Modellgebietsgeometrien gemäß Abschnitt 8.1.1.2 vorgenommen. Als Bodenrauigkeit wurde der Wert von $z_0=20$ cm aus der MISKAM-Rechnung (Abschnitt 8.1.1.2) übernommen.

Die Erstellung der Windfelddbibliothek auf Basis der mit MISKAM erzeugten Wind- und Turbulenzfelder (Abschnitt 8.1.1) erfolgte für jedes Modellgebiet unter Verwendung der von Letzel et al. (2012) empfohlenen Turbulenzkopplung.

Für die Ausbreitungsrechnungen mit LASAT wurde das Grenzschichtmodell in der Version 2.6 verwendet, das konform zu AUSTAL2000 (Janicke, 2014) ist.

Es wurden die Emissionen der BHKW, der Spitzenlastkessel, der zu ersetzenden Gas- und Ölheizkessel sowie des Straßenverkehrs berücksichtigt. Dabei wurden die Emissionen nicht nur im Untersuchungsgebiet, sondern bis zu einem Abstand von 300 m um das Untersuchungsgebiet herum berücksichtigt, um Randeffekte im Untersuchungsgebiet zu minimieren (Abschnitt 8.5). Berechnet wurden die Stoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC , für Kfz nur NO_x . Für jede der vier Quellgruppen wurde eine eigene zeitliche Verteilung in Form einer Jahresganglinie vorgegeben. Die Jahresganglinien der BHKW und der Spitzenlastkessel wurden dabei aus den entsprechenden Ganglinien des Wärmebedarfs nach Abschnitt 6.7.2 abgeleitet. Die Jahresganglinie der vermiedenen Emissionen ergibt sich aus der Summe der Ganglinien für die BHKW und die Spitzenlastkessel, da dies der Wärmebedarf ist, der gedeckt werden muss, entweder durch BHKW und Spitzenlastkessel oder durch Gas- bzw. Ölheizkessel. Die Jahresganglinie des Verkehrs beruht auf Verkehrsganglinien des Bayerischen Emissionskatasters (IER, 2005).

Um die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen trotz der unterschiedlichen Ganglinien der vier Quellgruppen über alle Szenarien skalierbar zu halten, wurden die Emissionen der vier Quellgruppen in der Ausbreitungsrechnung getrennt behandelt. Die Verortung und Verteilung der Emissionen im Modellgebiet ist in Abschnitt 8.2 dargestellt.

8.2 Verortung und Verteilung der Emissionen in den Modellgebieten

Die Emissionen durch BHKW, Spitzenlastkessel und zu ersetzende Gas- bzw. Ölheizkessel wurden an den Schornsteinen der emissionsrelevanten Gebäude verortet. Es wurde im Hinblick auf die Skalierbarkeit der Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen davon ausgegangen, dass jeder Schornstein die anteilig gleiche Zusammensetzung aus BHKW-, Spitzenlast- und vermiedenen Emissionen ausstößt. Als Schornsteinposi-

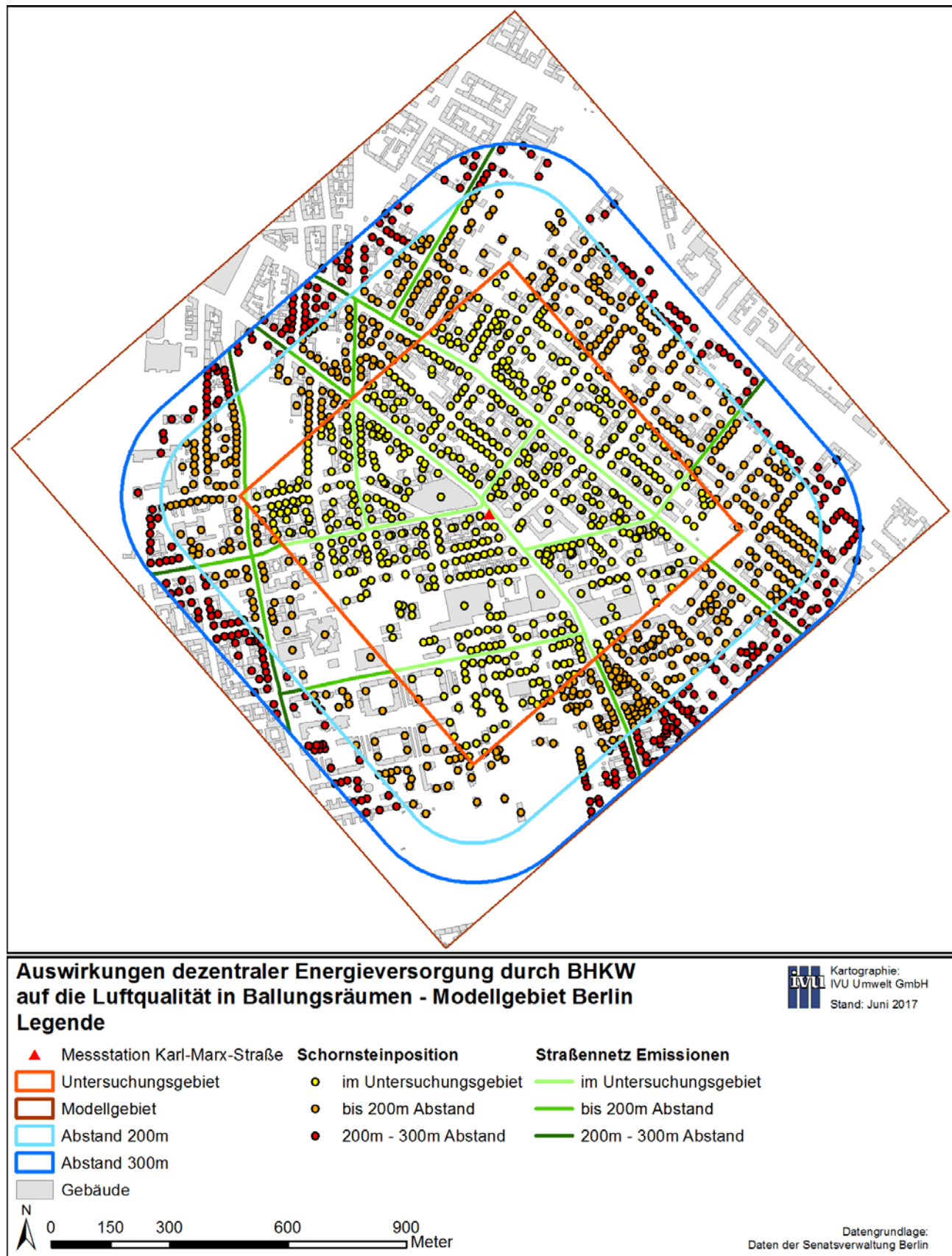
tionen wurden die Schwerpunkte der Gebäudegrundflächen verwendet. Die Positionen wurden im GIS überprüft und falls erforderlich, z. B. bei L- und U-förmigen Gebäuden, händisch korrigiert.

Als Schornsteinhöhe wurde die Gebäudehöhe + 1.0 m angesetzt, für Gebäude mit einer Höhe unter 7 m wurde die Schornsteinhöhe zu Gebäudehöhe + 0.5 m festgelegt. Als Gebäudehöhe wurde dabei der Wert verwendet, der sich aus der Darstellung des jeweiligen Gebäudes im MISKAM-Modellgitter ergibt. Grund dafür ist, dass die Gebäudehöhen durch die Auflösung im Modellgitter an die Schichtgrenze angepasst werden, und die Verwendung der tatsächlichen Gebäudehöhen zur Bestimmung der Schornsteinhöhen dazu führen kann, dass der Quellpunkt in der Gitterauflösung des Modells im Gebäude liegt. Für Gebäude mit einer Höhe unter 7 m ist Gebäudehöhe + 1.0 m ggf. zu hoch, denn je nach vertikaler Schichtung des Modellgitters, das in Bodennähe feiner aufgelöst ist als weiter oben, wird damit eine Schichtgrenze getroffen. Insofern wurde für diese Gebäude eine Festlegung der Schornsteinhöhe auf Gebäudehöhe + 0.5 m vorgezogen. Eine eventuelle Abgasfahnenüberhöhung bei der aus den Schornsteinen austretenden Abluft wurde analog zu Baumbach et al. (2010) im Sinne einer konservativen Betrachtung vernachlässigt. Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3 zeigen die Schornsteinpositionen für die drei Modellgebiete.

Die Emissionen des Straßenverkehrs sind entlang der in Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3 eingezeichneten Straßenachsen über die jeweils zugeordnete Straßenbreite verteilt verortet. Die Lage der Straßen im Verhältnis zu den Gebäudemodellen wurde geprüft und ggf. korrigiert.

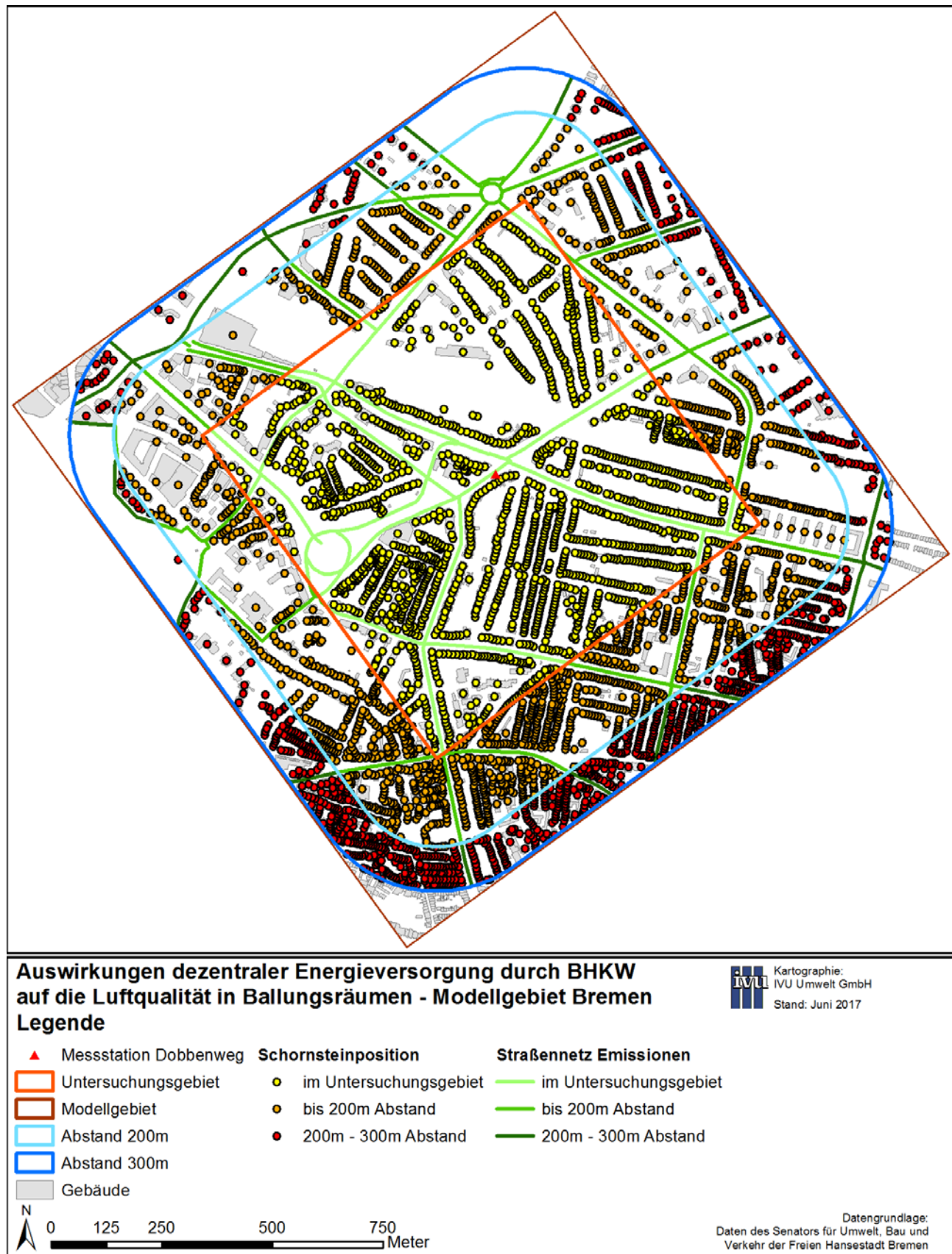
Im Rahmen der Modellierung auf lokaler Ebene war als Nebenaspekt zu untersuchen, bis zu welchem Abstand vom Rand des Untersuchungsgebiets Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets die Immissionsverteilung im Untersuchungsgebiet beeinflussen (Abschnitt 8.3). Dazu wurden die BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets in zwei Ringen von 200 m bzw. 100 m Breite getrennt von den Emissionen im Untersuchungsgebiet in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt (Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3).

Abbildung 8-1: Verortung der Emissionen im Modellgebiet Berlin



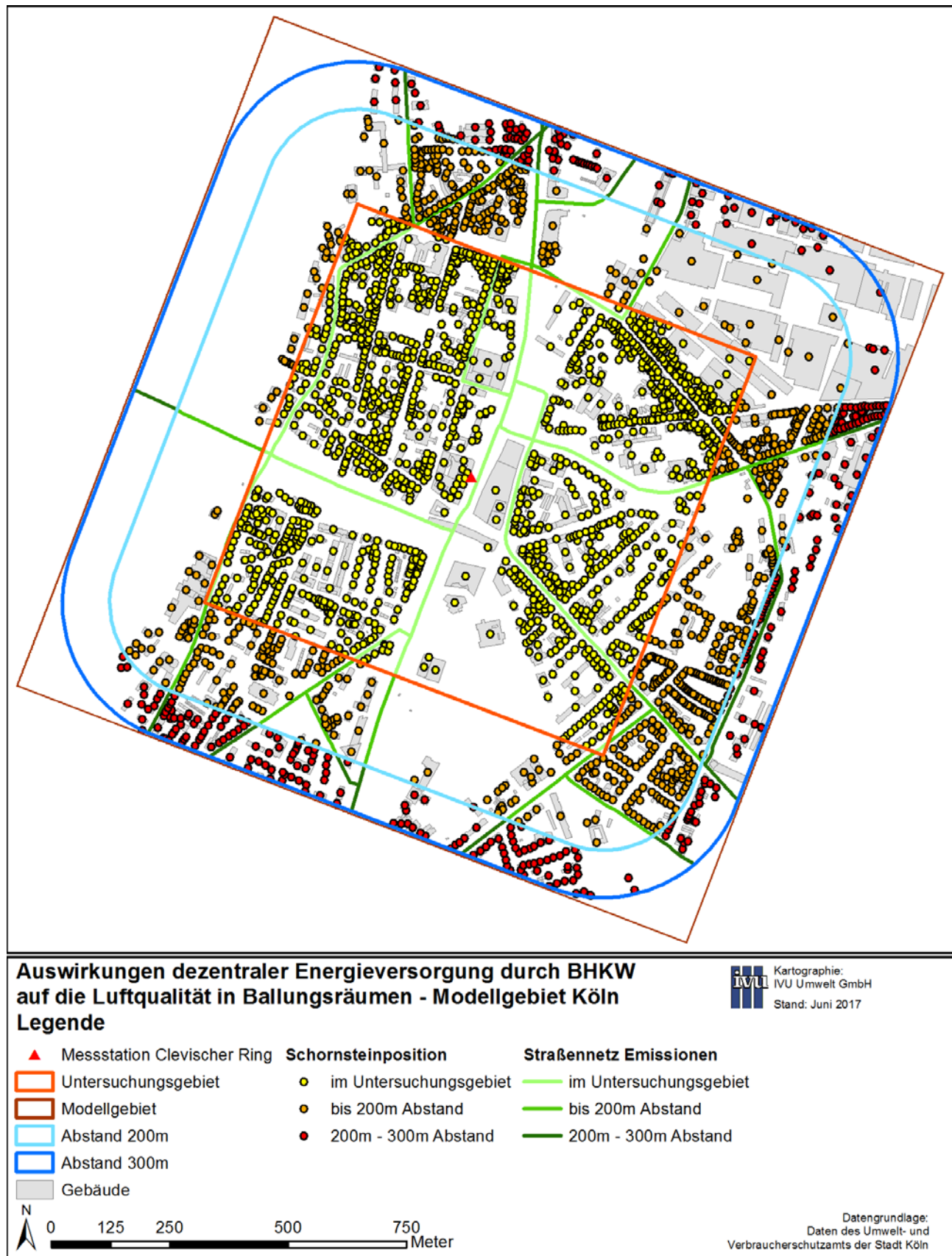
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-2: Verortung der Emissionen im Modellgebiet Bremen



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-3: Verortung der Emissionen im Modellgebiet Köln



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Die BHKW-, Spitzenlast- und vermiedenen Emissionen sind aus Abschnitt 6.5 als Emissionsmengen für die drei Untersuchungsgebiete bekannt, die aufgrund des Wärmebedarfs der Gebäude in den Untersuchungsgebieten ermittelt wurden. Um diese Emissionsmengen räumlich im Untersuchungsgebiet auf die Schornsteine zu verteilen, wurden drei mögliche Ansätze betrachtet:

- a) Gesamtemissionen gleichmäßig auf alle Schornsteine verteilen
- b) für jedes Gebäude den Anteil der Nettogrundfläche (NGF) an der Gesamt-Nettogrundfläche aller Gebäude bestimmen und als Verteilungsparameter verwenden
- c) für jedes Gebäude den Anteil des Wärmebedarfs am Gesamtwärmebedarf aller Gebäude bestimmen und als Verteilungsparameter verwenden

Ansatz a) wurde mit Blick auf die großen Unterschiede im Wärmebedarf der einzelnen Gebäude als zu ungenau verworfen. Ansatz c) führt auf die tatsächlichen Emissionen der Gebäude. Allerdings war eine explizite Ausbreitungsrechnung nur für Szenario 1a durchzuführen, und die Ergebnisse sollten durch Skalierung über das Verhältnis der Emissionsmengen auf die anderen Szenarien übertragen werden. Wird bei weiterer Variation der Szenarien in Abschnitt 9.1 der Energiestandard der Gebäude geändert, dann ändern sich die Anteile der einzelnen Gebäude an den Emissionen, und damit sind die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen auf diese Szenarien nicht mehr durch Skalierung übertragbar. Ansatz c) wurde daher ebenfalls verworfen.

Die Verteilung der Emissionen erfolgte im weiteren Verlauf nach Ansatz b) über die Anteile der Nettogrundfläche der einzelnen Gebäude an der Gesamt-Nettogrundfläche aller Gebäude im Untersuchungsgebiet. Dieser Ansatz liefert eine Verteilung der Emissionen, die konstant ist über alle Szenarien und die gleichzeitig für Szenario 1a hinreichend nahe an der Verteilung liegt, die sich nach Ansatz c) ergäbe.

Die zusätzlich erforderlichen Emissionsmengen für die Gebäude außerhalb des Untersuchungsgebiets wurden so gewählt, dass die Charakteristik der Emissionen im Untersuchungsgebiet hinsichtlich Höhe und Verteilung erhalten bleibt, um die Randeffekte im Untersuchungsgebiet zu minimieren. Dazu wurde die mittlere Emissionsdichte im jeweiligen Untersuchungsgebiet, bezogen auf das Gebäudevolumen im Untersuchungsgebiet, ermittelt. Die Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets berechneten sich dann pro Gebäude aus der volumenbezogenen Emissionsdichte und dem jeweiligen Gebäudevolumen.

Die Emissionen des Kfz-Verkehrs verteilen sich entlang der angegebenen Straßenachsen in- und außerhalb des Untersuchungsgebiets. Für die Kfz-Emissionen innerhalb des Untersuchungsgebiets ergeben sich die Emissionsmengen entsprechend Abschnitt 6.8.

8.3 Definition der Auswertungsflächen

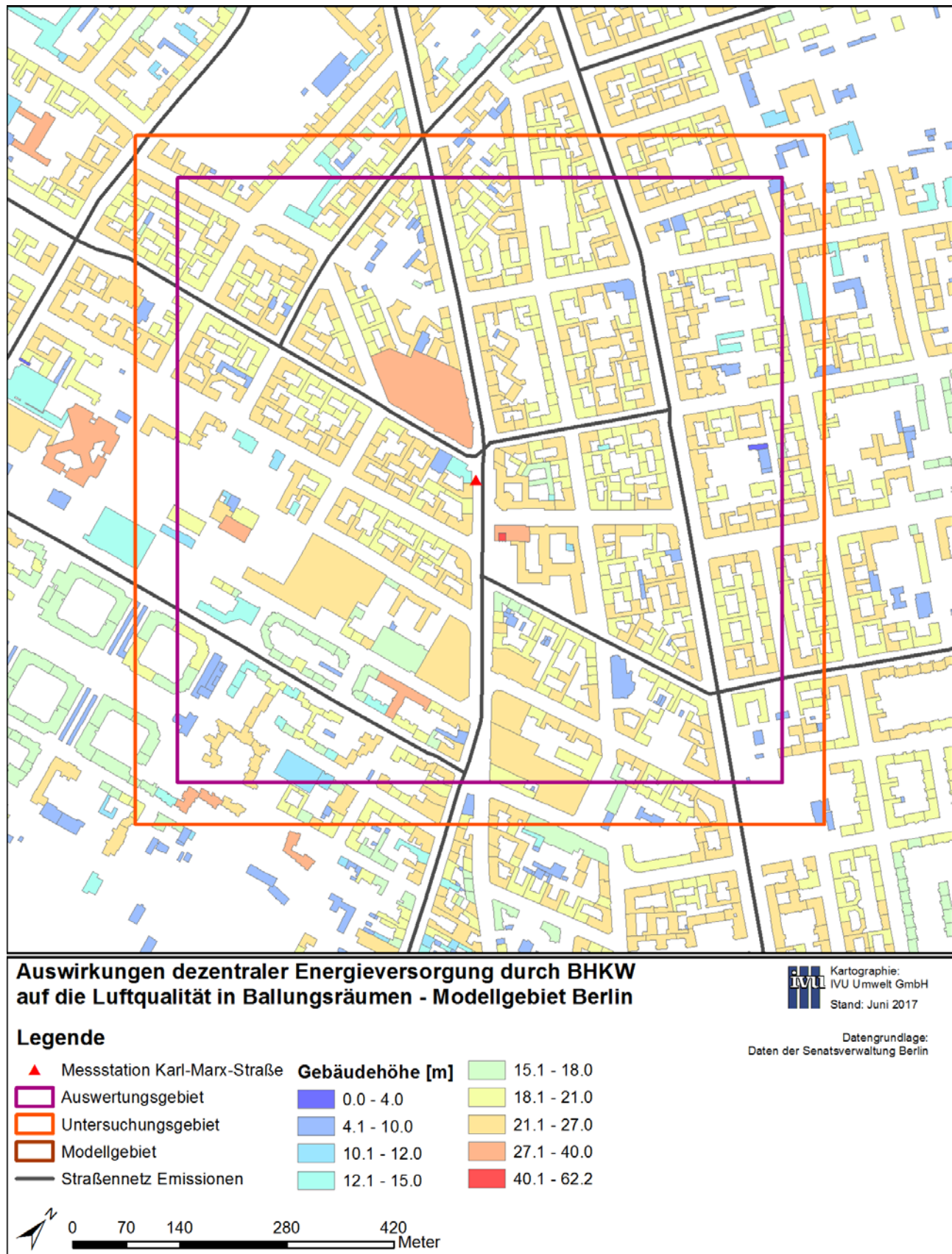
8.3.1 Bestimmung des Flächenmittels

Auf lokaler Modellgebietsebene waren im Rahmen des Projekts als Ergebnis der Ausbreitungsrechnungen grundsätzlich keine Konzentrationsverteilungen im Modellgebiet oder die Konzentration an einem bestimmten Punkt, z. B. an einer Messstation, auszuwerten, sondern Flächenmittelwerte, zum einen über das gesamte auszuwertende Gebiet und zum anderen über eine maximal beaufschlagte Fläche (MBF, Abschnitt 8.3.2). Als „gesamtes auszuwertendes Gebiet“ wird im Folgenden ein Auswertungsgebiet von knapp 800 m x 800 m definiert, das mittig innerhalb des Untersuchungsgebiets von knapp 900 m x 900 m liegt (Abbildung 8-4). Grund für die Definition dieses Auswertungsgebietes ist, dass die Ergebnisse von LASAT, das ein Lagrange'sches Partikelmodell ist (Abschnitt 8.1.2.1), mit einem statistischen Fehler behaftet sind, der im Randbereich größer ist als im Innern des Modellgebiets. Da die Emissionen hier für das Untersuchungsgebiet und die beiden äußeren Ringe getrennt gerechnet wurden, ist auch im Randbereich des

Untersuchungsgebietes mit etwas höheren statistischen Fehlern zu rechnen. Die Abmessungen des Auswertungsgebiets wurden so gewählt, dass der statistische Fehler der Modellergebnisse in der auszuwertenden Modellschicht 2.2 m - 3.0 m über Grund für BHKW unter 2 % und für Kfz-Verkehr unter 3 % liegt.

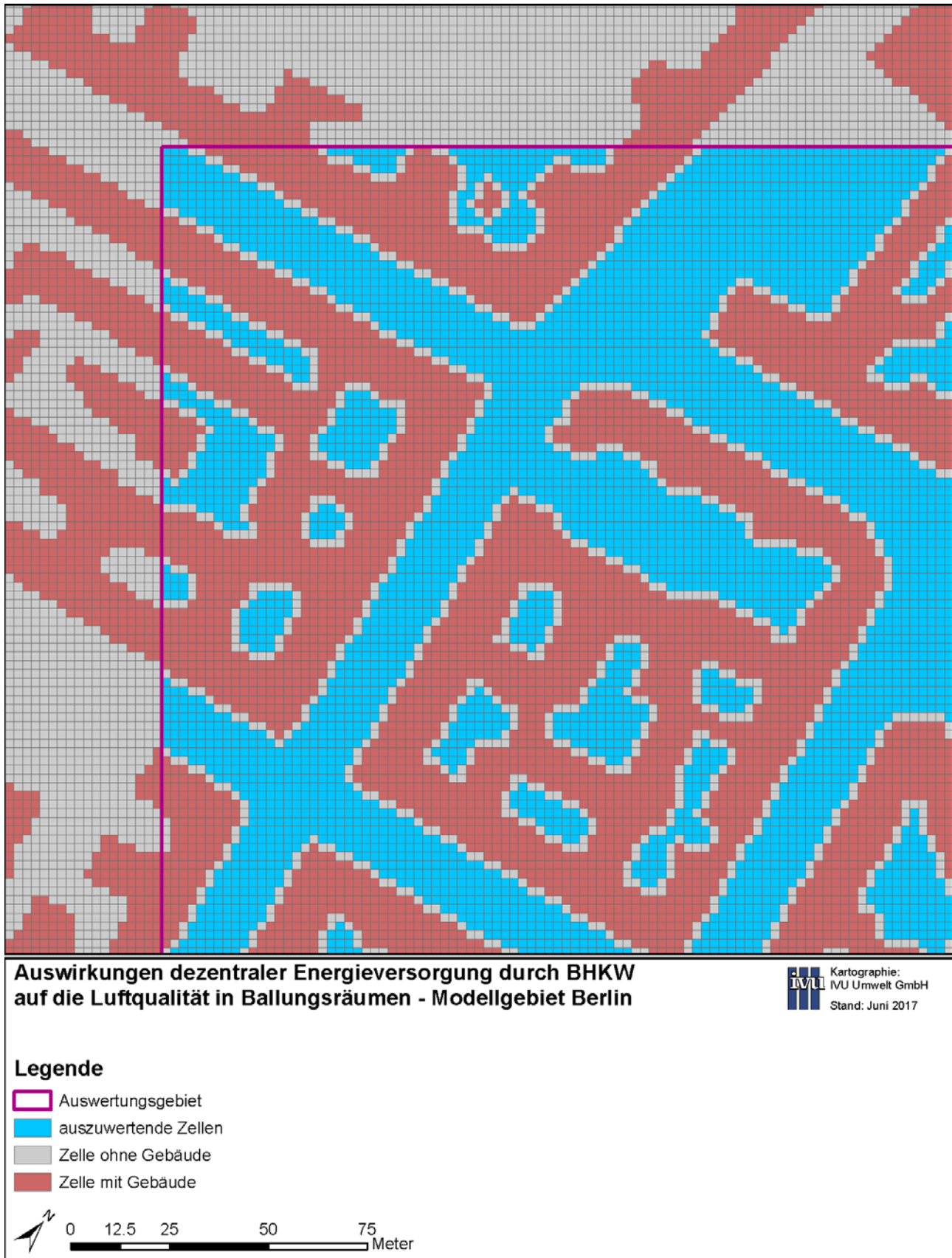
Das Flächenmittel der in der lokalen Ausbreitungsrechnung ermittelten Konzentrationsverteilung wurde dann als Mittelwert der berechneten Konzentrationen in den Gitterzellen innerhalb des Auswertungsgebiets in der auszuwertenden Modellschicht 2.2 m - 3.0 m über Grund bestimmt, und zwar sowohl für die aus BHKW-, Spitzenlastkessel- und vermiedenen Emissionen als auch für die aus dem Kfz-Verkehr resultierenden Konzentrationen. Dabei wurden Gitterzellen, die innerhalb eines Gebäudes liegen, nicht in die Berechnung des Flächenmittelwerts einbezogen (Abbildung 8-5). In Anlehnung an VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9 (KRdL, 2005) wurden auch Zellen, die direkt neben einem Gebäude liegen, nicht ausgewertet. Eine berechnete Konzentrationsverteilung, für die ein Flächenmittel bestimmt wurde, lag dabei nur für Szenario 1a vor, die Flächenmittel aller anderen Szenarien wurden über Skalierung mit dem Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum Szenario 1a bestimmt. Dies ist zulässig, da die Emissionsänderungen zwischen den Szenarien aufgrund des gewählten Verfahrens zur räumlichen Verteilung der Emissionen immer alle Quellorte (Schornsteinpositionen) im gleichen Maße betreffen. Die Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur lokalen Zusatzbelastung wurden dann für alle Szenarien als Summe der lokalen Immissionsbelastung durch BHKW- und der Spitzenlastkessel-Emissionen abzüglich der lokalen Immissionsbelastung durch die vermiedenen Emissionen der Wärmeerzeugung bestimmt. Die Kfz-Emissionen sind in allen Szenarien gleich.

Abbildung 8-4: Lage des Auswertungsgebiets am Beispiel des Modellgebiets Berlin



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-5: Auszuwertende Gitterzellen im Auswertungsgebiet am Beispiel des Modellgebiets Berlin



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

8.3.2 Methodik zur Festlegung der maximal beaufschlagten Fläche (MBF)

Gemäß 39. BImSchV, Anlage 3, Teil B 1.b) ist der Ort einer Probenahmestelle für den Verkehr so zu wählen, dass die Luftproben für die Luftqualität eines Straßenabschnitts von nicht weniger als 100 m Länge repräsentativ sind. Außerdem (39. BImSchV, Anlage 3, Teil C) müssen verkehrsbezogene Probenahmestellen mindestens 25 m vom Rand verkehrsreicher Kreuzungen und höchstens 10 m vom Fahrbahnrand entfernt sein.

Diese Vorgaben beziehen sich allerdings auf Probenahmestellen für den Verkehr in Straßenräumen, sie sind für eine Bewertung der viel gleichmäßiger über das Gebiet verteilten und ggf. auch auf Plätzen und in Innenhöfen relevanten Hausbrandemissionen³ nicht geeignet. Es wurde daher analog zu Baumbach et al. (2010) das Kriterium der 22. BImSchV, Anlage 2 I.a) herangezogen, um die Größe der maximal beaufschlagten Fläche (MBF) festzulegen. Demnach sollte die Probenahmestelle so gelegen sein, dass sie für die Luftqualität in einem umgebenden Bereich von mindestens 200 m² repräsentativ ist.

Darauf aufbauend wurden folgende Kriterien zur Definition der MBF festgelegt:

- Fläche von mindestens 200 m²: entspricht 42 Gitterzellen des LASAT-Modellgitters
- die Gitterzellen müssen zusammenhängen
- die Form der Fläche sollte bis zu einem gewissen Grad variabel sein, d. h. es sind nicht nur rechteckige Formen erlaubt, sondern auch unregelmäßige Formen, wie sie z. B. durch Hinterhöfe vorgegeben wird
- die Form der Fläche sollte möglichst eine konvexe⁴ Berandung aufweisen, sofern sie nicht durch Gebäudezellen festgelegt wird.

Zur Festlegung der MBF in Abhängigkeit von der Konzentrationsverteilung im Modellgebiet wurden vier mögliche Verfahren betrachtet, die im Folgenden beschrieben werden.

In Baumbach et al. (2010) wurden sogenannte Beurteilungsflächen durch 16 Gitterzellen abgebildet. Zur Verortung wurde das Modellgebiet in vier Gitterzellen breite Streifen geteilt und innerhalb jedes Streifens wurden unter Auslassung der Gebäudezellen sukzessive 16 Gitterzellen abgezählt. Damit lag eine feste Einteilung sich nicht überlappender Beurteilungsflächen vor. Es wurden dann die maximal und minimal beaufschlagten Beurteilungsflächen im Modellgebiet untersucht. Diese Vorgehensweise ist im vorliegenden Projekt nicht optimal, da diese Flächeneinteilung unabhängig von der Konzentrationsverteilung im Modellgebiet gebildet wird und die tatsächlich maximal beaufschlagte Fläche ggf. nicht von einer Beurteilungsfläche abgebildet wird, sondern sich über Teile mehrerer Beurteilungsflächen erstreckt.

Das in Baumbach et al. (2010) beschriebene Verfahren lässt sich verfeinern, indem die Rasterflächen immer nur um eine Gitterzelle nach Osten bzw. Norden verschoben werden, die so entstehenden Beurteilungsflächen sich mithin gegenseitig überlappen. Dies entspräche der Bildung eines gleitenden Mittels. Durch die ursprüngliche Vorgabe einer konstanten Anzahl von Gitterzellen für die Streifenbreite im ersten Schritt ist jedoch davon auszugehen, dass die entstehenden Formen ggf. nicht flexibel genug sind, um z. B. längliche Innenhöfe zu erfassen.

³ Als Hausbrandemissionen werden die Emissionen der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen bezeichnet. Im vorliegenden Kontext auf lokaler Ebene umfassen die Hausbrandemissionen die an den Schornsteinen der emissionsrelevanten Gebäude verorteten Emissionen durch BHKW, Spitzenlastkessel und Gas- bzw. Ölheizkessel.

⁴ Eine Fläche mit konvexer Berandung ist eine Fläche, für die gilt, dass alle geraden Verbindungen zwischen zwei beliebigen Punkten innerhalb dieser Fläche vollständig innerhalb dieser Fläche liegen

Eine dritte Möglichkeit zur Festlegung der MBF ist die Auswertung der Nachbarschaftsbeziehungen der Zellen in Abhängigkeit von der Höhe der Konzentrationswerte in den Zellen des Modellgitters. Ausgehend vom maximalen Konzentrationswert werden die umliegenden Gitterzellen abgesucht, insofern sie keine Gebäudezellen sind oder direkt neben einer Gebäudezelle liegen. Die Zellen mit den nächst kleineren Werten werden der MBF zugeordnet, es werden die nächst umliegenden Gitterzellen abgesucht usw., bis entweder eine MBF aus 42 Gitterzellen vervollständigt ist oder das Suchverfahren abgebrochen werden muss, weil z. B. der Innenhof, in dem die Suche mit dem Maximalwert begonnen wurde, kleiner ist als 42 Gitterzellen. In diesem Fall muss der nächste Maximalwert der Konzentrationsverteilung außerhalb dieses Innenhofs als Startwert für die Festlegung der MBF gesucht werden, dann werden wieder die umliegenden Gitterzellen abgesucht usw., bis abschließend eine MBF gefunden ist. Dieses Verfahren wurde als zu aufwendig bewertet, da neben der Programmierung umfangreiche Tests erforderlich sind und es fraglich ist, ob damit überhaupt befriedigende Flächen gefunden werden, denn neben der Einschränkung durch die Gebäudezellen müssen auch die oben aufgeführten Vorgaben zur Form der gefundenen MBF berücksichtigt werden.

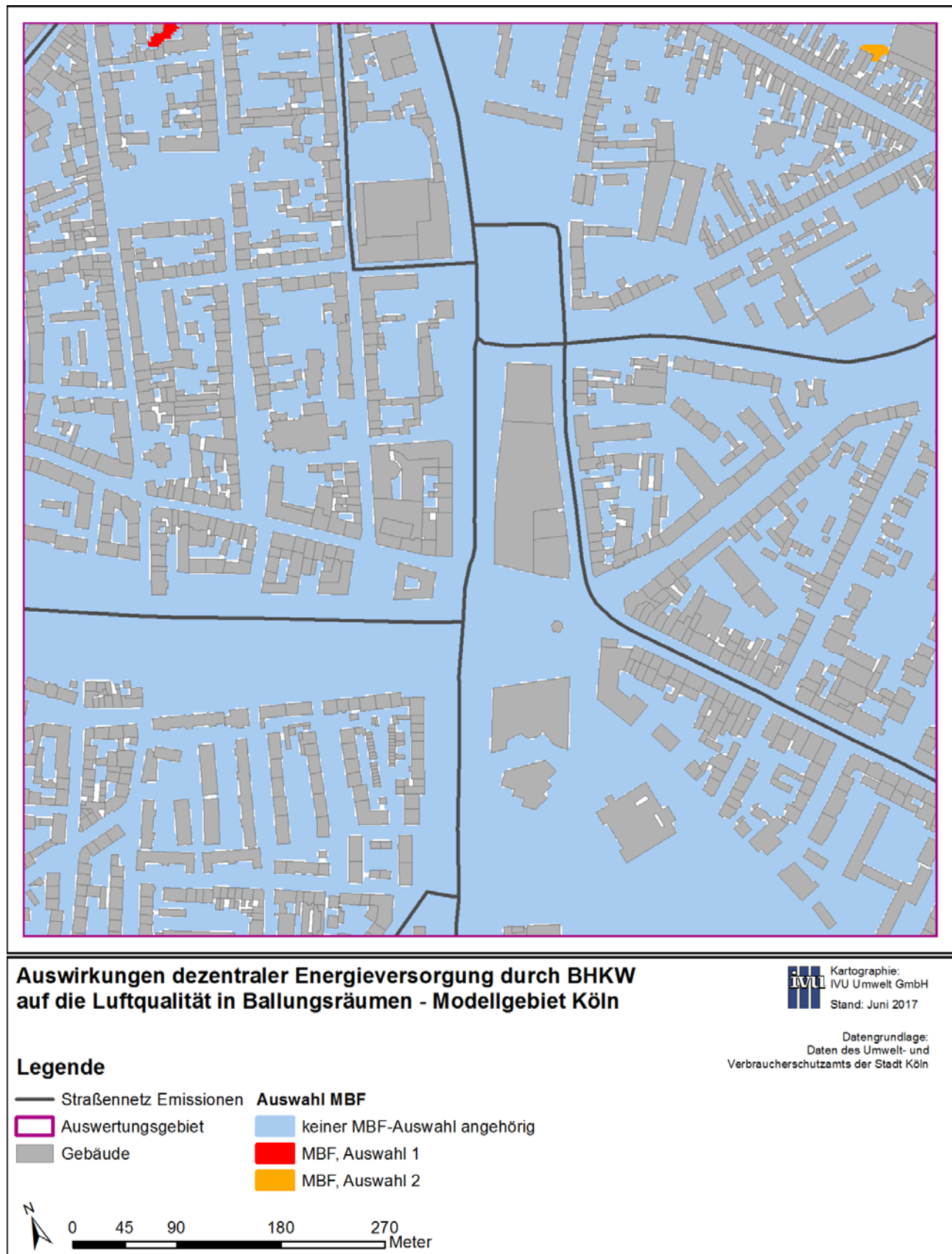
Es wurde daher ein viertes, GIS-unterstütztes Verfahren eingesetzt, um die MBF festzulegen. Dazu wurden zunächst im GIS die 50 Gitterzellen ausgewählt, die die 50 höchsten Konzentrationswerte im Auswertungsgebiet aufweisen. In der Regel clustern diese 50 höchsten Werte bereits in zwei oder drei Bereichen. Anschließend wurde die Lage der Auswahl wie folgt bewertet:

- a) Bereiche in Innenhöfen mit weniger als 42 Zellen aussortieren
- b) verbliebene Bereiche getrennt markieren, ggf. mit den umliegenden nächsthöheren Konzentrationswerten auf 42 Gitterzellen auffüllen
- c) für jeden der verbliebenen Bereiche den Mittelwert der Konzentration bestimmen
- d) Bereich mit dem höchsten Mittelwert verwenden.

Ziel des Projektes ist es abzuschätzen, welche maximalen zusätzlichen Belastungen der Luftqualität durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen zu erwarten sind. Das beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der MBF wurde für alle drei Modellgebiete und für jede der drei betrachteten meteorologischen Zeitreihen (AKTerm) auf Basis der Konzentrationsverteilungen durchgeführt, die aus den BHKW-bedingten Emissionsänderungen resultieren. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die MBF nicht ändern, wenn die Szenarien durchskaliert werden, d. h. die Festlegung wurde auf Basis der Konzentrationsverteilung im Szenario 1a getroffen. Weiterhin erfolgte die Festlegung auf Basis der Konzentrationsverteilung für NO_x als dem relevantesten der betrachteten Schadstoffe (für PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ sind die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau durchgängig negativ, Abschnitt 6.5.5). Abbildung 8-6 zeigt das Vorgehen beispielhaft für das Modellgebiet Köln unter Verwendung der AKTerm Berlin. Auf Basis der Vorauswahl der 50 Gitterzellen mit den höchsten Konzentrationswerten ergaben sich zwei mögliche Auswahlbereiche, hier rot und orange markiert, von denen der rot markierte Bereich 1 als MBF ausgewählt wurde, weil er den höheren Mittelwert der Konzentrationen aufwies.

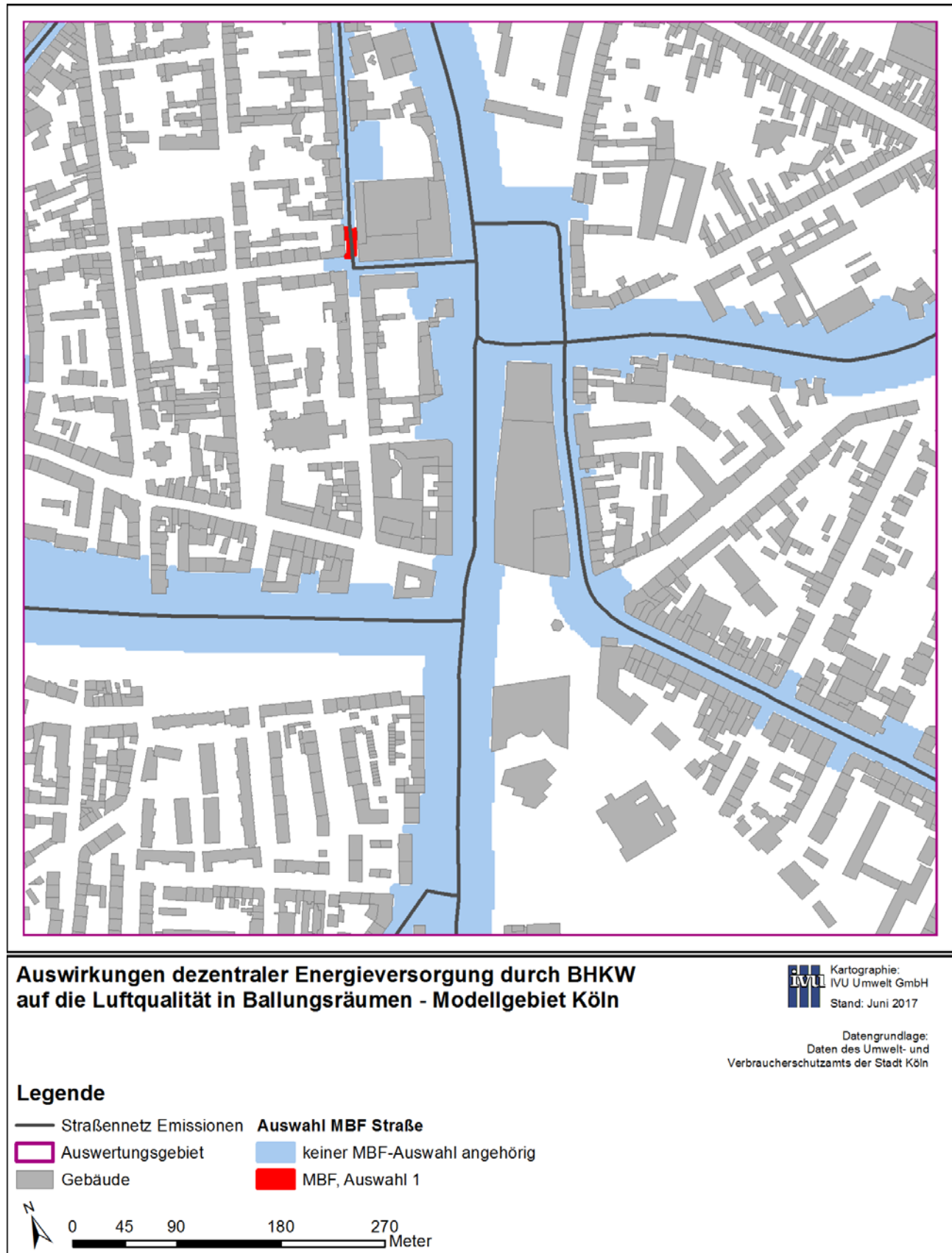
Die so bestimmten MBF liegen in der Regel in einem Innenhof. Kritische Gesamtkonzentrationen ergeben sich aber eher im Straßenraum, wo die Belastung durch die Emissionen des Kfz-Verkehrs bereits hoch ist. Aus diesem Grund wurde eine zweite MBF im Straßenraum definiert, die im Folgenden als „MBF Straße“ bezeichnet wird. Dazu wurde das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der MBF ausschließlich auf die Gitterzellen angewendet, die in einem Straßenraum liegen, für den in der Ausbreitungsrechnung auch Kfz-Emissionen vorliegen. Basis der Festlegung waren wie zuvor die Konzentrationsverteilungen, die aus den BHKW-bedingten Emissionsänderungen resultieren. Abbildung 8-7 zeigt das Vorgehen beispielhaft für das Modellgebiet Köln unter Verwendung der AKTerm Berlin. Dargestellt sind nur die Gitterzellen im Straßenraum mit Kfz-Emissionen, die Auswahl der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum (MBF Straße, rot markiert) ist hier eindeutig.

Abbildung 8-6: Auswahl der maximal beaufschlagten Fläche (MBF) am Beispiel Köln



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-7: Auswahl der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum (MBF Straße) am Beispiel Köln



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

8.4 Einfluss der Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets auf das Untersuchungsgebiet

Ohne Berücksichtigung des Eintrages von Schadstoffen in ein Modellgebiet werden am Rand der modellierten Konzentrationsverteilung geringere Konzentrationen beobachtet. Aus diesem Grund ist bei der Ausbreitungsmodellierung i. d. R. das Gebiet, für das Daten vorliegen und für das modelliert wird (Modellgebiet), größer als das Gebiet, für das die Modellergebnisse ausgewertet werden (Untersuchungsgebiet, hier: Auswertungsgebiet), und die Gebietsgrenzen werden so gewählt, dass die für die Auswertung relevanten Bereiche (z. B. die Messstation) möglichst in der Gebietsmitte liegen.

Im Rahmen der Modellierung auf lokaler Ebene war als Nebenaspekt zu untersuchen, wie Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets die Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet beeinflussen bzw. wie weit Quellen um das Untersuchungsgebiet mit dem Modellgebiet erfasst werden müssen, damit dieser Einfluss im Untersuchungsgebiet selbst vernachlässigbar klein ist. Diese Fragestellung ist insbesondere dann von Interesse, wenn sich die Auswertung der Ergebnisse nicht hauptsächlich auf einen Hot Spot mit stark lokalisierter Quelle wie den Kfz-Verkehr am Ort der maximalen Immission konzentriert, wie dies bei verkehrlichen Untersuchungen häufig der Fall ist, sondern auf einen größeren Bereich von ggf. mehreren 100 m, wie dies im vorliegenden Projekt mit seinen im ganzen Untersuchungsgebiet verteilten Hausbrand-Quellen der Fall ist.

Zu diesem Zweck wurden die Emissionen (sowohl BHKW-, Spitzenlastkessel- und vermiedene Emissionen als auch Kfz-Emissionen) in der Ausbreitungsrechnung getrennt behandelt für das Untersuchungsgebiet, für das die BHKW-Emissionen auf Basis des Wärmebedarfs ermittelt wurden, für einen Ring von 200 m Breite um das Untersuchungsgebiet herum und für einen zweiten Ring von 100 m Breite um den ersten Ring herum. Die Ringe sind in Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3 farblich markiert.

Die Untersuchungen wurden auf Basis von Szenario 1a (hohe Abschätzung der Emissionsfaktoren für BHKW, Gasheizkessel werden ersetzt) für die Modellschicht 2.2 m – 3.0 m über Grund durchgeführt. Für dieses Szenario liegt für alle drei Modellgebiete und alle drei betrachteten meteorologischen Zeitreihen (AKTerm) eine räumliche Verteilung der Konzentrationen im Modellgebiet in der Gitterauflösung der Modellrechnung vor.

Abbildung 8-8, oben links, zeigt beispielhaft den Jahresmittelwert der BHKW-bedingten NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Berlin bei Verwendung der AKTerm Berlin sowie aller Hausbrand-Quellen im Modellgebiet entsprechend Abbildung 8-1. Dargestellt ist der Bereich des Auswertungsgebiets von knapp 800 m x 800 m entsprechend Abschnitt 8.3.1.

Dem gegenüber gestellt ist in Abbildung 8-8, oben rechts, die entsprechende NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau, die sich ergibt, wenn nicht alle Hausbrand-Quellen aus Abbildung 8-1 verwendet werden, sondern nur diejenigen innerhalb des Untersuchungsgebiets. In Abbildung 8-8, unten links und unten rechts, sind die relativen Beiträge dargestellt, die sich im Auswertungsgebiet ergeben, wenn die durch den BHKW-Ausbau im Ring 0 m – 200 m (unten links) bzw. im Ring 200 m – 300 m (unten rechts) hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderungen ins Verhältnis gesetzt werden zu den durch alle Hausbrand-Quellen im Modellgebiet hervorgerufene NO_x -Immissionsänderungen.

Entscheidend für den Einfluss der Emissionen in diesen Ringen auf die Immissionsbelastung im Untersuchungsgebiet ist dabei nicht, ob sie einen Anteil an der Immissionsbelastung im Untersuchungsgebiet haben, sondern ob dieser Anteil einen Gradienten zum Rand des Untersuchungsgebiets hin aufweist. Grundsätzlich steigen natürlich die Konzentrationen im Untersuchungsgebiet mit zunehmender Größe des Modellgebiets bis zu einer, i. d. R. unbekannten, Sättigungsgrenze an, weil umso mehr Masse im System ist, je mehr Emissionsquellen berücksichtigt werden. Dieser Effekt des generellen Niveauanstiegs bei mehr Quellen wird bei der Berechnung der Gesamtbelastung durch Addition einer Hintergrundbelastung erfasst. Weist der Anteil des Beitrags von Quellen außerhalb des

Untersuchungsgebiets hingegen im Untersuchungsgebiet einen Gradienten zum Rand hin auf, so ist dies ein Hinweis, dass die zugehörigen Quellen bei der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt werden sollten.

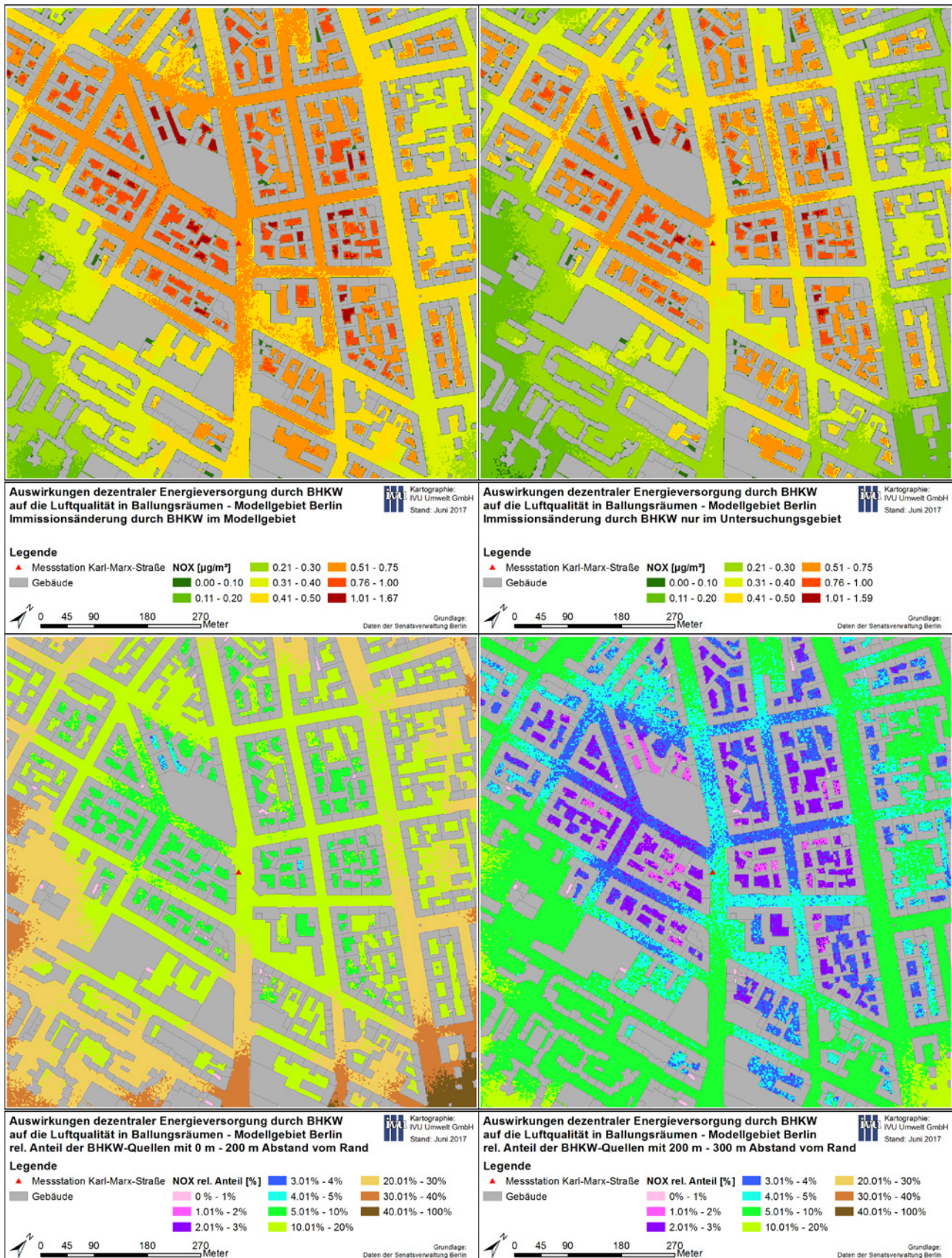
Der relative Anteil der NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau im Ring 0 m – 200 m an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung (Abbildung 8-8, unten links) beträgt zwischen 4 % und rund 50 % und ist durch einen deutlichen Gradienten vom Rand hin zur Mitte geprägt. Für die NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau im Ring 200 m – 300 m (Abbildung 8-8, unten rechts) beträgt der relative Anteil 1 % bis rund 15 %, er weist ebenfalls einen Gradienten vom Rand zur Mitte hin auf, der Gradient ist jedoch deutlich schwächer als im Ring 0 m – 200 m.

Abbildung 8-9 und Abbildung 8-10 enthalten zu Abbildung 8-8 analoge Darstellungen der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau bei Verwendung der AKTerm Berlin für die Auswertungsgebiete Bremen und Köln. Hier zeigt sich grundsätzlich ein ähnliches Bild wie für das Auswertungsgebiet Berlin. Die NO_x -Immissionsänderungen im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau im Ring 0 m – 200 m haben in allen Fällen einen deutlichen Anteil von großflächig 10 % bis 30 % an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung, und der Anteil hat einen deutlichen Gradienten zum Rand hin. Für die NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau im Ring 200 m – 300 m ist der Gradient deutlich schwächer. Der relative Anteil beträgt großflächig 5 % bis 10 % an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung. In Bremen (Abbildung 8-9, unten) ist insbesondere der minimale Anteil der NO_x -Immissionsänderungen im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau außerhalb des Untersuchungsgebiets deutlich höher als für die Auswertungsgebiete Berlin oder Köln, er liegt für den Ring 0 m – 200 m bei 7 % und für den Ring 200 m – 300 m bei 2 %. In Köln hingegen ist der Bereich mit den geringeren Anteilen der NO_x -Immissionsänderungen im Auswertungsgebiet durch den BHKW-Ausbau außerhalb des Untersuchungsgebiets im Gegensatz zu Berlin nach Westen verschoben. Grund dafür ist, dass das Modellgebiet Köln außerhalb des Untersuchungsgebiets im Westen keine Emissionen der hier betrachteten Quellgruppen BHKW und Kfz aufweist, da dort der Rhein vorbeifließt.

Abbildung 8-11 enthält ebenfalls eine Darstellung, die analog zu Abbildung 8-8 aufgebaut ist. Sie zeigt wieder das Auswertungsgebiet Berlin, zeigt aber die NO_x -Zusatzbelastung durch die lokalen Kfz-Emissionen (Abbildung 8-11, oben) bzw. den Anteil, der sich für die durch die Kfz-Emissionen im Ring 0 m – 200 m (unten links) bzw. im Ring 200 m – 300 m (unten rechts) hervorgerufene NO_x -Zusatzbelastung bezogen auf die durch alle Kfz-Quellen im Modellgebiet hervorgerufene NO_x -Zusatzbelastung ergibt. Die Verteilung sowohl der Kfz-bedingten NO_x -Zusatzbelastung selbst als auch der Anteile der außerhalb liegenden Kfz-Emissionen an der Kfz-bedingten NO_x -Zusatzbelastung im Auswertungsgebiet ist deutlicher gegliedert als bei der BHKW-bedingten NO_x -Immissionsänderung. Grund dafür ist u. a., dass die Kfz-Quellen stärker emittieren, und auch, dass sich die Verteilung der Emissionen auf die Fahrbahnen konzentriert, während die Emissionen der Hausbrand-Quellen eher flächendeckend verteilt sind. Zudem liegt die ausgewertete Modellschicht in 2.2 m – 3.0 m Höhe über Grund deutlich dichter an der Kfz-Quellen als an den Hausbrand-Quellen.

Die relativen Anteile der NO_x -Zusatzbelastung im Auswertungsgebiet durch Kfz-Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets an der durch alle Kfz-Quellen im Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Zusatzbelastung zeigen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten wie die entsprechenden Anteile der NO_x -Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau, mit großflächig Anteilen von 10 % bis 30 % für Emissionen aus dem Ring 0 m – 200 m und von 4 % bis 10 % für Emissionen aus dem Ring 200 m – 300 m. Entlang des Hauptstraßennetzes, in dem die Kfz-Quellen liegen, ist der Anteil der Kfz-Emissionen von außerhalb des Untersuchungsgebiets jedoch deutlich geringer, und auch der Gradient zum Rand hin ist deutlich geringer.

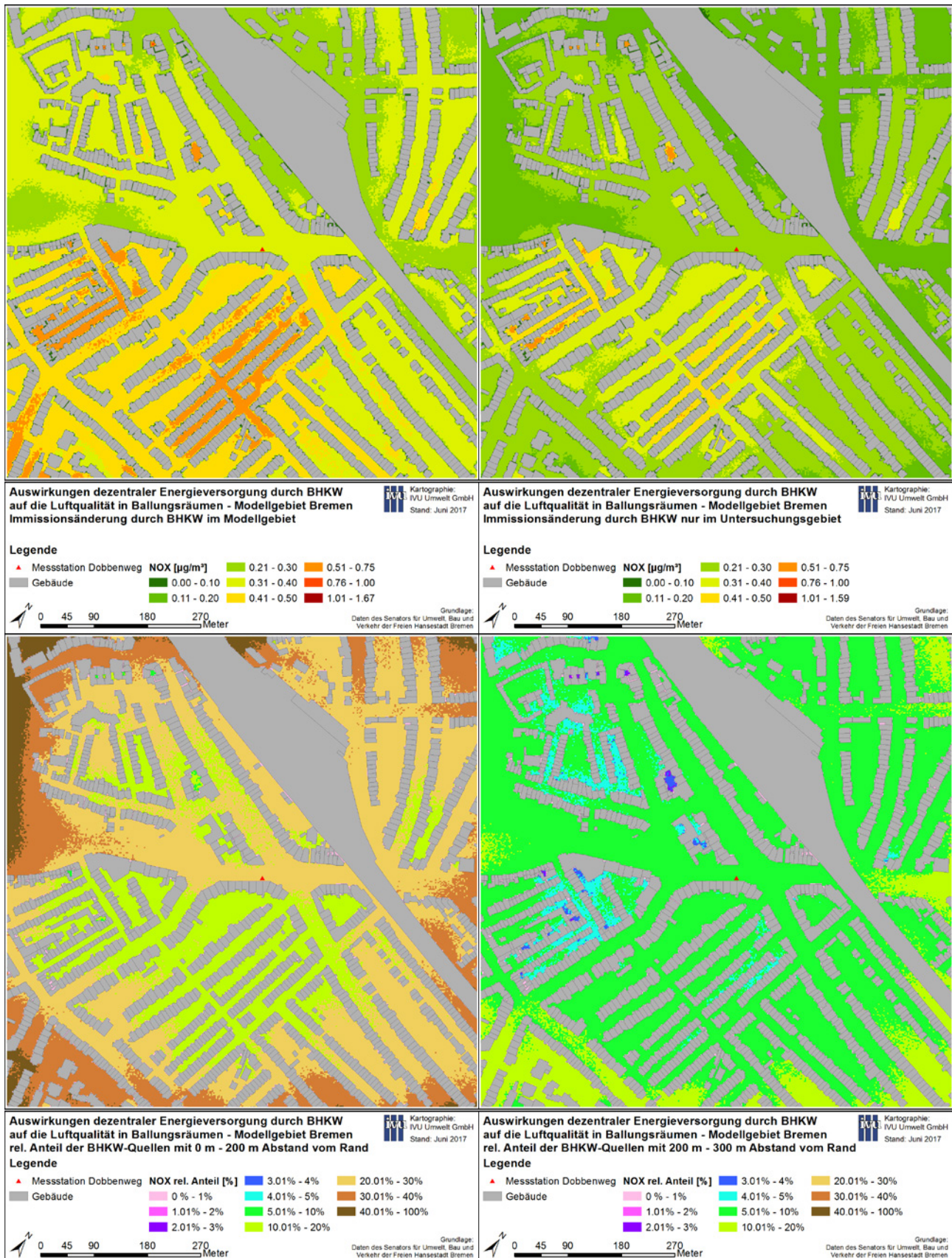
Abbildung 8-8: BHKW-bedingte NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Berlin, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

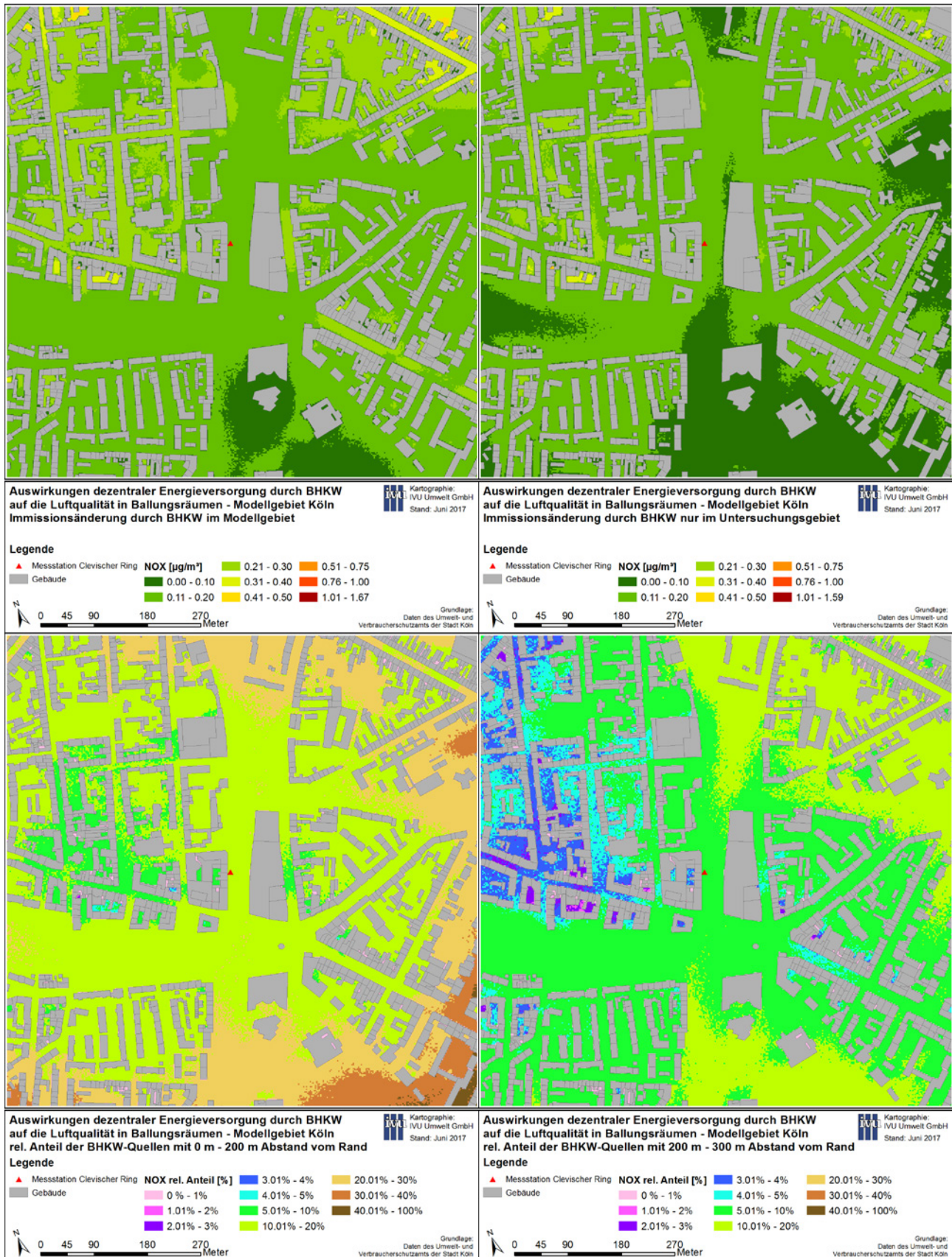
Abbildung 8-9: BHKW-bedingte NO_x-Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Bremen, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

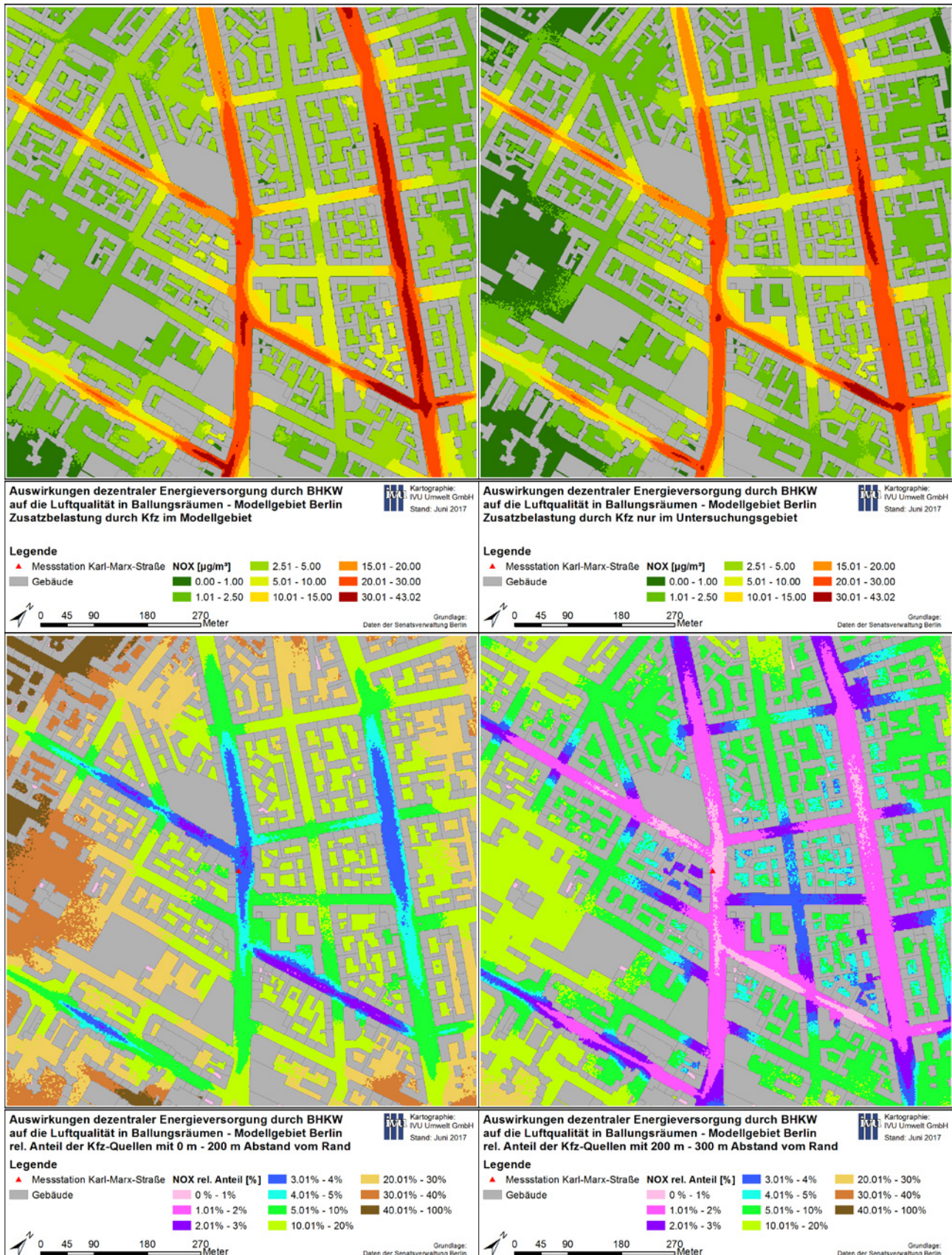
Abbildung 8-10: BHKW-bedingte NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet Köln, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand



Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen

Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-11: NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen im Auswertungsgebiet Berlin, mit allen Quellen (oben links), Quellen nur im Untersuchungsgebiet (oben rechts), relativer Anteil der Quellen bis 200 m Abstand (unten links) und mit 200 m - 300 m Abstand (unten rechts) vom Rand



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

In Tabelle 8-1 sind für alle drei Auswertungsgebiete und alle drei betrachteten AKTerm die minimalen und maximalen Anteile der durch den BHKW-Ausbau außerhalb des Untersuchungsgebiets hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung aufgeführt, getrennt nach den beiden Ringen 0 m – 200 m und 200 m – 300 m. Diese Werte sind natürlich zum Teil sehr lokal in einem Innenhof oder vereinzelt ganz am Rand des Auswertungsgebiets gelegen und können daher nur einen Anhaltspunkt über den Gradienten des Anteils im Auswertungsgebiet geben. Dennoch geben sie – zusammen mit den Darstellungen in Abbildung 8-8 bis Abbildung 8-10 - eine deutliche Tendenz wieder. Demnach sollte für Hausbrand-Quellen das Modellgebiet in jede Richtung auf jeden Fall mindestens 200 m, wenn möglich 300 m größer sein als das Untersuchungsgebiet.

Tabelle 8-2 zeigt die gleiche Auswertung für die Anteile der NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets an der durch alle Kfz-Quellen im Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Zusatzbelastung. Hier fallen zunächst die gegenüber der Auswertung für die BHKW-bedingten NO_x -Immissionsänderungen höheren Maximalwerte der Anteile auf. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass bei der Bewertung von Fragestellungen, die den Kfz-Verkehr betreffen, vor allem der Straßenraum relevant ist, in dem emittiert wird, und hier zeigen die Darstellungen in Abbildung 8-11, unten, dass die Gradienten der Anteile im relevanten Straßenraum deutlich geringer ausfallen als im restlichen Auswertungsgebiet. Insgesamt sollte aber auch für Kfz-Quellen das Modellgebiet in jede Richtung mindestens 200 m, besser 300 m größer sein als das Untersuchungsgebiet.

Ähnliche Untersuchungen für das Modellgebiet Berlin in IVU Umwelt (2017b) zeigen, dass der relative Anteil der NO_x -Zusatzbelastung, die durch weiter außen liegenden Emissionen (300 m – 400 m) hervorgerufen wird, an der durch alle Quellen im Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Zusatzbelastung keinen nennenswerten Gradienten im Auswertungsgebiet mehr zeigt.

Tabelle 8-1: Minimale und maximale Anteile der durch den BHKW-Ausbau außerhalb des Untersuchungsgebiets hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung im Auswertungsgebiet an der durch den BHKW-Ausbau im gesamten Modellgebiet hervorgerufenen NO_x -Immissionsänderung (Szenario 1a)

Modellgebiet	AKTerm	0 m - 200 m		200 m - 300 m	
		min [%]	max [%]	min [%]	max [%]
Berlin	Berlin	3.5 %	52.3 %	1.0 %	15.4 %
	Bremen	2.8 %	48.4 %	1.0 %	15.1 %
	Köln	2.9 %	58.0 %	1.0 %	16.4 %
Bremen	Berlin	7.1 %	56.5 %	2.2 %	14.3 %
	Bremen	7.2 %	59.4 %	1.8 %	15.2 %
	Köln	5.7 %	50.8 %	1.9 %	16.3 %
Köln	Berlin	1.9 %	46.4 %	0.9 %	17.4 %
	Bremen	2.2 %	47.0 %	0.9 %	18.4 %
	Köln	2.0 %	53.3 %	0.8 %	19.8 %

Tabelle 8-2: Minimale und maximale Anteile der NO_x-Zusatzbelastung im Auswertungsgebiet durch Kfz-Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets an der durch alle Kfz-Quellen im Modellgebiet hervorgerufenen NO_x-Zusatzbelastung (Szenario 1a)

Modellgebiet	AKTerm	0 m - 200 m		200 m - 300 m	
		min [%]	max [%]	min [%]	max [%]
Berlin	Berlin	1.9 %	66.9 %	0.6 %	25.0 %
	Bremen	1.8 %	67.8 %	0.6 %	25.6 %
	Köln	1.8 %	60.8 %	0.7 %	23.6 %
Bremen	Berlin	1.2 %	68.1 %	0.6 %	20.7 %
	Bremen	1.3 %	65.1 %	0.6 %	19.7 %
	Köln	1.1 %	70.2 %	0.6 %	19.1 %
Köln	Berlin	1.3 %	56.1 %	0.5 %	17.2 %
	Bremen	1.2 %	54.4 %	0.5 %	19.4 %
	Köln	1.2 %	57.1 %	0.5 %	23.0 %

8.5 Abschätzung des Beitrags der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau

8.5.1 Allgemeines

Die gesamte Immissionsänderung durch den Einsatz von Mini-BHKW in Ballungsräumen setzt sich zusammen aus dem regionalen und dem lokalen Beitrag der Mini-BHKW zur Luftschadstoffbelastung. Zur Bestimmung des regionalen Beitrags der Mini-BHKW wurden die RCG-Ausbreitungsrechnungen auf nationaler Ebene in Abschnitt 7 durchgeführt. Der regionale Beitrag wurde dort berechnet als Differenz aus den Modellergebnissen für die acht nationalen Szenarien entsprechend Tabelle 5-1 und dem Basisszenario APS2020. Der lokale Beitrag ergibt sich aus den nach Abschnitt 8.3 ausgewerteten Modellergebnissen der lokalen LASAT-Ausbreitungsrechnungen für die Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln.

Werden die beiden Beiträge zur gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau aggregiert, so ist zu beachten, dass die lokal im Modellgebiet angesetzten BHKW-, Spitzenlast- und vermiedenen Emissionen bereits auf nationaler Ebene in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt wurden. Um eine Doppelzählung dieser Emissionsbeiträge zu vermeiden, ist der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau abzuschätzen und bei der Aggregation zur gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zu berücksichtigen. Der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau ist dabei gleichzeitig ein Beitrag zum regionalen Hintergrund.

Zur Abschätzung des Beitrags der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau wurden zwei Ansätze verfolgt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Es wurden zusätzliche Ausbreitungsrechnungen durchgeführt, und zwar zum einen auf lokaler Modellgebietsebene (Abschnitt 8.5.2) und zum anderen für sechs mit dem Auftraggeber abgestimmte Szenarien auf nationaler Ebene (Abschnitt 8.5.3). Dabei wurden neben den BHKW-, Spitzenlast- und vermiedenen Emissionen auch die Kfz-Emissionen berücksichtigt, da diese ebenfalls in der lokalen LASAT-Ausbreitungsrechnung enthalten sind.

8.5.2 Ausbreitungsrechnungen mit LASAT

Ausbreitungsrechnungen zur Abschätzung des Beitrags der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung werden üblicherweise in der Auflösung durchgeführt, in der auch der regionale Hintergrund bestimmt wurde.

Um dieses Vorgehen mit LASAT zu simulieren, wurden die LASAT-Ausbreitungsrechnungen für die drei Modellgebiete aus Abschnitt 8.2 wiederholt, und zwar mit den gleichen Abmessungen und den gleichen Emissionen (BHKW-, Spitzenlastkessel-, vermiedene und Kfz-Emissionen) in der gleichen räumlichen und zeitlichen Verteilung. Allerdings wurde die Bebauung weggelassen und stattdessen eine entsprechend höhere Rauigkeit im Modellgebiet angesetzt und die zugehörige Anemometerhöhe angepasst. Die Modellergebnisse wurden nicht nur über das Auswertungsgebiet gemittelt, sondern auch über alle Schichten bis in 25 m Höhe. Dies entspricht der Dicke der untersten Modellschicht in RCG, deren Ergebnisse für den regionalen Hintergrund verwendet wurden.

Die LASAT-Ausbreitungsrechnungen zur Abschätzung des Beitrags der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau bzw. zum regionalen Hintergrund wurden für alle drei Modellgebiete mit allen drei verfügbaren meteorologischen Zeitreihen (AKTerm) durchgeführt. Die über das Auswertungsgebiet und alle Schichten bis 25 m Höhe gemittelten Ergebnisse wurden für die lokalen Szenarien des BHKW-Ausbaus nach Abbildung 5-46 durch Skalierung über das Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum modellierten Szenario 1a bestimmt. Die Immissionen durch den Kfz-Verkehr sind in allen Szenarien gleich. Diese Ergebnisse stellen den auf lokaler Modellgebietsebene bestimmten Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau bzw. zum regionalen Hintergrund dar. Sie werden in Abschnitt 8.5.4 diskutiert.

8.5.3 Ausbreitungsrechnungen mit RCG

Mit dem Auftraggeber wurden sechs Szenarien aus Abbildung 5-46 abgestimmt, für die der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau mit RCG abgeschätzt wurde. Dabei handelt es sich um die Szenarien 1a, 1b, 3a, 5b, 6b und 8b. Dabei ist 1a das Ausgangsszenario, 5b weist die höchsten NO_x-Emissionszunahmen durch den BHKW-Ausbau auf und 8b weist die höchsten NO_x-(und PM₁₀-) Emissionsminderungen durch den BHKW-Ausbau auf.

Die lokal im Modellgebiet angesetzten BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen (Tabelle 8-3 bis Tabelle 8-5) wurden für die betrachteten Szenarien in die Emissionsdaten des RCG-Modells in den ausgewählten Gitterzellen Berlin, Bremen und Köln eingearbeitet. Mit diesem modifizierten Datensatz wurde die Ausbreitungsrechnung für die ausgewählten Szenarien wiederholt. Der Beitrag der lokalen BHKW-bedingten Emissionsänderungen sowie der lokalen Kfz-Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung in der betreffenden lokalen Gitterzelle ergibt sich damit aus der Differenz der Immissionen aus dem Szenario-Lauf mit allen BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen entsprechend Tabelle 5-1 und dem Szenario-Lauf ohne die lokalen BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen bzw. Kfz-Emissionen.

Tabelle 8-3: BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Berlin

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	1 437.5	-7.5	-4.5	-4.5	119.6
hoch	Gas	1b	2 903.0	-14.9	-9.0	-9.0	241.3
niedrig	Gas	3a	227.1	-7.5	-4.5	-4.5	54.8
Maximalszenario							
hoch	Gas	5b	11 612.0	-59.7	-35.8	-35.8	965.1
hoch	Öl	6b	8 367.8	-10 728.7	-221.3	-221.3	777.7
niedrig	Öl	8b	-1 389.2	-10 728.7	-221.3	-221.3	255.2
Kfz-Emissionen							
--	--	alle	14 164.2	43.3	2 126.0	928.6	10 292.5 ¹
¹ : für Kfz: NMHC							

Tabelle 8-4: BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Bremen

Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	1 397.6	-7.3	-4.4	-4.4	116.3
hoch	Gas	1b	2 822.5	-14.5	-8.7	-8.7	234.6
niedrig	Gas	3a	220.8	-7.3	-4.4	-4.4	53.3
Maximalszenario							
hoch	Gas	5b	11 290.2	-58.1	-34.8	-34.8	938.3
hoch	Öl	6b	8 135.9	-10 431.4	-215.1	-215.1	756.2
niedrig	Öl	8b	-1 350.7	-10 431.4	-215.1	-215.1	248.1
Kfz-Emissionen							
--	--	alle	14 994.9	49.0	2 732.0	1 181.9	4 470.9 ¹
¹ : für Kfz: NMHC							

Tabelle 8-5: BHKW-Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Szenarien und Kfz-Emissionen im Modellgebiet Köln

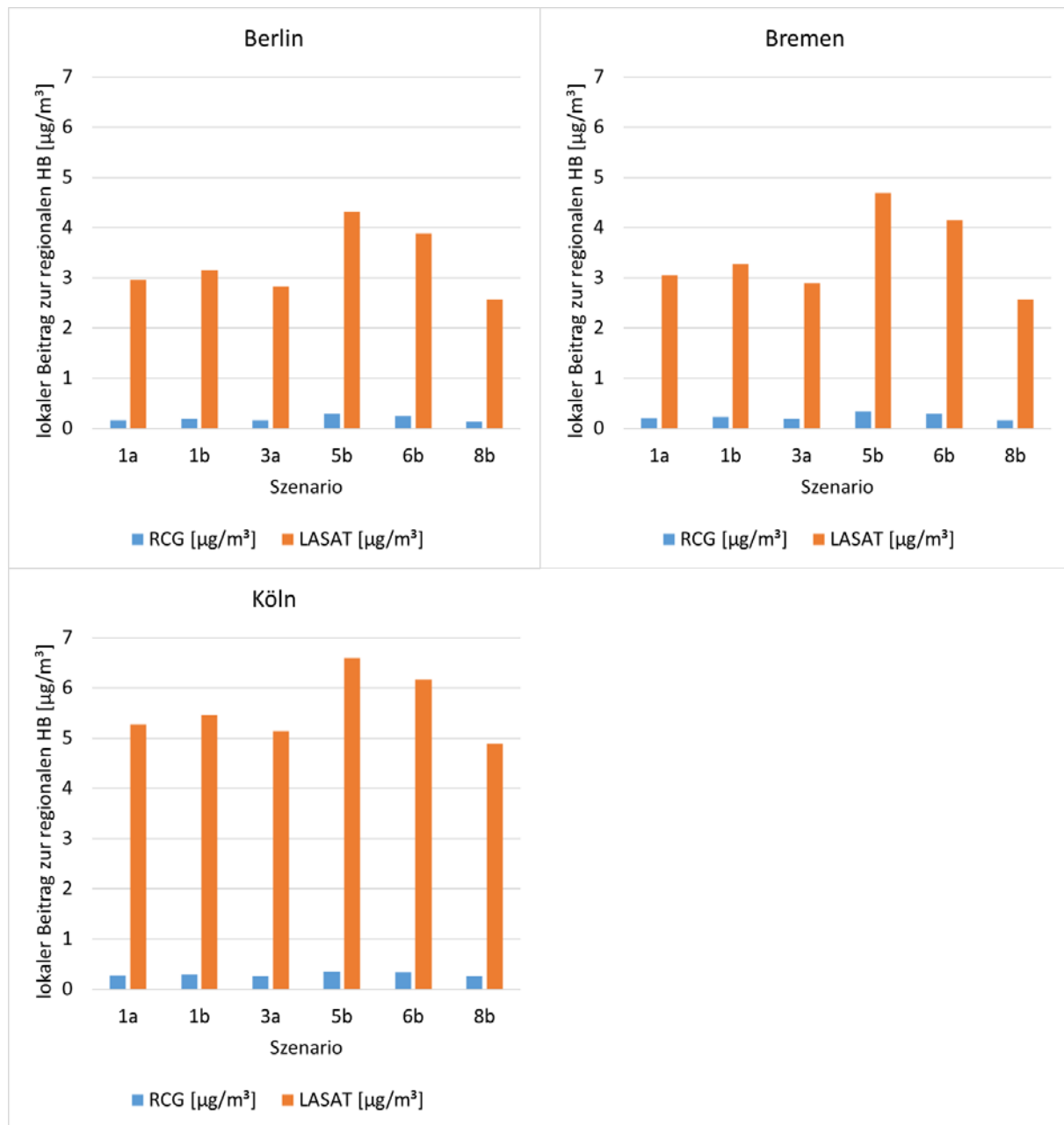
Emissionsfaktoren BHKW	vermiedene Emissionen	Szenario	NO _x [kg/a]	SO ₂ [kg/a]	PM10 [kg/a]	PM2.5 [kg/a]	NMVOC [kg/a]
Minimalszenario							
hoch	Gas	1a	817.0	-4.2	-2.5	-2.5	68.0
hoch	Gas	1b	1 650.0	-8.5	-5.1	-5.1	137.1
niedrig	Gas	3a	129.1	-4.2	-2.5	-2.5	31.2
Maximalszenario							
hoch	Gas	5b	6 600.2	-33.9	-20.4	-20.4	548.6
hoch	Öl	6b	4 756.2	-6 098.1	-125.8	-125.8	442.1
niedrig	Öl	8b	-789.6	-6 098.1	-125.8	-125.8	145.1
Kfz-Emissionen							
--	--	alle	17 772.3	53.9	3 501.7	1 088.8	5 542.1 ¹
¹ : für Kfz: NMHC							

8.5.4 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Abbildung 8-12 zeigt am Beispiel NO_x die mit RCG und mit LASAT ermittelten Beiträge der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung für die drei Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln. Für RCG wurde dabei die Differenz zwischen Konzentration im Ursprungsszenario entsprechend Tabelle 5-1 und Konzentration nach Einarbeitung der lokalen Emissionen entsprechend Tabelle 8-3 bis Tabelle 8-5 in derjenigen Gitterzelle ausgewertet, in der das jeweilige Modellgebiet lokalisiert ist. Verglichen werden die Beiträge sowohl der lokalen Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau als auch der lokalen Emissionen des Kfz-Verkehrs, da beide Quellgruppen in der lokalen Ausbreitungsrechnung mit LASAT berücksichtigt sind. In Tabelle 8-6 sind die zugehörigen Zahlenwerte der Beiträge für die beiden Modellansätze aufgeführt zusammen mit dem Faktor, der sich aus dem Verhältnis des LASAT-Beitrags zum RCG-Beitrag ergibt.

Sowohl aus Abbildung 8-12 als auch aus Tabelle 8-6 ist ersichtlich, dass der mit LASAT abgeschätzte Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung deutlich höher liegt als der entsprechende Wert aus der RCG-Rechnung, und zwar um einen Faktor rund 14 bis 20, je nach Modellgebiet und Szenario. Wesentlicher Grund dafür ist, dass bei den LASAT-Ausbreitungsrechnungen nach Abschnitt 8.5.2 zwar die Modellschichthöhe an das RCG-Gitter angepasst werden konnte, nicht aber die horizontale Ausdehnung des Modellgebiets. Die horizontale Auflösung des RCG-Gitters beträgt ca. 7 km x 8 km, d. h. ca. 56 km². Im Gegensatz dazu beträgt die horizontale Ausdehnung des LASAT-Modellgebiets 1.5 km x 1.5 km, d. h. 2.25 km², und ist damit um einen Faktor von knapp 25 kleiner als die zugehörige RCG-Gitterzelle. Dazu passt der Faktor von 14 bis 20 im Verhältnis der Ergebnisse der beiden Modellansätze, wenn man berücksichtigt, dass in RCG noch der Transport aus den Nachbarzellen in die jeweils betrachtete Zelle der lokalen Modellgebiete zum dort berechneten Konzentrationswert beiträgt. Der mit RCG berechnete Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung würde dem LASAT-Ergebnis weitgehend entsprechen, wenn man in RCG in der jeweiligen Gitterzelle nicht nur die Emissionen aus dem lokalen Modellgebiet einarbeiten würde, sondern diese Emissionen zuvor auf die Fläche der RCG-Gitterzelle hochrechnen würde. Die Ergebnisse beider Modellansätze sind also auf ihrer jeweiligen Skala als plausibel anzusehen.

Abbildung 8-12: Mit RCG und mit LASAT ermittelter Beitrag der lokalen NO_x-Emissionen (Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau und Kfz-Emissionen) zur regionalen NO_x-Hintergrundbelastung für die drei Modellgebiete



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Tabelle 8-6: Übersicht über die mit RCG und mit LASAT ermittelten Beiträge der lokalen NO_x-Emissionen zur regionalen NO_x-Hintergrundbelastung für die drei Modellgebiete (Emissionsänderungen durch BHKW-Ausbau und Kfz-Emissionen)

	NO _x RCG [µg/m ³]	NO _x LASAT [µg/m ³]	Faktor LASAT / RCG
Berlin			
1a	0.17	2.96	17.4
1b	0.19	3.16	16.6
3a	0.16	2.83	17.7
5b	0.29	4.33	14.9
6b	0.24	3.89	16.2
8b	0.14	2.58	18.4
Bremen			
1a	0.21	3.04	14.5
1b	0.23	3.28	14.3
3a	0.19	2.89	15.2
5b	0.34	4.69	13.8
6b	0.29	4.15	14.3
8b	0.17	2.57	15.1
Köln			
1a	0.27	5.27	19.5
1b	0.29	5.47	18.8
3a	0.26	5.15	19.8
5b	0.35	6.60	18.9
6b	0.33	6.16	18.7
8b	0.25	4.89	19.6

Für die weitere Auswertung ist der mit RCG berechnete Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung relevant, da er auf der gleichen Skala berechnet wurde wie der regionale Hintergrund bzw. der regionale Beitrag der BHKW-bedingten Emissionsänderungen.

Dabei stellt der in Tabelle 8-6 ausgewiesene Beitrag den Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung für die BHKW-bedingten Emissionsänderungen und die Kfz-Emissionen dar. Über den Anteil der jeweiligen BHKW-Emissionsänderung an der Summe aus BHKW-Emissionsänderung und Kfz-Emissionen entsprechend Tabelle 8-3 bis Tabelle 8-5 kann daraus der Beitrag der BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur regionalen Hintergrundbelastung abgeleitet werden. Dieser beträgt für NO_x maximal 45 % der in Tabelle 8-6 aufgeführten Werte (Tabelle 8-3, Szenario 5b).

Insgesamt ist damit der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung und insbesondere der Beitrag der lokalen Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau als sehr gering einzustufen. Dies gilt analog für die anderen betrachteten Stoffe SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC.

8.6 Berechnung der durch BHKW verursachten Immissionsänderung für PM₁₀, PM_{2.5} und NO_x

8.6.1 Methodik

Die gesamte Immissionsänderung durch den Einsatz von Mini-BHKW in Ballungsräumen setzt sich grundsätzlich zusammen aus dem regionalen und dem lokalen Beitrag der Mini-BHKW zur Luftschadstoffbelastung.

Zur Bestimmung des regionalen Beitrags der Mini-BHKW wurden die RCG-Ausbreitungsrechnungen auf nationaler Ebene entsprechend Abschnitt 7 durchgeführt. Der regionale Beitrag wurde dort berechnet als Differenz aus den Modellergebnissen für die acht nationalen Szenarien entsprechend Tabelle 5-1 und dem Basisszenario APS2020.

Der lokale Beitrag der Mini-BHKW ergibt sich für Szenario 1a aus den nach Abschnitt 8.3 ausgewerteten Modellergebnissen der lokalen LASAT-Ausbreitungsrechnungen für die Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln. Dazu wurden pro Modellgebiet und AKTerm quellgruppenspezifisch für BHKW, Spitzenlastkessel, Gas- bzw. Ölheizkessel und zum Vergleich für Kfz Flächenmittel über die berechneten Konzentrationsverteilungen im Auswertungsgebiet sowie über die maximal beaufschlagte Fläche (MBF) und die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum (MBF Straße) gebildet. Zur Ermittlung des lokalen Beitrags der Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau wurden anschließend die Beiträge der BHKW und der Spitzenlastkessel aufsummiert, und der Beitrag der vermiedenen Emissionen von Gas- bzw. Ölheizkesseln wurde davon abgezogen.

Die entsprechenden Ergebnisse für die anderen 15 Szenarien nach Abbildung 5-46 wurden aus den Ergebnissen für Szenario 1a gewonnen, die quellgruppenweise (BHKW, Spitzenlastkessel, Gas- bzw. Ölheizkessel) über das Verhältnis der Emissionen des jeweiligen Szenarios zum Szenario 1a skaliert wurden. Die Ergebnisse für den lokalen Beitrag des Kfz-Verkehrs unterscheiden sich nach Modellgebiet und verwendeter AKTerm, bleiben aber über die 16 Szenarien konstant.

Werden die regionalen und die lokalen Beiträge der Mini-BHKW zur gesamten BHKW-bedingten Immissionsänderung aggregiert, so ist grundsätzlich zu beachten, dass die lokal im Modellgebiet angesetzten BHKW-, Spitzenlast-, vermiedenen und Kfz-Emissionen bereits auf nationaler Ebene in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt wurden. Um eine Doppelzählung dieser Emissionsbeiträge zu vermeiden, wurde in Abschnitt 8.5.4 der Beitrag der lokalen Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung bzw. zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau abgeschätzt.

Im konkreten Fall des hier beschriebenen Projekts liegen die regionalen Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in ganz Deutschland für alle betrachteten Stoffe und alle acht nationalen Szenarien zwischen $-0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und sind damit ausgesprochen gering. Auch relativ bezogen auf die sich aus dem APS2020 ergebenden Konzentrationen ergeben sich nur für SO₂ nennenswerte Anteile der regionalen Beiträge, dies jedoch bei niedrigen Ausgangskonzentrationen (Abschnitt 7.3). SO₂ wurde auch auf lokaler Ebene nicht weiter betrachtet.

Gleichzeitig ergeben sich bei der Aggregation der regionalen und der lokalen Beiträge Unsicherheiten, die daraus resultieren, dass die BHKW-bedingten Emissionsänderungen der lokalen LASAT-Rechnungen nicht konsistent sind mit der Differenz aus BHKW-Emissionen und vermiedenen Emissionen in der jeweils zum Modellgebiet gehörenden RCG-Gitterzelle. Die wesentlichen Gründe dafür sind, dass die vermiedenen Emissionen auf nationaler Ebene auch vermiedene Emissionen aus der Stromerzeugung beinhalten, die lokal nicht betrachtet werden, und dass damit die vermiedenen Emissionen national auch räumlich anders verteilt sind, da die Emissionen aus Stromerzeugung national in der Verursachergruppe Energiewirtschaft (SNAP 1) und nicht in der Verursachergruppe Kleinfeuerungsanlagen (SNAP 2) berücksichtigt wurden (Ab-

schnitt 7.2.3). Zudem ist davon auszugehen, dass sich die nationalen und die lokalen Emissionsganglinien unterscheiden.

In Anbetracht der genannten Unsicherheiten bei der Aggregation von regionalem und lokalem Beitrag sowie der absolut und relativ geringen Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen auf regionaler Ebene wurden diese bei der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt. Entsprechend wurden die Beiträge der lokalen BHKW-bedingten Emissionsänderungen zur regionalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau aus Abschnitt 8.5.4, die noch geringer sind, ebenfalls zu Null gesetzt. Damit wurde für die weiteren Auswertungen die gesamte Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in den Ballungsräumen gleich der lokalen Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in den Ballungsräumen gesetzt. Die Auswertungen erfolgen hier für die Stoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC. NO_2 als chemisch reaktive Substanz wird gesondert in Abschnitt 8.7 behandelt.

8.6.2 Ergebnisse und Vergleich mit der durch Kfz verursachten Zusatzbelastung

8.6.2.1 Modellgebiet Berlin

Tabelle 8-7 bis Tabelle 8-9 zeigen die Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Stoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC für das Untersuchungsgebiet Berlin, jeweils für eine der drei für die Ausbreitungsrechnungen herangezogenen AKTerm. Da die Emissionen und damit die Ergebnisse für PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ auf lokaler Ebene identisch sind, wird hier nur PM_{10} angegeben. In jeder Tabelle sind die Ergebnisse für das Flächenmittel über das Auswertungsgebiet, für die maximal beaufschlagte Fläche (MBF) und für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum (MBF Straße) wiedergegeben. Zusätzlich ist zum Vergleich die durch Kfz-Emissionen hervorgerufene lokale NO_x -Zusatzbelastung angegeben. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.2.

Bei Betrachtung der Werte in Tabelle 8-7 bis Tabelle 8-9 wird zunächst deutlich, dass die Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau erwartungsgemäß die höchsten Beträge aufweist für die maximal beaufschlagte Fläche, gefolgt von der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum und dann vom Flächenmittel über das Auswertungsgebiet. Dabei sind die Werte für die AKTerm Berlin (Tabelle 8-7) und Bremen (Tabelle 8-8) im Regelfall vergleichbar, während sich für die AKTerm Köln (Tabelle 8-9) betragsmäßig höhere Werte ergeben. Grund dafür sind im Wesentlichen die niedrigeren Windgeschwindigkeiten, die die AKTerm Köln im Vergleich zu den AKTerm Berlin und Bremen aufweist.

Die NO_x -Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in den meisten Fällen zu, nur für die Szenarien 4 und 8, die niedrige BHKW-Emissionsfaktoren und den Ersatz von Ölheizkesseln vorsehen, ergibt sich eine Abnahme der Immissionsbelastung durch den Einsatz der BHKW. Je nach Szenario erreicht die Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Flächenmittel bis zu 4 – 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. knapp 50 % der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht sie mit 6 – 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die MBF Straße auf Grund ihrer Definition auf Basis der Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau (Abschnitt 8.3.2) im Regelfall nicht im Bereich des verkehrlichen Hotspots lokalisiert ist und damit auch nicht die maximale Zusatzbelastung durch den Kfz-Verkehr im Untersuchungsgebiet wiedergibt. Dies gilt auch für das Untersuchungsgebiet Berlin, wobei sich die MBF Straße hier unweit der Messstation Karl-Marx-Straße in der Flughafenstraße befindet. Für die maximal beaufschlagte Fläche ist die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau mit 10 – 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle. Grund für die im Vergleich zu Kfz hohen Werte ist, dass die MBF im Regelfall in einem Hinterhof liegt, in dem kaum Kfz-bedingte Immissionen auftreten.

Insgesamt muss bei der Höhe der berechneten NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen berücksichtigt werden, dass die Kfz-Emissionen auf der Grundlage des HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) für das Jahr 2020 berechnet wurden und mittlerweile davon auszugehen ist, dass die im HBEFA 3.2 hinterlegte Prognose der

Emissionen für das Jahr 2020 zu optimistisch ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die berechneten NO_x -Emissionen des Kfz-Verkehrs die tatsächlichen NO_x -Emissionen im Jahr 2020 unterschätzen und somit das Verhältnis der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zur NO_x -Zusatzbelastung aus Kfz-Emissionen an dieser Stelle überschätzt wird.

Bei PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ führt der Einsatz der Mini-BHKW in allen Szenarien zu Abnahmen der Immissionsbelastung, da bei den BHKW selbst keine Partikel-Emissionen angesetzt wurden. Die Abnahmen sind aber in allen Fällen gering und erreichen maximal knapp $-0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Szenario 8b für die maximal beaufschlagte Fläche bei Verwendung der AKTerm Köln.

Die NMVOC-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in allen Fällen zu und erreicht je nach verwendeter AKTerm Maximalwerte von knapp $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Über alle Szenarien betrachtet, ergeben sich die höchsten Zunahmen der Immissionsbelastung durch den BHKW-Ausbau für NO_x und NMVOC im Szenario 5b, und für PM_{10} bzw. $\text{PM}_{2.5}$ ergeben sich die geringsten Abnahmen in den Szenarien 1a und 3a. Die größten Abnahmen bzw. geringsten Zunahmen für alle Stoffe ergeben sich für Szenario 8b und für PM_{10} bzw. $\text{PM}_{2.5}$ auch für Szenario 6b.

Tabelle 8-7: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Berlin

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.49	0.00	0.04	1.41	0.00	0.12	0.77	0.00	0.06
1b	0.98	0.00	0.08	2.84	-0.01	0.24	1.54	0.00	0.13
2a	0.35	-0.01	0.03	0.99	-0.03	0.09	0.55	-0.01	0.05
2b	0.70	-0.02	0.07	2.01	-0.06	0.19	1.12	-0.03	0.10
3a	0.08	0.00	0.02	0.22	0.00	0.05	0.12	0.00	0.03
3b	0.16	0.00	0.04	0.45	-0.01	0.11	0.25	0.00	0.06
4a	-0.06	-0.01	0.01	-0.19	-0.03	0.03	-0.09	-0.01	0.02
4b	-0.12	-0.02	0.02	-0.37	-0.06	0.06	-0.18	-0.03	0.03
5a	1.94	-0.01	0.16	5.63	-0.02	0.47	3.06	-0.01	0.25
5b	3.93	-0.01	0.33	11.37	-0.04	0.94	6.18	-0.02	0.51
6a	1.39	-0.04	0.13	3.97	-0.11	0.37	2.20	-0.06	0.20
6b	2.82	-0.08	0.26	8.06	-0.22	0.75	4.46	-0.12	0.41
7a	0.31	-0.01	0.07	0.89	-0.02	0.21	0.49	-0.01	0.12
7b	0.63	-0.01	0.15	1.82	-0.04	0.43	0.99	-0.02	0.24
8a	-0.25	-0.04	0.04	-0.76	-0.11	0.12	-0.37	-0.06	0.07
8b	-0.48	-0.08	0.09	-1.49	-0.22	0.24	-0.72	-0.12	0.14
Kfz	8.17	--	--	2.92	--	--	18.98	--	--

Tabelle 8-8: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Bremen

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.51	0.00	0.04	1.17	0.00	0.10	0.79	0.00	0.07
1b	1.03	0.00	0.09	2.37	-0.01	0.20	1.60	0.00	0.13
2a	0.36	-0.01	0.03	0.85	-0.02	0.08	0.57	-0.02	0.05
2b	0.74	-0.02	0.07	1.72	-0.04	0.16	1.15	-0.03	0.11
3a	0.08	0.00	0.02	0.19	0.00	0.04	0.13	0.00	0.03
3b	0.16	0.00	0.04	0.38	-0.01	0.09	0.26	0.00	0.06
4a	-0.06	-0.01	0.01	-0.14	-0.02	0.03	-0.09	-0.02	0.02
4b	-0.13	-0.02	0.02	-0.27	-0.04	0.05	-0.18	-0.03	0.04
5a	2.03	-0.01	0.17	4.69	-0.01	0.39	3.16	-0.01	0.26
5b	4.11	-0.01	0.34	9.47	-0.03	0.79	6.38	-0.02	0.53
6a	1.45	-0.04	0.14	3.39	-0.09	0.31	2.28	-0.06	0.21
6b	2.95	-0.08	0.27	6.87	-0.18	0.64	4.61	-0.12	0.43
7a	0.32	-0.01	0.08	0.75	-0.01	0.18	0.51	-0.01	0.12
7b	0.66	-0.01	0.16	1.53	-0.03	0.36	1.04	-0.02	0.24
8a	-0.26	-0.04	0.04	-0.55	-0.09	0.10	-0.38	-0.06	0.07
8b	-0.51	-0.08	0.09	-1.08	-0.18	0.21	-0.73	-0.12	0.14
Kfz	8.45	--	--	3.72	--	--	19.6	--	--

Tabelle 8-9: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin, AKTerm Köln

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]
1a	0.71	0.00	0.06	2.51	-0.01	0.21	1.21	0.00	0.10
1b	1.44	0.00	0.12	5.07	-0.02	0.42	2.45	-0.01	0.20
2a	0.51	-0.01	0.05	1.79	-0.05	0.17	0.87	-0.02	0.08
2b	1.03	-0.03	0.10	3.63	-0.10	0.34	1.76	-0.05	0.16
3a	0.11	0.00	0.03	0.40	-0.01	0.10	0.19	0.00	0.05
3b	0.23	0.00	0.05	0.81	-0.02	0.19	0.39	-0.01	0.09
4a	-0.09	-0.01	0.02	-0.32	-0.05	0.05	-0.15	-0.02	0.03
4b	-0.18	-0.03	0.03	-0.63	-0.10	0.11	-0.29	-0.05	0.05
5a	2.85	-0.01	0.24	10.04	-0.03	0.84	4.85	-0.01	0.40
5b	5.75	-0.02	0.48	20.27	-0.06	1.68	9.79	-0.03	0.81
6a	2.03	-0.06	0.19	7.16	-0.20	0.67	3.48	-0.09	0.32
6b	4.12	-0.11	0.38	14.53	-0.39	1.35	7.05	-0.19	0.65
7a	0.45	-0.01	0.11	1.59	-0.03	0.38	0.77	-0.01	0.18
7b	0.92	-0.02	0.22	3.25	-0.06	0.77	1.58	-0.03	0.37
8a	-0.37	-0.06	0.06	-1.28	-0.20	0.22	-0.60	-0.09	0.11
8b	-0.71	-0.11	0.12	-2.50	-0.39	0.44	-1.16	-0.19	0.21
Kfz	11.18	--	--	4.73	--	--	25.00	--	--

8.6.2.2 Modellgebiet Bremen

Tabelle 8-10 bis Tabelle 8-12 zeigen analog zu Berlin (Abschnitt 8.6.2.1) die Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Stoffe NO_x, PM10, PM2.5 und NMVOC für das Untersuchungsgebiet Bremen, jeweils für eine der drei für die Ausbreitungsrechnungen herangezogenen AKTerm. Zusätzlich ist zum Vergleich die durch Kfz-Emissionen hervorgerufene lokale NO_x-Zusatzbelastung angegeben. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.2.

Für die Werte in Tabelle 8-10 bis Tabelle 8-12 ergibt sich grundsätzlich eine ähnliche Struktur wie für das Untersuchungsgebiet Berlin. Die Werte für die AKTerm Berlin (Tabelle 8-10) und Bremen (Tabelle 8-11) sind wieder vergleichbar, allerdings ist im Untersuchungsgebiet Bremen die Differenz der Werte für die AKTerm Köln (Tabelle 8-12) zu den Werten für die AKTerm Bremen nur etwas höher als die Differenz der Werte für die AKTerm Bremen zu Berlin.

Je nach Szenario erreicht die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Flächenmittel bis zu 3 – 4 µg/m³ bzw. etwas über 50 % der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht sie mit 4.6 – 6 µg/m³ etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung, wobei die MBF Straße im Untersuchungsgebiet Bremen in einem nicht so stark durch Kfz-Emissionen belasteten Straßenabschnitt lokalisiert ist. Für die maximal beaufschlagte Fläche ist die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau mit 5.4 – 7.2 µg/m³ deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle, allerdings auch deutlich geringer als die entsprechende NO_x-Immissionsänderung im Untersuchungsgebiet Berlin. Für die grundsätzliche Bewertung der Höhe der NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen gilt die gleiche Anmerkung wie im Untersuchungsgebiet Berlin.

Bei PM10 und PM2.5 führt der Einsatz der Mini-BHKW wie in Berlin in allen Szenarien zu Abnahmen der Immissionsbelastung, da bei den BHKW selbst keine Partikel-Emissionen angesetzt wurden

(Abschnitt 6.5.2). Die Abnahmen sind aber in allen Fällen gering und erreichen maximal $-0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Szenario 8b für die maximal beaufschlagte Fläche bei Verwendung der AKTerm Köln.

Die NMVOC-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in allen Fällen zu und erreicht je nach verwendeter AKTerm Maximalwerte von $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Insgesamt sind für alle Szenarien die Werte – sowohl für BHKW als auch für Kfz – betragsmäßig kleiner als im Untersuchungsgebiet Berlin. Für BHKW entspricht dies grob auch dem Verhältnis der BHKW-bedingten Emissionsänderungen der beiden Modellgebiete zueinander (Abschnitt 6.5.5). Die NO_x -Emissionen des Kfz-Verkehrs hingegen sind für Bremen sogar etwas höher als für Berlin, trotzdem ist die Kfz-bedingte NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz in Berlin höher als in Bremen, und zwar für alle drei Bezugsflächen. Grund dafür ist im Wesentlichen, dass im Berliner Modellgebiet die Häuser deutlich höher sind als im Bremer Modellgebiet und die Durchlüftungssituation schlechter. Im Falle der MBF Straße spielt auch die Lage der MBF Straße eine Rolle für die Höhe der Kfz-bedingten Zusatzbelastung.

Tabelle 8-10: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Berlin

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.37	0.00	0.03	0.66	0.00	0.06	0.57	0.00	0.05
1b	0.75	0.00	0.06	1.34	0.00	0.11	1.14	0.00	0.10
2a	0.26	-0.01	0.02	0.48	-0.01	0.04	0.41	-0.01	0.04
2b	0.54	-0.01	0.05	0.97	-0.03	0.09	0.83	-0.02	0.08
3a	0.06	0.00	0.01	0.11	0.00	0.03	0.09	0.00	0.02
3b	0.12	0.00	0.03	0.21	0.00	0.05	0.18	0.00	0.04
4a	-0.05	-0.01	0.01	-0.08	-0.01	0.01	-0.07	-0.01	0.01
4b	-0.09	-0.01	0.02	-0.16	-0.03	0.03	-0.14	-0.02	0.03
5a	1.48	0.00	0.12	2.65	-0.01	0.22	2.27	-0.01	0.19
5b	2.98	-0.01	0.25	5.36	-0.02	0.44	4.58	-0.01	0.38
6a	1.06	-0.03	0.10	1.91	-0.05	0.18	1.63	-0.04	0.15
6b	2.15	-0.06	0.20	3.87	-0.10	0.36	3.30	-0.09	0.31
7a	0.23	0.00	0.06	0.42	-0.01	0.10	0.36	-0.01	0.09
7b	0.48	-0.01	0.11	0.86	-0.02	0.20	0.73	-0.01	0.17
8a	-0.18	-0.03	0.03	-0.32	-0.05	0.06	-0.28	-0.04	0.05
8b	-0.36	-0.06	0.07	-0.63	-0.10	0.12	-0.54	-0.09	0.10
Kfz	5.72	--	--	2.37	--	--	14.62	--	--

Tabelle 8-11: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Bremen

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.39	0.00	0.03	0.71	0.00	0.06	0.62	0.00	0.05
1b	0.79	0.00	0.07	1.43	0.00	0.12	1.26	0.00	0.10
2a	0.28	-0.01	0.03	0.51	-0.01	0.05	0.44	-0.01	0.04
2b	0.57	-0.02	0.05	1.03	-0.03	0.10	0.90	-0.02	0.08
3a	0.06	0.00	0.01	0.11	0.00	0.03	0.10	0.00	0.02
3b	0.13	0.00	0.03	0.23	0.00	0.05	0.20	0.00	0.05
4a	-0.05	-0.01	0.01	-0.09	-0.01	0.02	-0.08	-0.01	0.01
4b	-0.10	-0.02	0.02	-0.18	-0.03	0.03	-0.17	-0.02	0.03
5a	1.57	0.00	0.13	2.84	-0.01	0.24	2.49	-0.01	0.21
5b	3.17	-0.01	0.26	5.74	-0.02	0.48	5.04	-0.02	0.42
6a	1.12	-0.03	0.10	2.03	-0.06	0.19	1.77	-0.05	0.17
6b	2.26	-0.06	0.21	4.11	-0.11	0.38	3.59	-0.10	0.34
7a	0.25	0.00	0.06	0.44	-0.01	0.11	0.39	-0.01	0.10
7b	0.51	-0.01	0.12	0.90	-0.02	0.22	0.79	-0.02	0.19
8a	-0.20	-0.03	0.03	-0.37	-0.06	0.06	-0.34	-0.05	0.05

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
8b	-0.40	-0.06	0.07	-0.73	-0.11	0.12	-0.66	-0.10	0.11
Kfz	5.94	--	--	2.39	--	--	15.37	--	--

Tabelle 8-12: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen, AKTerm Köln

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]	NO _x [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	NMVOC [µg/m ³]
1a	0.50	0.00	0.04	0.90	0.00	0.07	0.76	0.00	0.06
1b	1.01	0.00	0.08	1.81	-0.01	0.15	1.54	0.00	0.13
2a	0.36	-0.01	0.03	0.63	-0.02	0.06	0.54	-0.01	0.05
2b	0.73	-0.02	0.07	1.29	-0.04	0.12	1.10	-0.03	0.10
3a	0.08	0.00	0.02	0.14	0.00	0.03	0.12	0.00	0.03
3b	0.16	0.00	0.04	0.28	-0.01	0.07	0.24	0.00	0.06
4a	-0.06	-0.01	0.01	-0.12	-0.02	0.02	-0.10	-0.01	0.02
4b	-0.12	-0.02	0.02	-0.24	-0.04	0.04	-0.19	-0.03	0.03
5a	2.01	-0.01	0.17	3.58	-0.01	0.30	3.04	-0.01	0.25
5b	4.06	-0.01	0.34	7.23	-0.02	0.60	6.14	-0.02	0.51
6a	1.44	-0.04	0.13	2.54	-0.07	0.24	2.17	-0.06	0.20
6b	2.91	-0.08	0.27	5.15	-0.14	0.48	4.40	-0.12	0.41
7a	0.32	-0.01	0.08	0.55	-0.01	0.14	0.48	-0.01	0.12
7b	0.65	-0.01	0.15	1.13	-0.02	0.28	0.97	-0.02	0.23
8a	-0.26	-0.04	0.04	-0.49	-0.07	0.08	-0.39	-0.06	0.07
8b	-0.50	-0.08	0.09	-0.95	-0.14	0.16	-0.77	-0.12	0.13
Kfz	7.21	--	--	1.68	--	--	19.58	--	--

8.6.2.3 Modellgebiet Köln

Tabelle 8-13 bis Tabelle 8-15 zeigen analog zu Berlin die Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die betrachteten Stoffe NO_x, PM10, PM2.5 und NMVOC für das Untersuchungsgebiet Köln, jeweils für eine der drei für die Ausbreitungsrechnungen herangezogenen AKTerm. Zusätzlich ist zum Vergleich die durch Kfz-Emissionen hervorgerufene lokale NO_x-Zusatzbelastung angegeben. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.2.

Für die Werte in Tabelle 8-13 bis Tabelle 8-15 ergibt sich grundsätzlich eine ähnliche Struktur wie für das Untersuchungsgebiet Bremen. Die Werte für die AKTerm Berlin (Tabelle 8-13) und Bremen (Tabelle 8-14) sind wieder vergleichbar, und im Untersuchungsgebiet Köln ist wie im Untersuchungsgebiet Bremen die Differenz der Werte für die AKTerm Köln (Tabelle 8-15) zu den Werten für die AKTerm Bremen nur etwas höher als die Differenz der Werte für die AKTerm Bremen zu den Werten für die AKTerm Berlin.

Je nach Szenario erreicht die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Flächenmittel mit bis zu 1.4 – 1.8 µg/m³ nur etwa ein Viertel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht sie mit 2.3 – 3.7 µg/m³ etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die AKTerm Köln liegt die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau auf der MBF Straße sogar bei 40% der NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz. Die NO_x-Zusatzbelastung

durch Kfz ist für die MBF Straße im Untersuchungsgebiet Köln relativ niedrig, weil sie in einem durch Kfz-Emissionen eher gering belasteten Straßenabschnitt lokalisiert ist (Abbildung 8-7). Für die maximal beaufschlagte Fläche ist die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau mit $3.4 - 5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle, allerdings auch nochmal geringer als die entsprechende NO_x -Immissionsänderung im Untersuchungsgebiet Bremen. Für die grundsätzliche Bewertung der Höhe der NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz-Emissionen gilt die gleiche Anmerkung wie im Untersuchungsgebiet Berlin.

Bei PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ führt der Einsatz der Mini-BHKW wie in Berlin in allen Szenarien zu Abnahmen der Immissionsbelastung, da bei den BHKW selbst keine Partikel-Emissionen angesetzt wurden (Abschnitt 6.5.2). Die Abnahmen sind aber in allen Fällen gering und erreichen maximal $-0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Szenario 8b für die maximal beaufschlagte Fläche bei Verwendung der AKTerm Köln.

Die NMVOC-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in allen Fällen zu und erreicht je nach verwendeter AKTerm Maximalwerte von $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Insgesamt sind für alle Szenarien die Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau betragsmäßig kleiner als im Untersuchungsgebiet Bremen. Dies entspricht auch grob dem Verhältnis der BHKW-bedingten Emissionsänderungen der beiden Modellgebiete zueinander (Abschnitt 6.5.5). Die NO_x -Emissionen des Kfz-Verkehrs hingegen sind für Köln deutlich höher als für Berlin und Bremen, trotzdem ist die NO_x -Zusatzbelastung durch Kfz in Berlin höher als in Köln, und zwar für alle drei Bezugsflächen. Grund dafür ist im Wesentlichen auch hier, dass im Berliner Modellgebiet die Häuser deutlich höher sind als im Kölner Modellgebiet und die Durchlüftungssituation schlechter ist. Die auch im Vergleich mit den anderen beiden Untersuchungsgebieten sehr niedrigen Werte der Kfz-bedingten Zusatzbelastung für die MBF Straße sind, wie oben bereits ausgeführt, darin begründet, dass die MBF Straße in Köln in einem eher gering belasteten Straßenabschnitt lokalisiert ist.

Tabelle 8-13: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Berlin

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NMVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NMVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NMVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1a	0.17	0.00	0.01	0.42	0.00	0.03	0.29	0.00	0.02
1b	0.34	0.00	0.03	0.84	0.00	0.07	0.59	0.00	0.05
2a	0.12	0.00	0.01	0.30	-0.01	0.03	0.21	-0.01	0.02
2b	0.24	-0.01	0.02	0.60	-0.02	0.06	0.42	-0.01	0.04
3a	0.03	0.00	0.01	0.07	0.00	0.02	0.05	0.00	0.01
3b	0.05	0.00	0.01	0.13	0.00	0.03	0.09	0.00	0.02
4a	-0.02	0.00	0.00	-0.05	-0.01	0.01	-0.04	-0.01	0.01
4b	-0.04	-0.01	0.01	-0.11	-0.02	0.02	-0.07	-0.01	0.01
5a	0.68	0.00	0.06	1.67	-0.01	0.14	1.16	0.00	0.10
5b	1.37	0.00	0.11	3.37	-0.01	0.28	2.34	-0.01	0.19
6a	0.48	-0.01	0.05	1.19	-0.03	0.11	0.83	-0.02	0.08
6b	0.98	-0.03	0.09	2.41	-0.07	0.22	1.68	-0.05	0.16
7a	0.11	0.00	0.03	0.26	-0.01	0.06	0.19	0.00	0.04
7b	0.22	0.00	0.05	0.54	-0.01	0.13	0.38	-0.01	0.09
8a	-0.09	-0.01	0.01	-0.22	-0.03	0.04	-0.15	-0.02	0.03
8b	-0.17	-0.03	0.03	-0.42	-0.07	0.07	-0.29	-0.05	0.05
Kfz	6.03	--	--	2.84	--	--	8.07	--	--

Tabelle 8-14: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Bremen

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.18	0.00	0.02	0.48	0.00	0.04	0.31	0.00	0.03
1b	0.37	0.00	0.03	0.97	0.00	0.08	0.63	0.00	0.05
2a	0.13	0.00	0.01	0.34	-0.01	0.03	0.22	-0.01	0.02
2b	0.26	-0.01	0.02	0.69	-0.02	0.06	0.45	-0.01	0.04
3a	0.03	0.00	0.01	0.08	0.00	0.02	0.05	0.00	0.01
3b	0.06	0.00	0.01	0.16	0.00	0.04	0.10	0.00	0.02
4a	-0.02	0.00	0.00	-0.06	-0.01	0.01	-0.04	-0.01	0.01
4b	-0.05	-0.01	0.01	-0.12	-0.02	0.02	-0.08	-0.01	0.01
5a	0.73	0.00	0.06	1.92	-0.01	0.16	1.24	0.00	0.10
5b	1.48	0.00	0.12	3.88	-0.01	0.32	2.50	-0.01	0.21
6a	0.52	-0.01	0.05	1.36	-0.04	0.13	0.88	-0.02	0.08
6b	1.06	-0.03	0.10	2.76	-0.08	0.26	1.79	-0.05	0.17
7a	0.12	0.00	0.03	0.31	-0.01	0.07	0.20	0.00	0.05
7b	0.24	0.00	0.06	0.63	-0.01	0.15	0.40	-0.01	0.10
8a	-0.10	-0.01	0.02	-0.25	-0.04	0.04	-0.16	-0.02	0.03
8b	-0.19	-0.03	0.03	-0.49	-0.08	0.08	-0.32	-0.05	0.05
Kfz	6.34	--	--	2.92	--	--	8.27	--	--

Tabelle 8-15: Immissionsänderung durch BHKW und Zusatzbelastung durch Kfz für Köln, AKTerm Köln

Szenario	Flächenmittel			MBF			MBF Straße		
	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]	NO _x [µg/m³]	PM10 [µg/m³]	NMVOC [µg/m³]
1a	0.22	0.00	0.02	0.63	0.00	0.05	0.46	0.00	0.04
1b	0.45	0.00	0.04	1.28	0.00	0.11	0.93	0.00	0.08
2a	0.16	0.00	0.01	0.44	-0.01	0.04	0.33	-0.01	0.03
2b	0.32	-0.01	0.03	0.90	-0.03	0.08	0.66	-0.02	0.06
3a	0.04	0.00	0.01	0.10	0.00	0.02	0.07	0.00	0.02
3b	0.07	0.00	0.02	0.20	0.00	0.05	0.15	0.00	0.04
4a	-0.03	0.00	0.00	-0.09	-0.01	0.01	-0.06	-0.01	0.01
4b	-0.06	-0.01	0.01	-0.18	-0.03	0.03	-0.12	-0.02	0.02
5a	0.90	0.00	0.07	2.53	-0.01	0.21	1.84	-0.01	0.15
5b	1.81	-0.01	0.15	5.10	-0.02	0.42	3.72	-0.01	0.31
6a	0.63	-0.02	0.06	1.77	-0.05	0.17	1.31	-0.04	0.12
6b	1.29	-0.04	0.12	3.59	-0.10	0.34	2.66	-0.07	0.25
7a	0.14	0.00	0.03	0.39	-0.01	0.10	0.29	-0.01	0.07
7b	0.29	-0.01	0.07	0.81	-0.02	0.19	0.60	-0.01	0.14
8a	-0.12	-0.02	0.02	-0.36	-0.05	0.05	-0.24	-0.04	0.04
8b	-0.24	-0.04	0.04	-0.71	-0.10	0.11	-0.47	-0.07	0.08
Kfz	7.36	--	--	1.77	--	--	9.29	--	--

8.7 Berechnung der durch BHKW verursachten Immissionsänderung für NO₂

8.7.1 Allgemeines

Das für die lokalen Modellgebiete verwendete Ausbreitungsmodell LASAT wurde für die Simulation der Ausbreitung nicht-reaktiver Substanzen entwickelt und kann nur chemische Umsetzungen erster Ordnung für Einzelstoffe simulieren. Da NO₂ eine chemisch reaktive Substanz ist, wurden die Ausbreitungsrechnungen mit LASAT zunächst für NO_x durchgeführt (Abschnitt 8.1.2.1). Diese lieferten als Ergebnis die NO_x-Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau und die NO_x-Zusatzbelastung durch den Kfz-Verkehr (Abschnitt 8.6). Die Ableitung der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau bzw. der NO₂-Zusatzbelastung durch den Kfz-Verkehr fand dann extern in einem Postprocessing-Schritt statt. Dafür wurde hier ein geeigneter Modellansatz ermittelt (Abschnitt 8.7.4).

Die Ableitung der BHKW-bedingten NO₂-Immissionsänderung bzw. der Kfz-bedingten NO₂-Zusatzbelastung aus der entsprechenden NO_x-Immissionsänderung bzw. NO_x-Zusatzbelastung kann nicht direkt erfolgen, sondern es wird zunächst die NO_x- und darauf aufbauend die NO₂-Gesamtbelastung ermittelt, um die chemischen Reaktionen, die bei der Bildung von NO₂ eine Rolle spielen, möglichst vollständig zu erfassen.

8.7.2 Berechnung der NO_x-Gesamtbelastung

Die NO_x-Gesamtbelastung in den drei betrachteten Modellgebieten setzt sich zusammen aus dem regionalen Hintergrund, dem urbanen Hintergrund und der Zusatzbelastung (Abschnitt 4).

In der hier verwendeten Modellkette wird die Summe aus regionalem Hintergrund und urbanem Hintergrund durch die RCG-Modellergebnisse auf nationaler Ebene gemäß Abschnitt 7 repräsentiert. Verwendet wurden die RCG-Ergebnisse aus den drei Gitterzellen, in denen die betrachteten Modellgebiete liegen. Aus den gleichen Gründen wie bei der Methodik zur Bestimmung der gesamten Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Abschnitt 8.6.1, d. h. in Anbetracht der dort aufgeführten Unsicherheiten bei der Aggregation von regionalem und lokalem Beitrag sowie der absolut und relativ geringen Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderung auf regionaler Ebene, wurden zur Bestimmung der NO_x-Gesamtbelastung die RCG-Modellergebnisse für das APS2020-Szenario verwendet (Tabelle 8-16).

Tabelle 8-16: Verwendete Hintergrundwerte zur Bestimmung der NO_x-Gesamtbelastung

	Berlin	Bremen	Köln
NO _x [µg/m ³]	19.5	18.1	37.4

Die Zusatzbelastung durch die in den lokalen Modellgebieten berücksichtigten Emissionen, d. h. die Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau und die Kfz-Emissionen, wird durch die Ergebnisse der LASAT-Ausbreitungsrechnungen gemäß Abschnitt 8.6 repräsentiert.

Bei der Aggregation von RCG- und LASAT-Modellergebnissen wäre analog zu Abschnitt 8.6.1 die Doppelzählung hier nicht nur der lokalen Beiträge der BHKW-bedingten Emissionsänderungen, sondern zur Bestimmung der Gesamtbelastung auch der lokalen Beiträge der Kfz-Emissionen zu berücksichtigen. Da aber dieser Beitrag insgesamt, d. h. für die Summe der Beiträge der BHKW-bedingte Emissionsänderungen und der Kfz-Emissionen, weniger als 0.5 µg/m³ beträgt (Tabelle 8-6), wird diese, der Argumentation in Abschnitt 8.6.1 folgend, nicht berücksichtigt. Dies entspricht gleichzeitig einer worst-case-Betrachtung für den BHKW-Anteil der NO₂-Zusatzbelastung, denn der BHKW-Beitrag zu NO₂ ist umso größer, je größer die NO₂-Gesamtbelastung ist. Diese ist umso größer, je größer die NO_x-Gesamtbelastung ist, und diese ist umso größer, je kleiner der lokale Beitrag aus Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau und durch Kfz-

Emissionen zur regionalen Hintergrundbelastung ist. Die NO_x -Gesamtbelastung wird damit im Folgenden als Summe aus Hintergrundbelastung entsprechend Tabelle 8-16 und lokaler Zusatzbelastung durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen und Kfz-Emissionen entsprechend Abschnitt 8.6.2 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-17 bis Tabelle 8-19 für die drei betrachteten Modellgebiete, die betrachteten Auswertungsflächen (Flächenmittel über das Auswertungsgebiet, MBF, MBF Straße) und die betrachteten AKTerm aufgeführt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 8-17 bis Tabelle 8-19 zeigt sich, dass die höchsten Werte der NO_x -Gesamtbelastung im Bereich der maximal belasteten Fläche im Straßenraum (MBF Straße) zu finden sind, da hier der Anteil der Kfz-bedingten NO_x -Zusatzbelastung am höchsten ist. Die nächsthöheren Werte der NO_x -Gesamtbelastung finden sich beim Flächenmittel über das gesamte Auswertungsgebiet, und die niedrigsten Werte befinden sich im Bereich der durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen maximal belasteten Fläche MBF, die am geringsten durch Kfz-Emissionen belastet wird. Für das Flächenmittel und die MBF Straße sind jeweils die Ergebnisse für die durch eine im Vergleich zu den anderen beiden AKTerm niedrigere mittlere Windgeschwindigkeit charakterisierte AKTerm Köln am höchsten. Dies gilt nicht für die MBF, da diese in den Modellgebieten Bremen und Köln für die AKTerm Köln eine niedrigere Kfz-bedingte NO_x -Zusatzbelastung aufweist als für die beiden anderen AKTerm.

Ein Vergleich der in Tabelle 8-17 bis Tabelle 8-19 aufgeführten modellierten Werte der NO_x -Gesamtbelastung mit Messwerten ist nicht möglich. Die ausgewerteten Flächen sind nicht im Bereich der in den einzelnen Untersuchungsgebieten befindlichen Messstationen lokalisiert. Insbesondere in Köln ist die MBF Straße in einem durch Kfz eher gering belasteten Straßenabschnitt gelegen.

Trotzdem ist davon auszugehen, dass die tatsächliche NO_x -Gesamtbelastung im Jahr 2020 durch die hier prognostizierten Werte unterschätzt wird. Ursache dafür ist, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Prognose der Kfz-Emissionen für das Jahr 2020 sowohl in dem der Ausbreitungsrechnung auf nationaler Ebene zu Grunde liegenden Emissionsszenario APS2020 als auch im für die lokalen Kfz-Emissionen eingesetzten HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) zu optimistisch ist.

Tabelle 8-17: NO_x-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	28.2	28.5	31.4	23.9	24.4	26.8	39.3	39.9	45.8
1b	28.7	29.0	32.2	25.3	25.6	29.3	40.1	40.7	47.0
2a	28.1	28.4	31.2	23.5	24.1	26.1	39.1	39.7	45.4
2b	28.4	28.7	31.8	24.5	25.0	27.9	39.6	40.3	46.3
3a	27.8	28.1	30.8	22.7	23.4	24.7	38.6	39.3	44.7
3b	27.9	28.2	31.0	22.9	23.6	25.1	38.8	39.4	44.9
4a	27.6	27.9	30.6	22.3	23.1	24.0	38.4	39.1	44.4
4b	27.6	27.9	30.6	22.1	23.0	23.6	38.3	39.0	44.3
5a	29.7	30.0	33.6	28.1	28.0	34.3	41.6	42.3	49.4
5b	31.6	32.1	36.5	33.8	32.7	44.5	44.7	45.5	54.3
6a	29.1	29.4	32.8	26.4	26.7	31.4	40.7	41.4	48.0
6b	30.5	30.9	34.8	30.5	30.1	38.8	43.0	43.8	51.6
7a	28.0	28.3	31.2	23.4	24.0	25.9	39.0	39.7	45.3
7b	28.3	28.6	31.6	24.3	24.8	27.5	39.5	40.2	46.1
8a	27.5	27.7	30.4	21.7	22.7	23.0	38.1	38.8	43.9
8b	27.2	27.5	30.0	21.0	22.2	21.8	37.8	38.4	43.4

Tabelle 8-18: NO_x-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	24.2	24.4	25.8	21.1	21.2	20.6	33.3	34.1	38.4
1b	24.5	24.8	26.3	21.8	21.9	21.6	33.8	34.7	39.2
2a	24.1	24.3	25.6	20.9	21.0	20.4	33.1	33.9	38.2
2b	24.3	24.6	26.0	21.4	21.5	21.0	33.5	34.3	38.8
3a	23.9	24.1	25.4	20.5	20.6	19.9	32.8	33.5	37.8
3b	23.9	24.1	25.4	20.7	20.7	20.0	32.9	33.6	37.9
4a	23.7	24.0	25.2	20.4	20.4	19.6	32.6	33.4	37.6
4b	23.7	23.9	25.2	20.3	20.3	19.5	32.6	33.3	37.5
5a	25.3	25.6	27.3	23.1	23.3	23.3	35.0	35.9	40.7
5b	26.8	27.2	29.3	25.8	26.2	27.0	37.3	38.5	43.8
6a	24.9	25.1	26.7	22.4	22.5	22.3	34.3	35.2	39.8
6b	25.9	26.3	28.2	24.3	24.6	24.9	36.0	37.0	42.1
7a	24.0	24.3	25.6	20.9	20.9	20.3	33.0	33.8	38.1
7b	24.3	24.5	25.9	21.3	21.4	20.9	33.4	34.2	38.6
8a	23.6	23.8	25.0	20.1	20.1	19.3	32.4	33.1	37.3
8b	23.4	23.6	24.8	19.8	19.7	18.8	32.1	32.8	36.9

Tabelle 8-19: NO_x-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

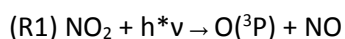
Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	43.6	43.9	45.0	40.7	40.8	39.8	45.8	46.0	47.1
1b	43.8	44.1	45.2	41.1	41.3	40.4	46.1	46.3	47.6
2a	43.6	43.9	44.9	40.5	40.7	39.6	45.7	45.9	47.0
2b	43.7	44.0	45.1	40.8	41.0	40.1	45.9	46.1	47.4
3a	43.5	43.8	44.8	40.3	40.4	39.3	45.5	45.7	46.8
3b	43.5	43.8	44.8	40.4	40.5	39.4	45.6	45.8	46.8
4a	43.4	43.7	44.7	40.2	40.3	39.1	45.4	45.6	46.6
4b	43.4	43.7	44.7	40.1	40.2	39.0	45.4	45.6	46.6
5a	44.1	44.5	45.7	41.9	42.2	41.7	46.6	46.9	48.5
5b	44.8	45.2	46.6	43.6	44.2	44.3	47.8	48.2	50.4
6a	43.9	44.3	45.4	41.4	41.7	40.9	46.3	46.6	48.0
6b	44.4	44.8	46.0	42.7	43.1	42.8	47.2	47.5	49.3
7a	43.5	43.9	44.9	40.5	40.6	39.6	45.7	45.9	47.0
7b	43.6	44.0	45.0	40.8	41.0	40.0	45.9	46.1	47.3
8a	43.3	43.7	44.6	40.0	40.1	38.8	45.3	45.5	46.4
8b	43.3	43.6	44.5	39.8	39.8	38.5	45.2	45.4	46.2

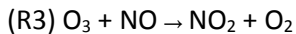
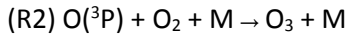
8.7.3 Reaktionsmechanismus zur Berechnung der NO₂-Gesamtbelastung

Für die Modellierung verkehrsbedingter NO₂-Immissionen im Straßenraum empfehlen neuere Arbeiten (Düring et al., 2011; Neunhäuserer et al., 2011) eine Abkehr von dem bei Baumbach et al. (2010) verwendeten statistischen Verfahren nach Romberg et al. (1996) und stattdessen die Verwendung einer photochemischen Berechnung nach dem Verfahren von Düring & Bächlin (2009), bei dem das photostationäre Gleichgewicht um einen Austausch mit der Umgebungsluft erweitert wird und die Reaktions- und Austauschparameter empirisch bestimmt werden. Im Unterschied zu diesen Anwendungen liefert die Fragestellung des hier durchgeführten Projekts keine eindeutige Unterscheidung zwischen einem quellnahen Reaktionsvolumen (Straßenraum), in dem alle relevanten NO- und NO₂-Emissionen freigesetzt werden und sich das photostationäre Gleichgewicht einstellt, und einem weitgehend ungestörten Hintergrund, mit dem Konzentrationen lediglich ausgetauscht werden. Eine Beschränkung der Modellierung auf den städtischen Hintergrund würde jedoch der Problematik nicht gerecht, dass die höchsten NO₂-Gesamtbelastungen des Modellgebiets im Straßenraum zu erwarten sind, weshalb die durch die Mini-BHKWs verursachte NO₂-Immissionsänderung gerade im Straßenraum besonders kritisch zu bewerten ist.

Um ein für diese Problematik geeignetes Modellkonzept zu ermitteln, wurde zunächst entsprechend der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) untersucht, welche Reaktionsmechanismen zur Bestimmung der NO₂-Gesamtbelastung im Modellgebiet zu berücksichtigen sind.

Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) unterscheidet, ausgehend vom RACM-Reaktionsmechanismus (Stockwell et al., 1996), zwischen einem einfachen Ansatz M1 und einem erweiterten Ansatz M2. Der einfache Ansatz M1 besteht aus den folgenden Reaktionen (R1) bis (R3):





Dabei steht h für das plancksche Wirkungsquantum und ν für die Frequenz eines Photons. Das Produkt $h \cdot \nu$ ist demnach die Energie der elektromagnetischen Strahlung. Mit (R1) zerfällt NO_2 tagsüber unter photochemischer Einwirkung zu NO und Sauerstoff. In (R2) reagiert das entstehende Sauerstoffatom mit molekularem Sauerstoff zu Ozon. In (R3) oxidiert das entstehende Ozon NO zu NO_2 .

Der erweiterte Ansatz M2 besteht zusätzlich zu den Reaktionen (R1) bis (R3) aus 29 weiteren Reaktionen (R4) bis (R32), die insgesamt 15 Substanzen miteinander verknüpfen. Darin gehen die Stickstoffoxide und O_3 eine Reihe weiterer Reaktionen in der Atmosphäre ein, die jedoch meistens auf einer längeren Zeitskala ablaufen als die Reaktionen (R1) bis (R3). Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) definiert auf Basis der Reaktionen (R4) bis (R16) vier charakteristische Zeiten τ_i (mit $i = \text{M2.1, M2.2, M2.3, M2.4}$) und gibt an, dass „der Mechanismus M1 ausreichend ist, wenn zu jedem Zeitpunkt die Verweildauer τ_V der Luft im betrachteten Volumen deutlich kleiner als das Minimum der τ_i ist.“ Für die praktische Umsetzung wird dort als Bedingung angegeben:

$$\tau_V < \tau_{krit} = \frac{1}{3} \min \tau_i$$

Die charakteristischen Zeiten τ_i und die sich daraus ergebenden Zeiten τ_{krit} wurden testweise für alle drei Untersuchungsgebiete im Szenario 1a bestimmt. Betrachtet wurden drei typische Fälle:

- „Hof“: Hinterhof, Minimalkonzentration der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau
- „Straße 1“: Straßenraum, Maximalkonzentration der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau
- „Straße 2“: Straßenraum, Maximalkonzentration der Kfz-bedingten NO_x -Zusatzbelastung

Für alle drei Untersuchungsgebiete und alle drei Fälle wurden die erforderlichen Eingangsparameter zusammengestellt wie folgt:

Die Bestimmung der erforderlichen Fotolysefrequenzen erfolgte mit Hilfe des Fotolysefrequenzen-Browsers des Forschungszentrums Jülich (FZ Jülich, 2017) in Abhängigkeit von der Globalstrahlung bei einer Ozonsäulendichte von 330 DU. Der Fotolysefrequenzen-Browser bietet unter diesen Bedingungen vier Auswahlmöglichkeiten zur Bestimmung der Fotolysefrequenzen, die im Folgenden mit C1 bis C4 abgekürzt werden:

- C1: "no cloud in front of sun at ground"
- C2: "sun covered by clouds at ground"
- C3: "no cloud in front of sun 1 km above ground"
- C4: "sun covered by clouds 1 km above ground"

Die drei oben definierten Fälle wurden für C1 durchgespielt, nur der Fall mit dem niedrigsten τ_{krit} (Fall „Hof“) wurde für C1 bis C4 berechnet, um den Einfluss der Wolkenbedeckung auf τ_{krit} zu erfassen. Die Werte für Globalstrahlung und Temperatur wurden den meteorologischen Eingangsdaten der RCG-Rechnungen (Abschnitt 7.1) in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad entnommen. Die O_3 -Konzentration im Hintergrund wurde aus der von RCG ausgegebenen Zeitreihe der O_3 -Konzentrationen in der Gitterzelle des jeweiligen Untersuchungsgebiets ebenfalls in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad bestimmt. Eine erste Sensitivitätsanalyse hinsichtlich dieser Parameter ergab, dass τ_{krit} umso kleiner ist, je höher die Werte der Globalstrahlung und der O_3 -Konzentration im Hintergrund sind.

Für NO_x und NO_2 wurde jeweils die Gesamtbelastung am Ort der Untersuchung angesetzt. Für NO_x wurde dieser Wert analog zu Abschnitt 8.7.2 als Summe aus Hintergrundbelastung entsprechend Tabelle 8-16 und

lokaler Zusatzbelastung durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen und Kfz-Emissionen bestimmt. Für NO_2 wurde die Gesamtbelastung ebenfalls als Summe aus Hintergrundbelastung und lokaler Zusatzbelastung durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen und Kfz-Emissionen bestimmt. Die NO_2 -Hintergrundbelastung wurde konsistent zum Vorgehen in Abschnitt 8.7.4 über den Romberg-Ansatz (Romberg, 1996; IVU Umwelt, 2002) aus der NO_x -Hintergrundbelastung bestimmt. Die NO_2 -Zusatzbelastung durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen und Kfz-Emissionen wurde aus der NO_x -Zusatzbelastung über den Anteil der NO_2 -Direktemissionen an den NO_x -Emissionen bestimmt, denn die charakteristischen Zeiten sind zu Reaktionsbeginn zu berechnen. Der Anteil der NO_2 -Direktemissionen an den NO_x -Emissionen wurde in Anlehnung an Abschnitt 6.6 und an Abschnitt 6.8 sowohl für die BHKW-bedingten Emissionsänderungen als auch für die Kfz-Emissionen im Gebietsmittel zu rund 23 % angesetzt.

Tabelle 8-20 zeigt die Ergebnisse beispielhaft für das Untersuchungsgebiet Berlin. Es ergeben sich, je nach Fall und Wahl der Eingangsparameter, kritische Zeiten τ_{krit} von knapp 12 h bis rund 45 h. Bestimmende charakteristische Zeit ist dabei in allen Fällen $\tau_{M2.2}$. Dabei ist τ_{krit} umso kleiner, je niedriger die NO_x -Gesamtbelastung ist. Dementsprechend ist das Untersuchungsgebiet Berlin, das im Vergleich mit den Untersuchungsgebieten Bremen und Köln im Fall „Hof“ die niedrigste NO_x -Gesamtbelastung aufweist, das Untersuchungsgebiet mit den kleinsten τ_{krit} . Hinsichtlich des Bedeckungsgrads (Auswahlmöglichkeiten C1 bis C4 im Fotolysefrequenzen-Browser), der gleichzeitig die Globalstrahlung und in geringerem Maße auch Temperatur und O_3 -Konzentration im Hintergrund beeinflusst, führt die Auswahlmöglichkeit C3 ("no cloud in front of sun 1 km above ground") auf die kürzesten τ_{krit} . Damit die tatsächliche Verweildauer τ_V eines Teilchens im Untersuchungsgebiet größer ist als das kürzeste hier berechnete τ_{krit} , dürfte das Teilchen 11.8 h lang nicht schneller als mit 0.03 m/s transportiert werden, um z. B. eine Strecke zurückzulegen, die der Diagonale des Untersuchungsgebiets entspricht.

Tabelle 8-20: Charakteristische Zeiten und kritische Verweildauer in Abhängigkeit von den Eingangsparametern am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin

Größe	Einheit	Hof C1	Hof C2	Hof C3	Hof C4	Straße1 C1	Straße2 C1
Temperatur	[K]	309.5	303.8	309.5	303.8	309.5	309.5
Globalstrahlung	[W/m ²]	828.8	475.1	828.8	475.1	828.8	828.8
O ₃ -Hintergrund	[µg/m ³]	154.4	152.7	154.4	152.7	154.4	154.4
NO _x	[µg/m ³]	20.4	20.4	20.4	20.4	30.3	62.1
NO ₂	[µg/m ³]	14.2	14.2	14.2	14.2	16.5	23.8
$\tau_{M2.1}$	[h]	81 403.1	78 829.2	81 403.1	78 829.2	18 806.2	3 526.6
$\tau_{M2.2}$	[h]	44.8	49.6	35.3	37.3	66.5	136.3
$\tau_{M2.3}$	[h]	691.8	751.6	547.9	565.5	691.8	691.8
$\tau_{M2.4}$	[h]	21 691.0	35 001.2	17 479.6	28 099.1	15 764.6	7 396.0
τ_{krit}	[h]	14.9	16.5	11.8	12.4	22.2	45.4

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss der NO₂-Belastung auf τ_{krit} überprüft. Da laut VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19 (KRdL, 2017) zur Bestimmung der charakteristischen Zeiten die Konzentrationen zu Reaktionsbeginn anzusetzen sind, wurde oben zur Bestimmung der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau ein Anteil von 23 % an der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau angesetzt. Ausgewertet wurde aber die Modellschicht 2.2 m – 3.0 m über Grund. In dieser Höhe kann bei den aus den Schornsteinen emittierten Stickoxiden strenggenommen nicht mehr von „Reaktionsbeginn“ gesprochen werden. Um diesen Punkt zu berücksichtigen, wurde der Anteil der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau an der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau auf das Verhältnis des NO₂-Hintergrundwertes zum NO_x-Hintergrundwert erhöht, das entspricht im Untersuchungsgebiet Berlin knapp 72 %.

Tabelle 8-21 zeigt die zugehörigen Ergebnisse. Da die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau insgesamt gering ist, hat auch die Erhöhung des Anteils der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau an der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau keinen großen Einfluss auf die NO₂-Gesamtbelastung. Diese steigt gegenüber Tabelle 8-20 geringfügig an. Mit der Änderung der NO₂-Gesamtbelastung ändern sich $\tau_{M2.1}$ (steigt an) und $\tau_{M2.4}$ (sinkt, aber auf sehr hohem Niveau), während $\tau_{M2.2}$ und $\tau_{M2.3}$ konstant bleiben. Da $\tau_{M2.2}$ im vorliegenden Kontext die bestimmende Größe für τ_{krit} ist, folgt daraus, dass der Anteil NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau an der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau hier irrelevant für τ_{krit} ist.

Tabelle 8-21: Charakteristische Zeiten und kritische Verweildauer in Abhängigkeit von den Eingangsparametern am Beispiel des Untersuchungsgebiets Berlin, Variation der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau

Größe	Einheit	Hof C1	Hof C2	Hof C3	Hof C4	Straße1 C1	Straße2 C1
Temperatur	[K]	309.5	303.8	309.5	303.8	309.5	309.5
Globalstrahlung	[W/m ²]	828.8	475.1	828.8	475.1	828.8	828.8
O ₃ -Hintergrund	[µg/m ³]	154.4	152.7	154.4	152.7	154.4	154.4
NO _x	[µg/m ³]	20.4	20.4	20.4	20.4	30.3	62.1
NO ₂	[µg/m ³]	14.3	14.3	14.3	14.3	16.9	24.1
$\tau_{M2.1}$	[h]	83 898.0	81 245.3	83 898.0	81 245.3	20 413.4	3 600.4
$\tau_{M2.2}$	[h]	44.8	49.6	35.3	37.3	66.5	136.3
$\tau_{M2.3}$	[h]	691.8	751.6	547.9	565.5	691.8	691.8
$\tau_{M2.4}$	[h]	21 529.3	34 739.8	17 344.7	27 884.5	15 252.5	7 302.6
τ_{krit}	[h]	14.9	16.5	11.8	12.4	22.2	45.4

Auf Basis der Untersuchungen zur Bestimmung der erforderlichen Reaktionsmechanismen kann davon ausgegangen werden, dass für das vorliegende Belastungsniveau in den Modellgebieten die berechnete maximal mögliche Verweilzeit τ_{krit} , die eine Anwendung von M1 noch erlaubt, größer ist als die tatsächliche Verweilzeit τ_V . Dies gilt umso mehr, als die maximale mögliche Verweilzeit τ_{krit} für möglichst ungünstige Situationen (hohe Werte der Globalstrahlung, hohe Temperaturen, hohe Werte der O₃-Konzentration im Hintergrund) berechnet wurde, die nur in wenigen Fällen im Jahr auftreten. Es wird daher davon ausgegangen, dass für das vorliegende Belastungsniveau in den Modellgebieten der Reaktionsmechanismus M1, bestehend aus (R1) bis (R3), ausreichend ist.

8.7.4 Modellkonzept zur NO₂-Berechnung

8.7.4.1 NO₂-Gesamtbelastung

Für den Reaktionsmechanismus M1 (Abschnitt 8.7.3) stehen Modellkonzepte zur Bestimmung der NO₂-Gesamtbelastung zur Verfügung, für stündlich aufgelöste Zeitreihen z. B. nach Hertel & Berkowicz (1989) und für Jahresmittelwerte z. B. nach Düring & Bächlin (2009). Der Ansatz nach Düring & Bächlin (2009) wurde explizit für den Straßenraum parametrisiert und ist von den Jahresmittelwerten der NO_x-, der NO₂- und der O₃-Konzentration im Hintergrund, der NO_x-Gesamtbelastung am Ort der Untersuchung (im Straßenraum) sowie dem Anteil der NO₂-Direktemissionen an den NO_x-Emissionen abhängig.

Alternativ steht ein statistischer Ansatz nach Romberg et al. (1996) zur Verfügung, der nur abhängig ist von der NO_x-Gesamtbelastung. Weitere Einflussgrößen, wie z. B. der Anteil der NO₂-Direktemissionen an den NO_x-Emissionen oder die O₃-Konzentration im Hintergrund, werden nicht berücksichtigt. Der Jahresmittelwert der NO₂-Gesamtbelastung wird über eine aus einer Regressionsanalyse abgeleiteten modifizierten gebrochen-rationalen Funktion berechnet, die über die Parameter A, B und C bestimmt wird. Die Parameter A, B und C sind in den vergangenen Jahren mehrfach bestimmt worden und unterscheiden sich je nach Datenkollektiv, das für die Regressionsanalyse verwendet wurde. Tabelle 8-22 zeigt drei Möglichkeiten der Parametrisierung des Romberg-Ansatzes.

In der ersten Zeile in Tabelle 8-22 sind die Werte der ursprünglichen Veröffentlichung von Romberg et al. (1996) angegeben, ermittelt aus den NO₂- und NO_x-Messdaten der Jahre 1985 bis 1990 von etwa 150

Stationen in den alten Bundesländern. Bei dieser Auswertung wurde nicht nach dem Stationstyp (Verkehr, städtischer Hintergrund, ländlicher Hintergrund) unterschieden.

Die Werte in der zweiten Zeile in Tabelle 8-22 basieren auf der Auswertung von Daten des LIMBA-Messnetzes des Umweltbundesamtes (IVU Umwelt, 2002). In die Regressionsanalyse gingen knapp 2200 Zeitreihen von städtischen Hintergrundstationen aus den Jahren 1956 bis 1998 ein.

Bächlin et al. (2007) schlagen eine Parametrisierung des Romberg-Ansatzes vor, die auf 1324 Datensätzen des Umweltbundesamtes und des Landes Baden-Württemberg für den Zeitraum 2004 bis 2006 beruht. Das Datenkollektiv umfasst Messdaten von städtischen, vorstädtischen und ländlichen Hintergrundstationen sowie von Verkehrsstationen. Die entsprechenden Parameter sind in der dritten Zeile in Tabelle 8-22 angegeben. Die sich daraus ergebende Funktion liefert ab einem NO_x -Jahresmittelwert von etwa $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zunehmend höhere NO_2 -Jahresmittelwerte als die Parametrisierungen nach Romberg et al. (1996) und nach IVU Umwelt (2002).

Tabelle 8-22: Möglichkeiten der Parametrisierung des Romberg-Ansatzes

Autor	A	B	C
Romberg et al. (1996)	103.00	130.00	0.0050
IVU Umwelt (2002)	67.70	84.77	0.0698
Bächlin et al. (2007)	29.00	35.00	0.2170

Für die Auswahl des für die vorliegende Aufgabenstellung geeigneten Modellkonzepts zur Ermittlung der NO_2 -Gesamtbelastung wurden das Verfahren nach Düring & Bächlin (2009) und der Romberg-Ansatz in den Parametrisierungen nach Tabelle 8-22 für die drei Untersuchungsgebiete miteinander verglichen. Für das Verfahren nach Düring & Bächlin (2009) wurde dabei die NO_x -Hintergrundbelastung entsprechend Tabelle 8-16 angesetzt. Die NO_2 -Hintergrundbelastung wurde entsprechend der am Ende dieses Abschnitts getroffenen Auswahl über den Romberg-Ansatz in der Parametrisierung nach IVU Umwelt (2002) aus der NO_x -Hintergrundbelastung bestimmt. Als O_3 -Hintergrundbelastung wurde der Jahresmittelwert der RCG-Ergebnisse in der Gitterzelle des jeweiligen Modellgebiets angesetzt (Tabelle 8-23). Der Anteil der NO_2 -Direktemissionen an den NO_x -Emissionen wurde analog zu Abschnitt 8.7.3 auf 23 % gesetzt.

Tabelle 8-23: Verwendete O_3 -Hintergrundwerte zur Bestimmung der NO_2 -Gesamtbelastung

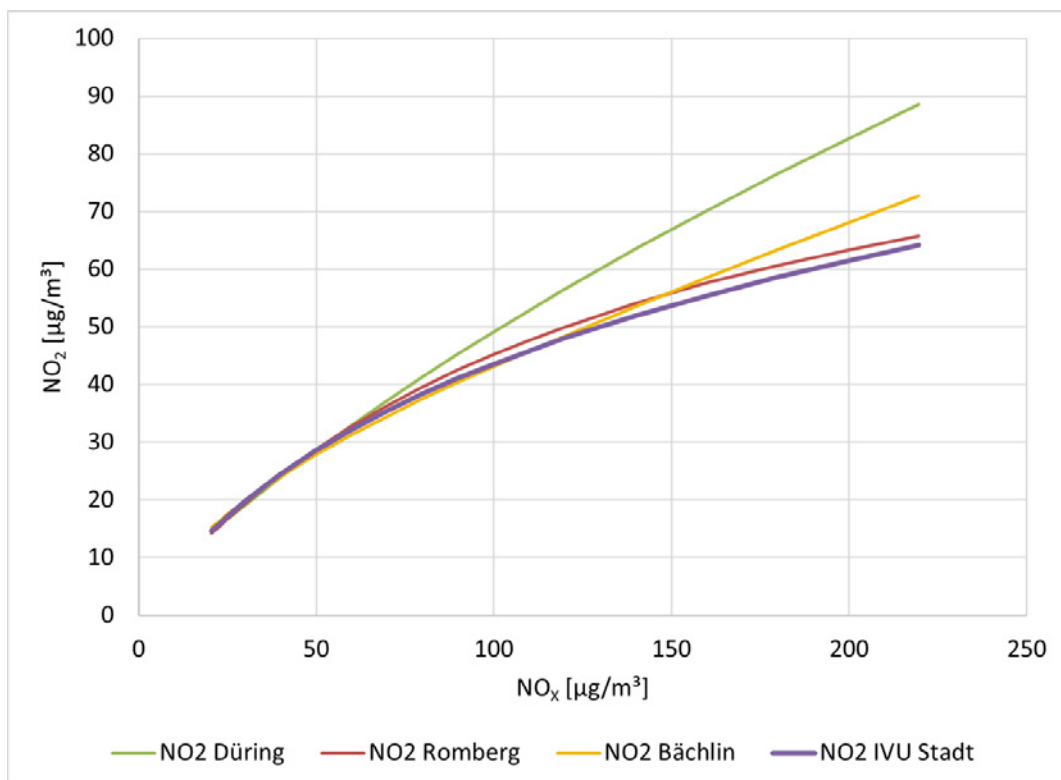
	Berlin	Bremen	Köln
O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	57	56	46

Abbildung 8-13 bis Abbildung 8-15 zeigen den Verlauf der NO_2 -Gesamtbelastung in Abhängigkeit von der NO_x -Gesamtbelastung für die drei Untersuchungsgebiete Berlin, Bremen und Köln. Demnach verlaufen die Kurven nach Romberg in den Parametrisierungen nach Romberg et al. (1996) und nach IVU Umwelt (2002) für städtische Stationen relativ ähnlich. Der Romberg-Ansatz in der Parametrisierung nach Bächlin et al. (2007) liefert anfangs niedrigere und ab einem NO_x -Jahresmittelwert von etwa $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zunehmend höhere NO_2 -Jahresmittelwerte als die Parametrisierungen nach Romberg et al. (1996) und nach IVU Umwelt (2002). Der Ansatz nach Düring & Bächlin (2009) erzeugt mit den verwendeten Eingangsgrößen für Situationen mit niedriger Vorbelastung (Berlin, Bremen) im unteren NO_x -Bereich niedrigere NO_2 -Werte als die Verfahren nach dem Romberg-Ansatz und liefert dann ab einem NO_x -Jahresmittelwert von etwa $70 - 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zunehmend höhere NO_2 -Jahresmittelwerte als der Romberg-Ansatz in den verschiedenen Parametrisierungen.

Das NO_x -Belastungsniveau im Straßenraum liegt in den Untersuchungsgebieten in der Prognose 2020 im Mittel bei $40 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit Maximalwerten bis ca. $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit in dem Bereich, für den alle hier betrachteten Verfahren ähnliche Ergebnisse für die NO_2 -Gesamtbelastung liefern. Da der Ansatz nach Düring & Bächlin (2009) eine explizite Parametrisierung für den Straßenraum beinhaltet, hier aber auch andere städtische Räume (Plätze, Innenhöfe) betrachtet werden, und zudem für Situationen mit niedriger Vorbelastung (Berlin, Bremen) im unteren NO_x -Bereich niedrigere NO_2 -Werte als die Verfahren nach dem Romberg-Ansatz liefert, wurde zur Bestimmung der NO_2 -Gesamtbelastung der Romberg-Ansatz verwendet.

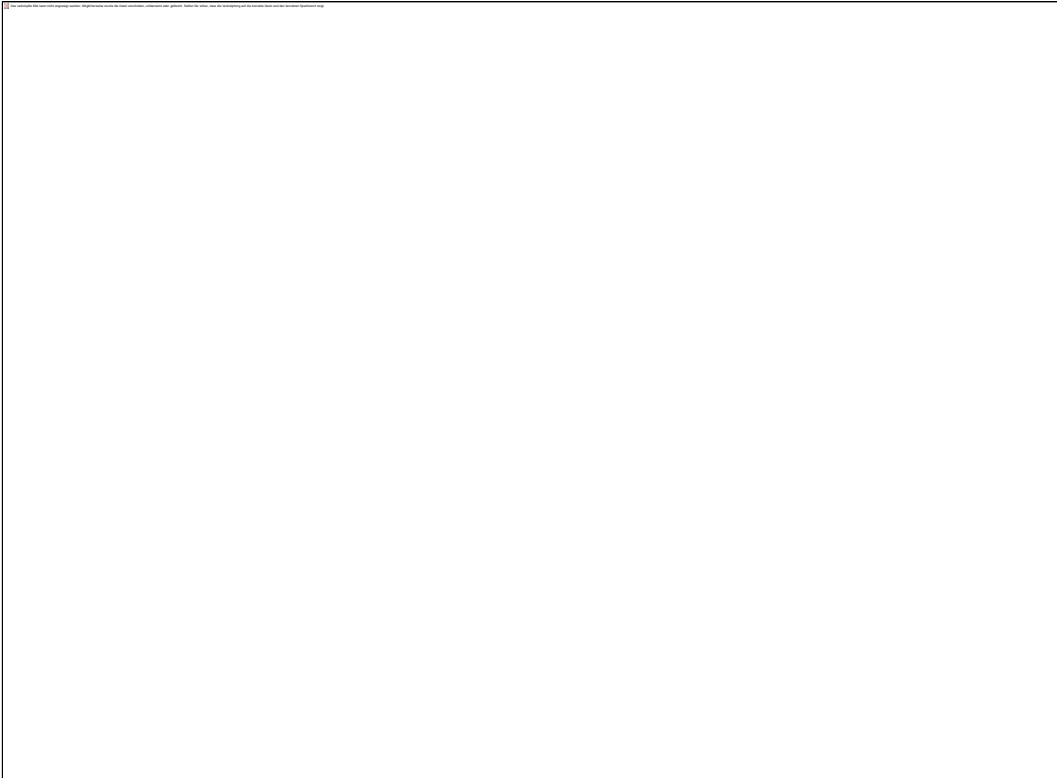
Der Romberg-Ansatz wurde in der Parametrisierung nach IVU Umwelt (2002) für städtische Hintergrundstationen entsprechend Tabelle 8-22 angewendet. Diese Parametrisierung basiert auf einem deutlich umfangreicheren Datenkollektiv als die nach Romberg et al. (1996). Im Vergleich mit der Parametrisierung nach Bächlin et al. (2007) weist sie zwischen $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x -Gesamtbelastung, also in dem hier relevanten Bereich, geringfügig höhere NO_2 -Belastungen aus.

Abbildung 8-13: NO_2 -Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-14: NO₂-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 8-15: NO₂-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln, nach Düring & Bächlin (2009) und nach Romberg in den Parametrisierungen gemäß Tabelle 8-22



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

8.7.4.2 NO₂-Zusatzbelastung

Die NO₂-Zusatzbelastung durch BHKW-bedingte Emissionsänderungen und Kfz-Emissionen ergibt sich aus der Differenz von NO₂-Gesamtbelastung entsprechend Abschnitt 8.7.4.1 und NO₂-Hintergrundbelastung. Die NO₂-Hintergrundbelastung wurde aus der mit RCG berechneten NO_x-Hintergrundbelastung in der Gitterzelle des jeweiligen Modellgebietes entsprechend Tabelle 8-16 mit Hilfe des Romberg-Ansatzes bestimmt. Dazu wurde in Übereinstimmung mit der Auswahl in Abschnitt 8.7.4.1 die Parametrisierung nach IVU Umwelt (2002) verwendet. Es wurde nicht die mit RCG berechnete NO₂-Hintergrundbelastung in der Gitterzelle des jeweiligen Modellgebietes verwendet, da sich diese von dem mit dem Romberg-Ansatz berechneten NO₂-Hintergrundwert unterscheidet und die Höhe der NO₂-Zusatzbelastung dann wesentlich von der Differenz zwischen NO₂-Hintergrundbelastung nach RCG und NO₂-Hintergrundbelastung nach Romberg abhinge.

Zur Aufteilung der NO₂-Zusatzbelastung auf BHKW und Kfz-Verkehr wurden zunächst die Anteile der BHKW-bedingten NO_x-Immissionsänderung und der Kfz-bedingten NO_x-Zusatzbelastung an der gesamten mit LASAT berechneten NO_x-Zusatzbelastung bestimmt. Diese Anteile wurden dann auf die NO₂-Zusatzbelastung übertragen.

8.7.5 Ergebnisse

8.7.5.1 NO₂-Gesamtbelastung

Bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 8-24 bis Tabelle 8-26 zeigt sich analog zur NO_x-Gesamtbelastung in Abschnitt 8.7.2, dass die höchsten Werte der NO₂-Gesamtbelastung im Bereich der maximal belasteten Fläche im Straßenraum (MBF Straße) zu finden sind, da hier der Anteil der Kfz-bedingten NO₂-Zusatzbelastung am höchsten ist (Abschnitt 8.7.5.2). Die nächsthöheren Werte der NO₂-Gesamtbelastung finden sich beim Flächenmittel über das gesamte Auswertungsgebiet, und die niedrigsten Werte befinden sich im Bereich der durch die BHKW-bedingten Emissionsänderungen maximal belasteten Fläche MBF, die am geringsten durch Kfz-Emissionen belastet wird. Für das Flächenmittel und die MBF Straße sind jeweils die Ergebnisse für die durch eine im Vergleich zu den anderen beiden AKTerm niedrigere mittlere Windgeschwindigkeit charakterisierte AKTerm Köln am höchsten. Dies gilt nicht für die MBF, da diese in den Modellgebieten Bremen und Köln für die AKTerm Köln eine niedrigere NO_x-Gesamtbelastung aufgrund einer niedrigeren Kfz-bedingten NO_x-Zusatzbelastung aufweist als für die beiden anderen AKTerm.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die für die drei Untersuchungsgebiete für das Jahr 2020 prognostizierte NO₂-Gesamtbelastung die tatsächliche NO₂-Gesamtbelastung unterschätzt. Die Ursache liegt wie bei der prognostizierten NO_x-Gesamtbelastung (Abschnitt 8.7.2) darin, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Prognose der Kfz-Emissionen für das Jahr 2020 sowohl im APS2020 als auch im HBEFA 3.2 (INFRAS, 2014) zu optimistisch ist.

Tabelle 8-24: NO₂-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Berlin in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	18.9	19.0	20.5	16.5	16.9	18.1	24.2	24.5	26.9
1b	19.1	19.3	20.9	17.3	17.5	19.5	24.5	24.8	27.4
2a	18.8	18.9	20.4	16.3	16.7	17.7	24.1	24.4	26.8
2b	19.0	19.1	20.7	16.9	17.2	18.7	24.3	24.6	27.1
3a	18.7	18.8	20.2	15.9	16.3	17.0	23.9	24.2	26.5
3b	18.7	18.8	20.3	16.0	16.4	17.2	24.0	24.2	26.6
4a	18.6	18.7	20.1	15.6	16.1	16.6	23.8	24.1	26.4
4b	18.5	18.7	20.1	15.5	16.0	16.4	23.8	24.0	26.3
5a	19.6	19.8	21.5	18.8	18.7	21.9	25.2	25.5	28.4
5b	20.6	20.8	22.9	21.7	21.1	26.4	26.5	26.8	30.2
6a	19.3	19.5	21.2	17.9	18.1	20.5	24.8	25.1	27.8
6b	20.1	20.3	22.2	20.1	19.9	24.0	25.8	26.1	29.2
7a	18.8	18.9	20.4	16.3	16.6	17.6	24.1	24.3	26.7
7b	18.9	19.1	20.6	16.8	17.0	18.5	24.3	24.6	27.1
8a	18.5	18.6	20.0	15.3	15.9	16.0	23.7	24.0	26.2
8b	18.4	18.5	19.8	14.9	15.6	15.4	23.5	23.8	25.9

Tabelle 8-25: NO₂-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Bremen in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	16.70	16.84	17.59	15.0	15.0	14.7	21.4	21.8	23.8
1b	16.91	17.06	17.87	15.4	15.4	15.2	21.7	22.1	24.1
2a	16.65	16.77	17.51	14.9	14.9	14.5	21.3	21.7	23.7
2b	16.80	16.93	17.71	15.1	15.2	14.9	21.5	21.9	23.9
3a	16.53	16.65	17.36	14.6	14.7	14.3	21.2	21.5	23.5
3b	16.56	16.69	17.41	14.7	14.7	14.3	21.2	21.6	23.6
4a	16.47	16.59	17.28	14.5	14.5	14.1	21.1	21.4	23.4
4b	16.45	16.56	17.25	14.5	14.5	14.0	21.1	21.4	23.4
5a	17.31	17.48	18.39	16.1	16.2	16.2	22.2	22.7	24.8
5b	18.12	18.33	19.46	17.6	17.8	18.2	23.3	23.8	26.1
6a	17.08	17.23	18.09	15.7	15.8	15.7	21.9	22.3	24.4
6b	17.67	17.85	18.87	16.8	16.9	17.1	22.7	23.2	25.4
7a	16.63	16.76	17.49	14.8	14.9	14.5	21.3	21.7	23.7
7b	16.76	16.90	17.67	15.1	15.1	14.8	21.5	21.9	23.9
8a	16.40	16.51	17.18	14.4	14.4	13.9	21.0	21.3	23.3
8b	16.30	16.40	17.05	14.2	14.2	13.6	20.9	21.2	23.1

Tabelle 8-26: NO₂-Gesamtbelastung für das Untersuchungsgebiet Köln in Abhängigkeit von Auswertungsfläche und verwendeter AKTerm

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	26.0	26.2	26.6	24.8	24.8	24.4	26.9	27.0	27.5
1b	26.1	26.3	26.7	25.0	25.1	24.7	27.0	27.1	27.7
2a	26.0	26.2	26.6	24.7	24.8	24.3	26.9	27.0	27.4
2b	26.1	26.2	26.6	24.9	24.9	24.5	27.0	27.1	27.6
3a	26.0	26.1	26.5	24.6	24.7	24.2	26.8	26.9	27.3
3b	26.0	26.1	26.5	24.7	24.7	24.2	26.8	26.9	27.4
4a	26.0	26.1	26.5	24.6	24.6	24.1	26.8	26.9	27.3
4b	25.9	26.1	26.5	24.6	24.6	24.1	26.8	26.9	27.3
5a	26.2	26.4	26.9	25.3	25.5	25.2	27.3	27.4	28.0
5b	26.5	26.7	27.3	26.0	26.3	26.3	27.8	27.9	28.8
6a	26.2	26.3	26.8	25.1	25.2	24.9	27.1	27.2	27.8
6b	26.4	26.5	27.0	25.6	25.8	25.7	27.5	27.6	28.4
7a	26.0	26.1	26.6	24.7	24.8	24.3	26.9	27.0	27.4
7b	26.1	26.2	26.6	24.8	24.9	24.5	27.0	27.1	27.5
8a	25.9	26.1	26.5	24.5	24.5	24.0	26.8	26.8	27.2
8b	25.9	26.0	26.4	24.4	24.4	23.8	26.7	26.8	27.1

8.7.5.2 NO₂-Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau

Tabelle 8-27 bis Tabelle 8-29 zeigen die NO₂-Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau für die drei Untersuchungsgebiete, jeweils für die drei betrachteten AKTerm. In jeder Tabelle sind die Ergebnisse für das Flächenmittel über das Auswertungsgebiet, für die maximal beaufschlagte Fläche und für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum wiedergegeben. Zusätzlich ist zum Vergleich die durch Kfz-Emissionen hervorgerufene lokale NO₂-Zusatzbelastung angegeben. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.2.

Die NO₂-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in den meisten Fällen zu, nur für die Szenarien 4 und 8, die niedrige BHKW-Emissionsfaktoren und den Ersatz von Ölheizkesseln vorsehen, ergibt sich analog zu NO_x in Abschnitt 8.6.2 eine Abnahme der Immissionsbelastung durch den Einsatz der BHKW. Grundsätzlich sind wie bei NO_x die Werte der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für das Untersuchungsgebiet Berlin am höchsten und für das Untersuchungsgebiet Köln am niedrigsten. Innerhalb eines Untersuchungsgebiets ergeben sich jeweils bei Verwendung der durch niedrigere Windgeschwindigkeiten charakterisierten AKTerm Köln die höchsten Werte der NO₂-Immissionsänderung. Gleiches gilt weitgehend auch für die Kfz-bedingte NO₂-Zusatzbelastung.

Je nach Szenario erreicht die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Flächenmittel in Berlin bis zu 2 – 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. knapp 50 % der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. In Bremen werden mit maximal 1.7 – 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ebenfalls ca. 50 % der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung erreicht, während in Köln mit maximal 0.6 – 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nur knapp 25 % der Kfz-bedingten Zusatzbelastung erreicht werden.

Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Berlin mit maximal 3 – 5 µg/m³, in Bremen mit maximal 2 – 3 µg/m³ und in Köln mit maximal 1.0 – 1.6 µg/m³ jeweils etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung.

Für die maximal beaufschlagte Fläche ist die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Berlin mit maximal 6 – 10 µg/m³, in Bremen mit maximal 3 – 4 µg/m³ und in Köln mit maximal 1.5 – 2.2 µg/m³ deutlich höher als die Kfz-bedingte NO₂-Zusatzbelastung an der gleichen Stelle. Grund für die im Vergleich zu Kfz hohen Werte ist, dass die MBF im Regelfall in einem Hinterhof liegt, in dem kaum Kfz-bedingte Immissionen auftreten.

Bei der Höhe der berechneten Kfz-bedingte NO₂-Zusatzbelastung ist allerdings aus den gleichen Gründen wie schon bei NO_x in Abschnitt 8.6.2 davon auszugehen, dass die berechneten NO_x-Emissionen des Kfz-Verkehrs die tatsächlichen NO_x-Emissionen im Jahr 2020 unterschätzen und in der Folge das Verhältnis der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zur Kfz-bedingte NO₂-Zusatzbelastung an dieser Stelle überschätzt wird.

Über alle Szenarien betrachtet, ergeben sich die höchsten Zunahmen der Immissionsbelastung durch den BHKW-Ausbau für NO₂ in Szenario 5b, die größten Abnahmen ergeben sich in Szenario 8b.

Tabelle 8-27: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz für Berlin

Szenario	Flächenmittel [µg/m ³]			MBF [µg/m ³]			MBF Straße [µg/m ³]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	0.3	0.3	0.4	0.8	0.7	1.4	0.4	0.4	0.6
1b	0.5	0.6	0.8	1.6	1.3	2.8	0.8	0.8	1.2
2a	0.2	0.2	0.3	0.6	0.5	1.0	0.3	0.3	0.4
2b	0.4	0.4	0.6	1.2	1.0	2.0	0.6	0.6	0.9
3a	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
3b	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2
4a	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.1
4b	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1
5a	1.1	1.1	1.5	3.1	2.6	5.3	1.5	1.6	2.3
5b	2.1	2.2	3.0	6.1	5.1	10.0	3.1	3.1	4.6
6a	0.8	0.8	1.1	2.2	1.9	3.9	1.1	1.2	1.7
6b	1.5	1.6	2.2	4.4	3.8	7.5	2.2	2.3	3.3
7a	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.9	0.3	0.3	0.4
7b	0.3	0.4	0.5	1.0	0.9	1.8	0.5	0.5	0.8
8a	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.3	-0.7	-0.2	-0.2	-0.3
8b	-0.3	-0.3	-0.4	-0.9	-0.6	-1.5	-0.4	-0.4	-0.6
Kfz	4.5	4.7	6.1	1.7	2.1	2.6	9.7	10.0	12.2

Tabelle 8-28: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz für Bremen

Szenario	Flächenmittel [µg/m ³]	MBF [µg/m ³]	MBF Straße [µg/m ³]
----------	------------------------------------	--------------------------	---------------------------------

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4
1b	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	0.6	0.7	0.8
2a	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3
2b	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.8	0.4	0.5	0.6
3a	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
3b	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
4a	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1
4b	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
5a	0.9	0.9	1.1	1.6	1.7	2.1	1.2	1.3	1.6
5b	1.7	1.8	2.3	3.1	3.3	4.1	2.4	2.6	3.1
6a	0.6	0.6	0.8	1.1	1.2	1.5	0.9	0.9	1.1
6b	1.2	1.3	1.6	2.2	2.4	3.0	1.8	1.9	2.2
7a	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
7b	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7	0.4	0.4	0.5
8a	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2
8b	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.6	-0.3	-0.4	-0.4
Kfz	3.3	3.4	4.1	1.4	1.4	1.0	7.9	8.3	10.2

Tabelle 8-29: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz für Köln

Szenario	Flächenmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			MBF Straße [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln	AKTerm Berlin	AKTerm Bremen	AKTerm Köln
1a	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2
1b	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.3	0.3	0.4
2a	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
2b	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3
3a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3b	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
4a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4b	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
5a	0.3	0.3	0.4	0.7	0.8	1.1	0.5	0.5	0.8
5b	0.6	0.6	0.8	1.5	1.7	2.2	1.0	1.1	1.6
6a	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.4	0.4	0.6
6b	0.4	0.5	0.6	1.1	1.2	1.6	0.7	0.8	1.1
7a	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
7b	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3
8a	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1
8b	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2
Kfz	2.6	2.8	3.2	1.3	1.3	0.8	3.5	3.5	3.9

9 Beurteilung und Bewertung des BHKW-Einsatzes

9.1 Variation der Emissionsszenarien

Bisher wurden auf lokaler Ebene 16 Emissionsszenarien entsprechend Abbildung 5-46 betrachtet. Dabei wurde ein mittlerer Wärmebedarf der Gebäude in den drei Modellgebieten angenommen, der als der Mittelwert über alle Sanierungszustände definiert wurde (Abschnitt 6.4.1).

Als Bezugsjahr für die zu verwendenden meteorologischen Daten wurde das Jahr 2010 als das kälteste Jahr im Zeitraum zwischen 2000 und 2014 angesetzt (Abschnitt 6.3). Grundlage für die Auswahl war die Überlegung, dass potenziell sich verstärkende negative Auswirkungen von gleichzeitig auftretendem hohem Wärmebedarf mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen berücksichtigt werden sollen. Für die Modellgebiete wurden die Temperaturverhältnisse über die Anzahl der Heizgradtage erfasst, die sich für 2010 aus den Temperaturzeitreihen des DWD (Abschnitt 6.3) zu rund 2 700 Kd (Berlin, Bremen) bzw. rund 2 400 Kd (Köln) berechnen.

Diese 16 Szenarien werden im Folgenden unter dem Begriff „Ausgangsszenario“ zusammengefasst.

Die Bandbreite der möglichen Emissionsszenarien wurde dann in diesem Abschnitt wie folgt erweitert:

- Variation des Energiestandards: „untere Abschätzung“, „obere Abschätzung“
- Variation der Temperaturverhältnisse im Modellgebiet: untere Grenze

Damit ergeben sich zusammen mit dem Ausgangsszenario insgesamt sechs übergeordnete Szenarien (drei Energiestandards x zwei Temperaturverhältnisse), die jeweils die 16 Szenarien nach Abbildung 5-46 umfassen. Tabelle 9-1 gibt einen Überblick über die Variationen und ihre Namen.

Tabelle 9-1: Ausgangsszenario und Variationen

Variation	Name	Abkürzung
Energiestandard		
Mittelwert ¹	-	-
untere Abschätzung	max Energiestandard	max ESt
obere Abschätzung	min Energiestandard	min ESt
Heizgradtage		
obere Grenze ¹	max Heizgradtage	max HGT
untere Grenze	min Heizgradtage	min HGT
¹ : Ausgangsszenario		

Als „untere Abschätzung“ des Energiestandards der Gebäude in den Modellgebieten wurde der Mittelwert für Neubauten nach EnEV (2002) angesetzt, als „obere Abschätzung“ wurde der Mittelwert für komplett unsanierte Gebäude verwendet. Der aus dem jeweiligen Energiestandard der Gebäude resultierende Endenergiebedarf wurde gemäß Abschnitt 6.4 berechnet.

Da bei den Temperaturverhältnissen mit dem Jahr 2010 die obere Grenze im Ausgangsszenario bereits abgedeckt war, wurde als untere Grenze die niedrigste Anzahl Heizgradtage in den drei Modellgebieten im Zeitraum 2000 bis 2014 angesetzt. Diese wurde aus Abbildung 6-7 zu 1 500 Kd bestimmt.

Die Heizgradtage wirken sich über den Klimafaktor ebenso wie der Energiestandard auf den für 2020 berechneten Endenergiebedarf der Gebäude in den Modellgebieten aus. In Tabelle 9-2 ist der für die sechs

übergeordneten Szenarien nach Tabelle 9-1 ermittelte Endenergiebedarf für die drei Modellgebiete aufgeführt. In den grau markierten Feldern sind die Werte des Ausgangsszenarios angegeben.

Tabelle 9-3 zeigt, wie sich bei Variation von Energiestandard und Heizgradtagen der Endenergiebedarf in den drei Modellgebieten zum Endenergiebedarf im Ausgangsszenario verhält. In den grau markierten Feldern sind wieder die Werte für das Ausgangsszenarios selbst angegeben. Eine Reduzierung der Heizgradtage um etwa 40 % verringert demnach den Endenergiebedarf um 32 % bis 37 % gegenüber dem Ausgangsszenario. Eine Verbesserung des Energiestandards auf den Mittelwert für Neubauten nach EnEV (2002) verringert den Endenergiebedarf um 27 % bis 32 %, und eine Verschlechterung des Energiestandards auf den Mittelwert für komplett unsanierte Gebäude erhöht den Endenergiebedarf um 19 % bis 25%.

Tabelle 9-2: Endenergiebedarf in [MWh] im Bezugsjahr 2020 für die drei Modellgebiete Berlin, Bremen und Köln bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtage HGT; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios

		Berlin		Bremen		Köln	
Energiestandard	Einheit	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT
Mittelwert	[MWh]	112 369	177 729	88 597	141 039	68 839	101 056
untere Abschätzung	[MWh]	82 570	129 130	61 058	95 441	47 028	68 177
obere Abschätzung	[MWh]	137 523	222 003	103 203	167 137	82 981	123 272

Tabelle 9-3: Verhältnis des Endenergiebedarfs in den drei Modellgebieten zum Ausgangsszenario bei Variation des Energiestandards und der Heizgradtagen; Grau markiert sind die Werte des Ausgangsszenarios

		Berlin		Bremen		Köln	
Energiestandard	Einheit	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT	min HGT	max HGT
Mittelwert	[%]	63.2%	100.0%	62.8%	100.0%	68.1%	100.0%
untere Abschätzung	[%]	46.5%	72.7%	43.3%	67.7%	46.5%	67.5%
obere Abschätzung	[%]	77.4%	124.9%	73.2%	118.5%	82.1%	122.0%

Da der Endenergiebedarf linear in die Berechnung der Emissionen eingeht, resultiert eine Änderung des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten in einer gleich hohen Änderung der Emissionen sowohl der einzelnen Quellgruppen (BHKW, Spitzenlastkessel, vermiedene Emissionen) als auch insgesamt der BHKW-bedingten Emissionsänderungen. Entsprechend konnten die Werte der Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau, die in Abschnitt 8 für das Ausgangsszenario bestimmt wurden, mit Hilfe der in Tabelle 9-3 angegebenen Verhältniszahlen auf die übergeordneten Szenarien nach Tabelle 9-1 übertragen werden. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt 9.2.

9.2 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

9.2.1 Allgemeines

Die Abbildungen in den folgenden Abschnitten 9.2.2 bis 9.2.5 zeigen für die Stoffe NO_x, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC die berechnete Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für alle Szenarien nach Tabelle

9-1 und Abbildung 5-46. Da für PM₁₀ und PM_{2.5} auf lokaler Ebene identische Emissionsfaktoren vorlagen (Tabelle 5-12, Tabelle 5-18), sind auch die berechneten Emissionsänderungen und in der Folge die daraus berechneten Immissionsänderungen für diese beiden Stoffe identisch. Im Folgenden wird daher immer nur PM₁₀ dargestellt.

9.2.2 NO_x-Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau

In Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 wird für jedes Untersuchungsgebiet pro AKTerm die für 2020 prognostizierte NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Abhängigkeit von der ausgewerteten Fläche (Flächenmittel, MBF, MBF Straße) nebeneinander in grauen Säulen für alle 16 Szenarien nach Abbildung 5-46 dargestellt. Die Variationen über den Energiestandard und die Heizgradtage gemäß Tabelle 9-1 sind in den Abbildungen durch farbige Balken gekennzeichnet. Die farbigen Balken geben demnach die Spannweite der Immissionsänderung im Szenario 1a bis 8b wieder, der sich durch die Variation des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten auf Grund der Faktoren in Tabelle 9-1 ergibt.

Für NO_x ist zum Vergleich die für 2020 prognostizierte Kfz-bedingte Zusatzbelastung in der jeweils ausgewerteten Fläche (Flächenmittel, MBF, MBF Straße) angegeben. Die Kfz-bedingte Zusatzbelastung variiert nur in Abhängigkeit von der AKTerm und der ausgewerteten Fläche. Sie ist für die MBF Straße am höchsten, auch wenn diese nicht am Ort der höchsten Belastung durch Kfz-Emissionen, sondern am Ort der höchsten BHKW-bedingten Immissionsänderung im Straßenraum lokalisiert ist. Die niedrigsten Werte der Kfz-bedingten Zusatzbelastung ergeben sich für die MBF, weil die MBF im Regelfall in einem Hinterhof liegt, in dem kaum Kfz-bedingte Immissionen auftreten. Wie bereits in Abschnitt 8.6.2 diskutiert, ist davon auszugehen, dass die Kfz-bedingte Zusatzbelastung durch NO_x in der Prognose 2020 unterschätzt wird.

In Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 sind in Form der grau eingefärbten Säulen die in Abschnitt 8.6.2 tabellarisch aufgeführten Werte erfasst. Anhand der Abbildungen wird noch einmal grafisch ersichtlich, dass die Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau erwartungsgemäß für die maximal beaufschlagte Fläche die höchsten Beträge aufweist, gefolgt von der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum und dann vom Flächenmittel über das Auswertungsgebiet. Dabei sind im Untersuchungsgebiet Berlin (Abbildung 9-1) die Werte für die AKTerm Berlin und Bremen im Regelfall vergleichbar hoch, während sich für die AKTerm Köln auf Grund der niedrigeren Windgeschwindigkeiten betragsmäßig höhere Werte ergeben. Für die Untersuchungsgebiete Bremen (Abbildung 9-2) und Köln (Abbildung 9-3) steigen die berechneten Werte der NO_x-Immissionsänderung von der AKTerm Berlin über die AKTerm Bremen zur AKTerm Köln mehr oder weniger gleichmäßig an.

Die NO_x-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in den meisten Fällen zu, nur für die Szenarien 4 und 8, die niedrige BHKW-Emissionsfaktoren und den Ersatz von Ölheizkesseln vorsehen, ergibt sich eine Abnahme der Immissionsbelastung durch den Einsatz der BHKW. Insgesamt ergeben sich maximale Werte der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Szenario 5b, und minimale Werte ergeben sich im Szenario 8b.

Die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau erreicht in den Untersuchungsgebieten Berlin und Bremen im Flächenmittel ca. 50 %, im Untersuchungsgebiet Köln etwa ein Viertel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung. Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht sie etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung, und für die maximal beaufschlagte Fläche ist sie deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle. Wie aber bereits in Abschnitt 8.6.2 diskutiert, ist davon auszugehen, dass die berechneten NO_x-Emissionen des Kfz-Verkehrs die tatsächlichen NO_x-Emissionen im Jahr 2020 unterschätzen und somit das Verhältnis der NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zur Kfz-bedingten NO_x-Zusatzbelastung an dieser Stelle überschätzt wird.

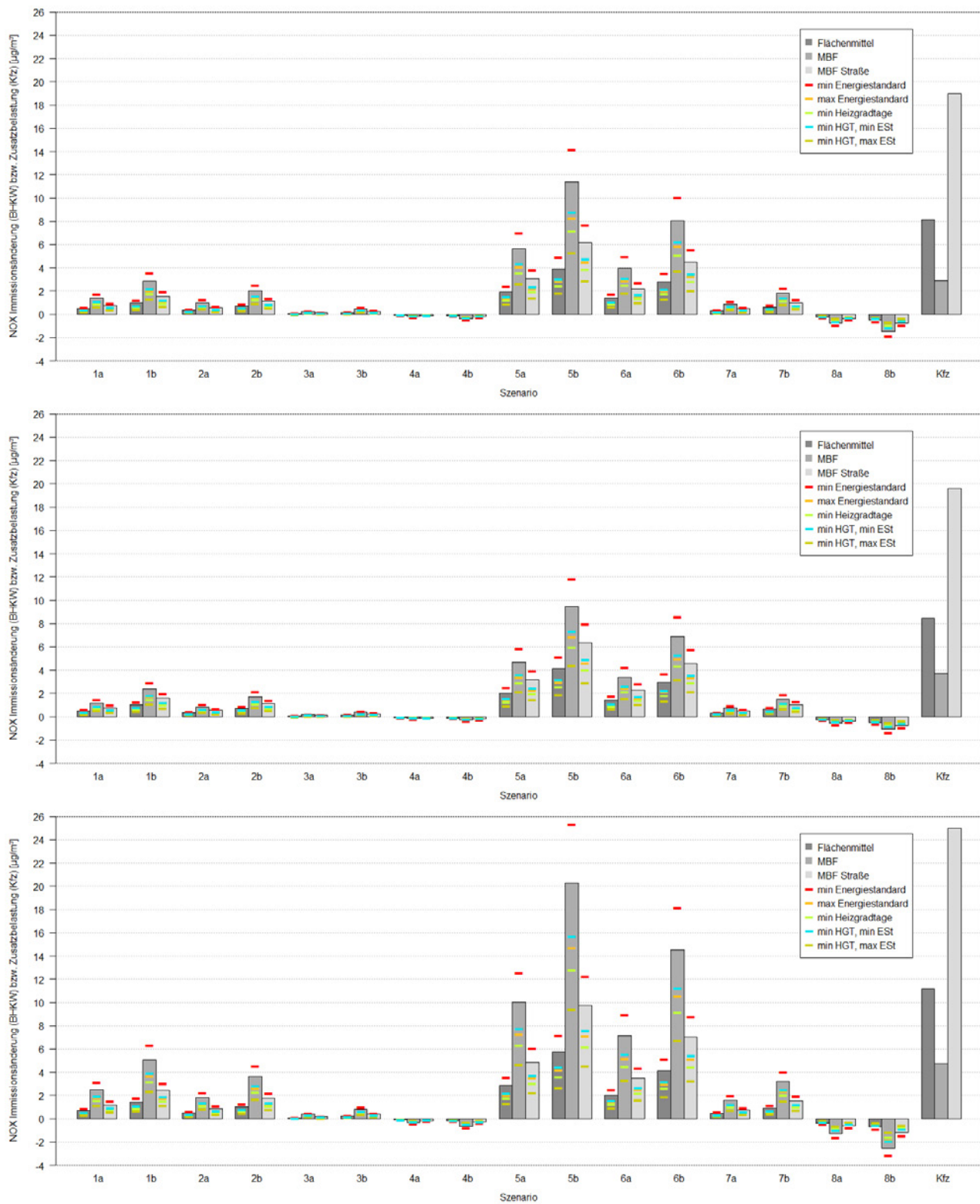
Durch die Variation des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten nach Tabelle 9-1 ändern sich die Werte der mit dem Ausgangsszenario bestimmten NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau entsprechend Tabelle 9-3. Der maximal ungünstige Fall ergibt sich bei der Annahme komplett unsanierter Gebäude im Modellgebiet („obere Abschätzung“) und der oberen Grenze der Heizgradtage. In diesem Fall, in Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 durch einen roten Balken gekennzeichnet, erhöht sich die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau um 19% bis 25%. Im günstigsten Fall bei Annahme eines mittleren Energiestandards entsprechend dem von Neubauten nach EnEV (2002) („untere Abschätzung“) und der unteren Grenze der Heizgradtage, reduziert sich die NO_x -Immissionsänderung um mehr als die Hälfte (olivfarbener Balken in Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3). Diese beiden Grenzen geben die Spannbreite der NO_x -Immissionsänderung durch Variation des Endenergiebedarfs vor, in die sich die Ergebnisse der anderen Variationen nach Tabelle 9-1 einsortieren.

In Abbildung 9-4 werden die Ergebnisse des Ausgangsszenarios für die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau noch einmal für alle drei Untersuchungsgebiete zusammenfassend dargestellt. Pro Untersuchungsgebiet sind die 16 Werte der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau aus dem Ausgangsszenario durch Balken in einer Säule übereinander dargestellt. Es sind in Abhängigkeit von der ausgewerteten Fläche (Flächenmittel, MBF, MBF Straße) jeweils drei Säulen nebeneinander dargestellt, die die Ergebnisse bei Verwendung der verschiedenen AKTerm darstellen und damit den Einfluss der jeweiligen meteorologischen Bedingungen (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Ausbreitungsklasse) auf die Immissionsänderung zeigen. Die Reihenfolge der 16 Szenarien innerhalb einer Säule ist für alle neun Säulen innerhalb einer Grafik gleich und ist mit den Kürzeln der Szenarien jeweils am rechten Rand der Grafik angegeben.

Abbildung 9-4 ermöglicht neben den Aussagen, die sich aus Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 ergeben, einen direkten Vergleich des Einflusses der AKTerm sowie des Untersuchungsgebiets auf die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau. Der Einfluss der AKTerm wurde weiter oben im Vergleich der Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 bereits beschrieben, er ist hier in Abbildung 9-4 im direkten Vergleich aber deutlich besser zu erkennen.

Hinsichtlich des Untersuchungsgebietes ergeben sich die höchsten Werte der NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für Berlin, gefolgt von Bremen, und die niedrigsten Werte ergeben sich für Köln. Dies entspricht dem Verhältnis der BHKW-bedingten Emissionsänderungen der drei Untersuchungsgebiete zueinander (Abschnitt 6.5.5).

Abbildung 9-1: NO_x-Immissionsänderungen durch BHKW und NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-2: NO_x-Immissionsänderungen durch BHKW und NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



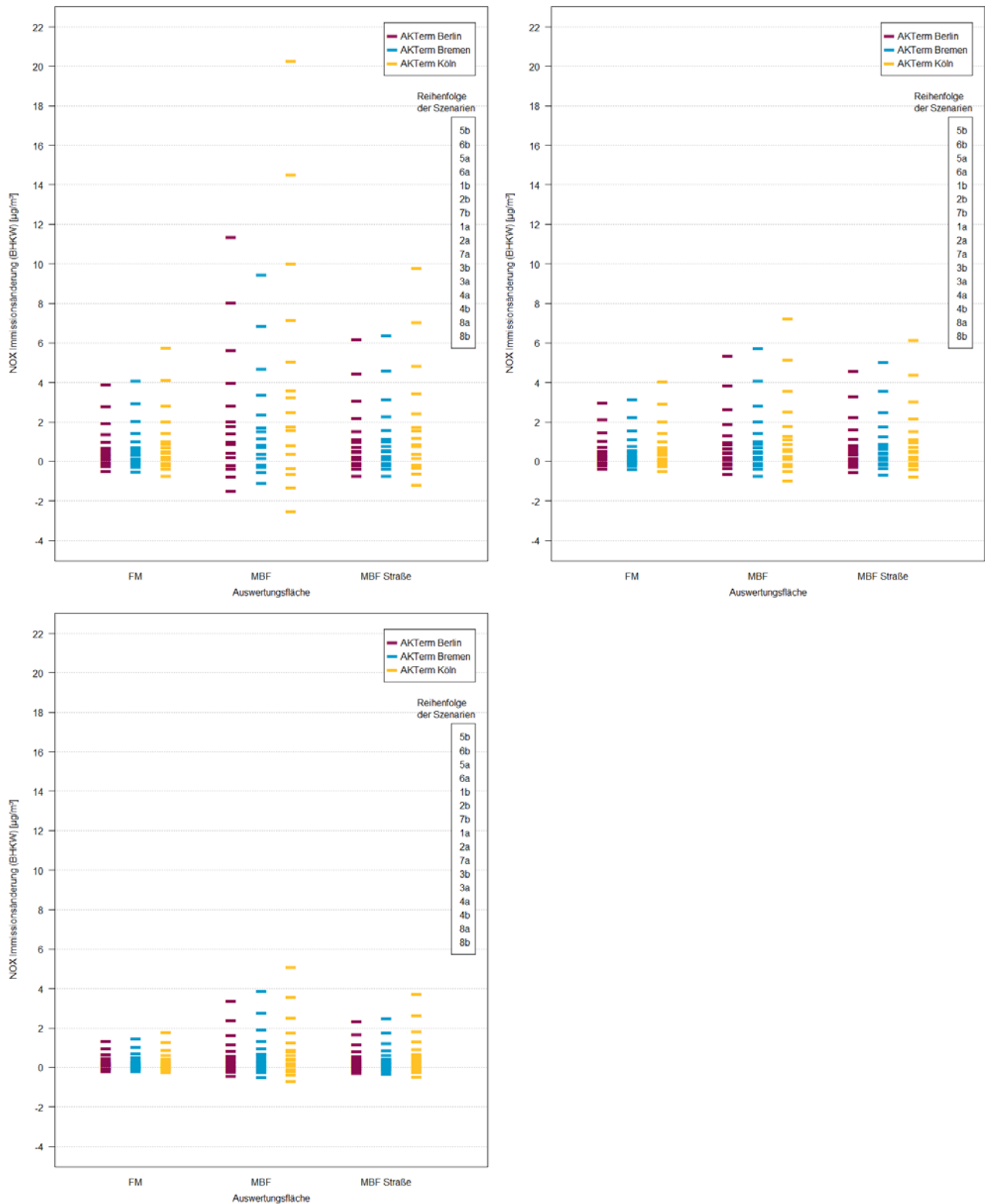
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-3: NO_x-Immissionsänderungen durch BHKW und NO_x-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-4: Zusammenfassung der NO_x-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

9.2.3 NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau

In Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7 wird für jedes Untersuchungsgebiet pro AKTerm die für 2020 prognostizierte NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für alle Szenarien nach Tabelle 9-1 und Abbildung 5-46 in Abhängigkeit von der ausgewerteten Fläche dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x-Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Für NO₂ ist wie für NO_x zum Vergleich die für 2020 prognostizierte Kfz-bedingte Zusatzbelastung in der jeweils ausgewerteten Fläche (Flächenmittel, MBF, MBF Straße) angegeben. Die Kfz-bedingte Zusatzbelastung variiert nur in Abhängigkeit von der AKTerm und der ausgewerteten Fläche. Für die grundsätzliche Bewertung der Höhe der Kfz-bedingten NO₂-Zusatzbelastung gilt die gleiche Anmerkung wie für die Kfz-bedingte NO_x-Zusatzbelastung in Abschnitt 9.2.2.

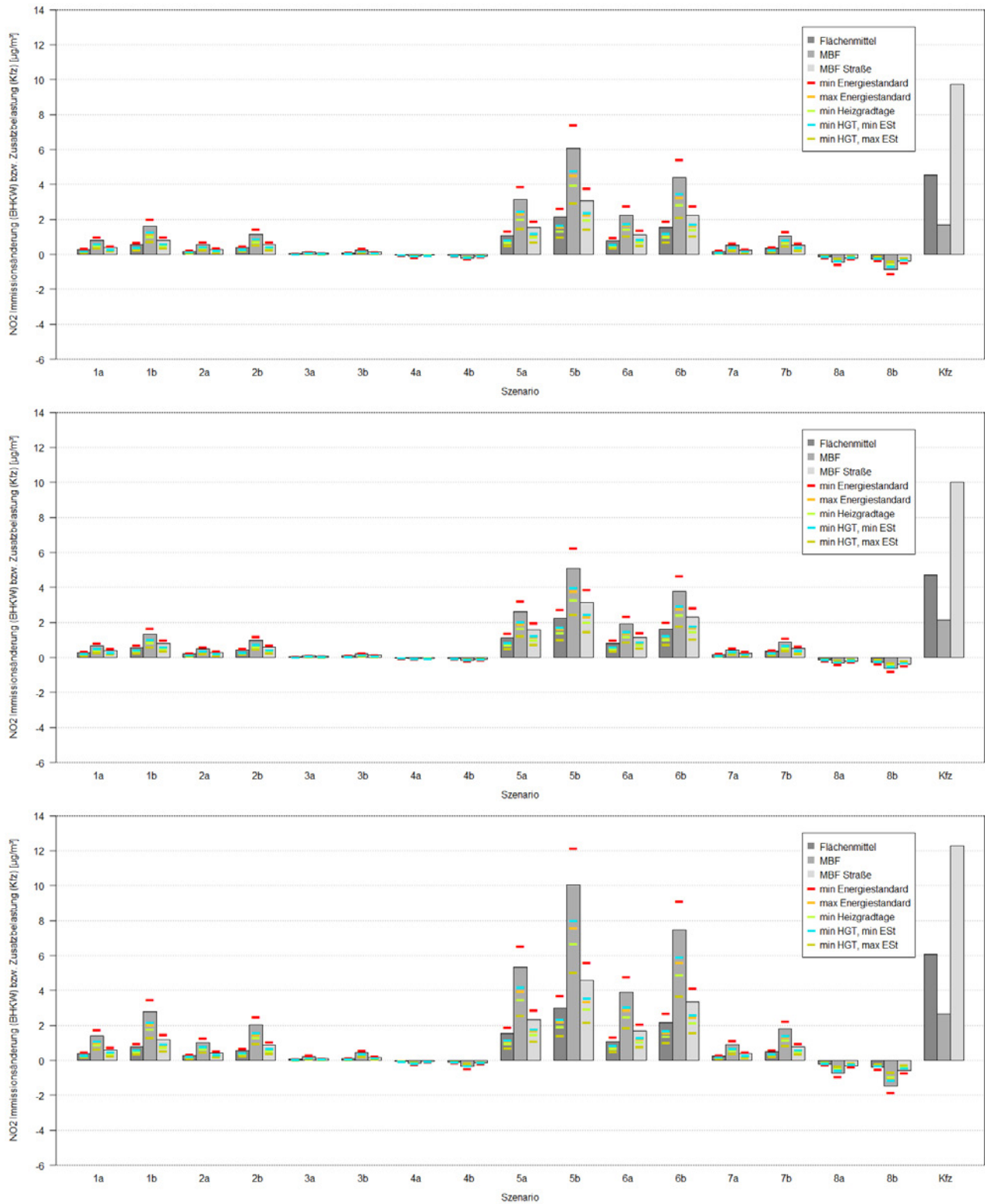
Die Werte der in Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7 dargestellten NO₂-Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau verhalten sich hinsichtlich der betrachteten Auswertungsflächen und des Einflusses der AKTerm genau wie die NO_x-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Abschnitt 9.2.2. Die NO₂-Immissionsbelastung nimmt wie die NO_x-Immissionsbelastung durch den BHKW-Ausbau in den meisten Fällen zu, nur für die Szenarien 4 und 8, die niedrige BHKW-Emissionsfaktoren und den Ersatz von Ölheizkesseln vorsehen, ergibt sich Abnahme der Immissionsbelastung durch den Einsatz der BHKW. Insgesamt ergeben sich wie für NO_x maximale Werte der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Szenario 5b und minimale Werte ergeben sich im Szenario 8b.

Die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau erreicht in den Untersuchungsgebieten Berlin und Bremen im Flächenmittel ca. 50 %, im Untersuchungsgebiet Köln etwa ein Viertel der entsprechenden Kfz-bedingten NO₂-Zusatzbelastung. Für die maximal beaufschlagte Fläche im Straßenraum erreicht sie etwa ein Drittel der entsprechenden Kfz-bedingten Zusatzbelastung, und für die maximal beaufschlagte Fläche ist sie deutlich höher als die Kfz-bedingte Zusatzbelastung an der gleichen Stelle. Wie aber bereits für NO_x in Abschnitt 9.2.2 diskutiert, ist davon auszugehen, dass das Verhältnis der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau zur Kfz-bedingten NO₂-Zusatzbelastung an dieser Stelle überschätzt wird.

Durch die Variation des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten nach Tabelle 9-1 ändern sich die Werte der mit dem Ausgangsszenario bestimmten NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau. Aufgrund des nichtlinearen Einflusses des Romberg-Ansatzes, der zur Bestimmung der NO₂-Gesamtbelastung verwendet wurde, entspricht die Änderung der NO₂-Immissionsänderung durch die Variation des Endenergiebedarfs nicht mehr exakt den in Tabelle 9-3 angegebenen Werten. Die Abweichung von diesen Werten ist aber gering. Der maximal ungünstige Fall ergibt sich wie für NO_x bei der Annahme komplett unsanierter Gebäude im Modellgebiet („obere Abschätzung“) und der oberen Grenze der Heizgradtage. In diesem Fall, in Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7 durch einen roten Balken gekennzeichnet, erhöht sich die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau um 19% bis 25%. Im günstigsten Fall bei Annahme eines mittleren Energiestandards entsprechend dem von Neubauten nach EnEV (2002) („untere Abschätzung“) und der unteren Grenze der Heizgradtage, reduziert sich die NO₂-Immissionsänderung um mehr als die Hälfte (olivfarbener Balken in Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7). Diese beiden Grenzen geben die Spannbreite der NO₂-Immissionsänderung durch Variation des Endenergiebedarfs vor, in die sich die Ergebnisse der anderen Variationen nach Tabelle 9-1 einsortieren.

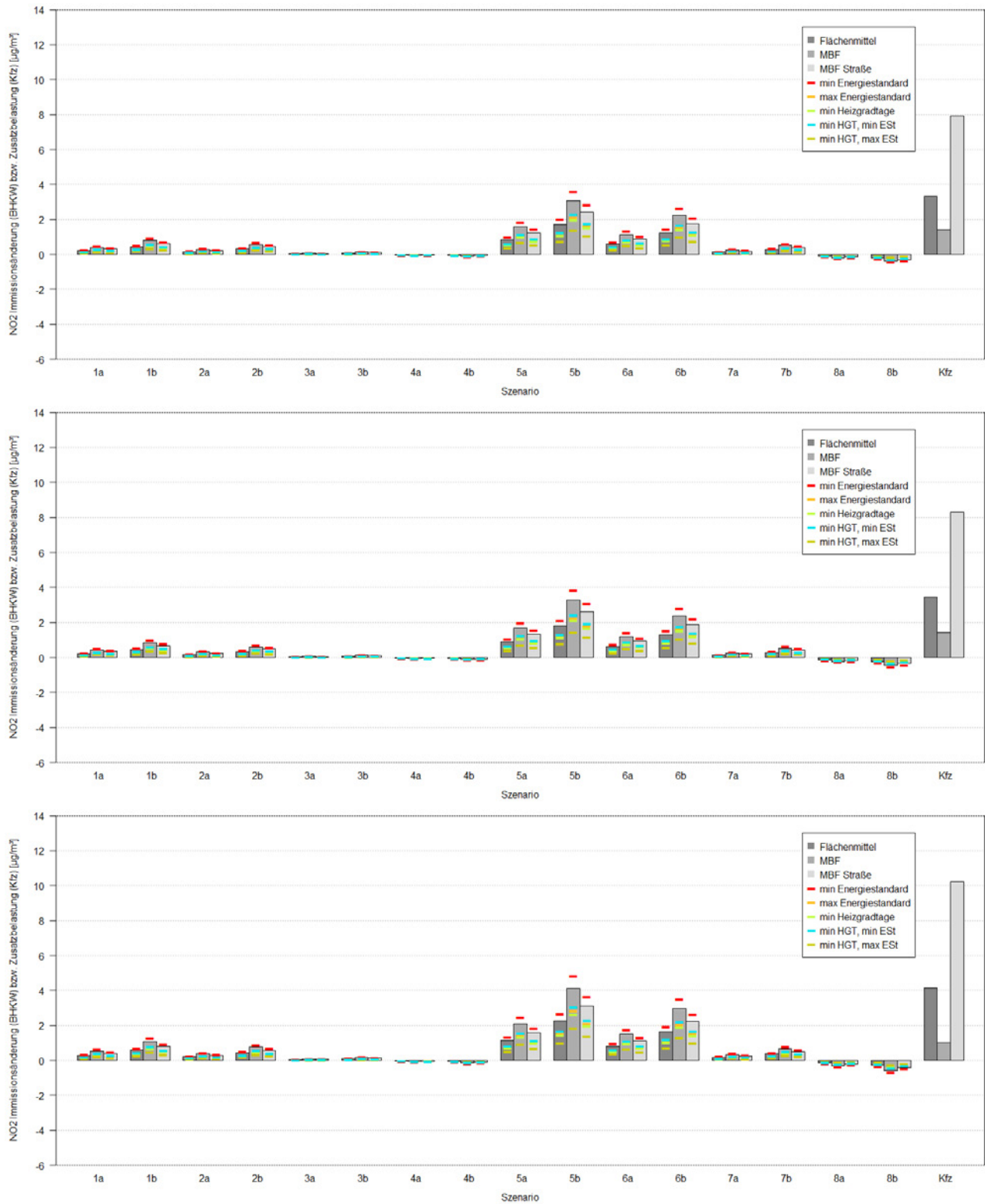
In Abbildung 9-8 werden die Ergebnisse des Ausgangsszenarios für die NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau noch einmal für alle drei Untersuchungsgebiete zusammenfassend dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x-Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Hinsichtlich des Einflusses der AKTerm und des Untersuchungsgebiets auf die Höhe der NO₂-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau ergeben sich die gleichen Aussagen wie für NO_x in Abschnitt 9.2.2.

Abbildung 9-5: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



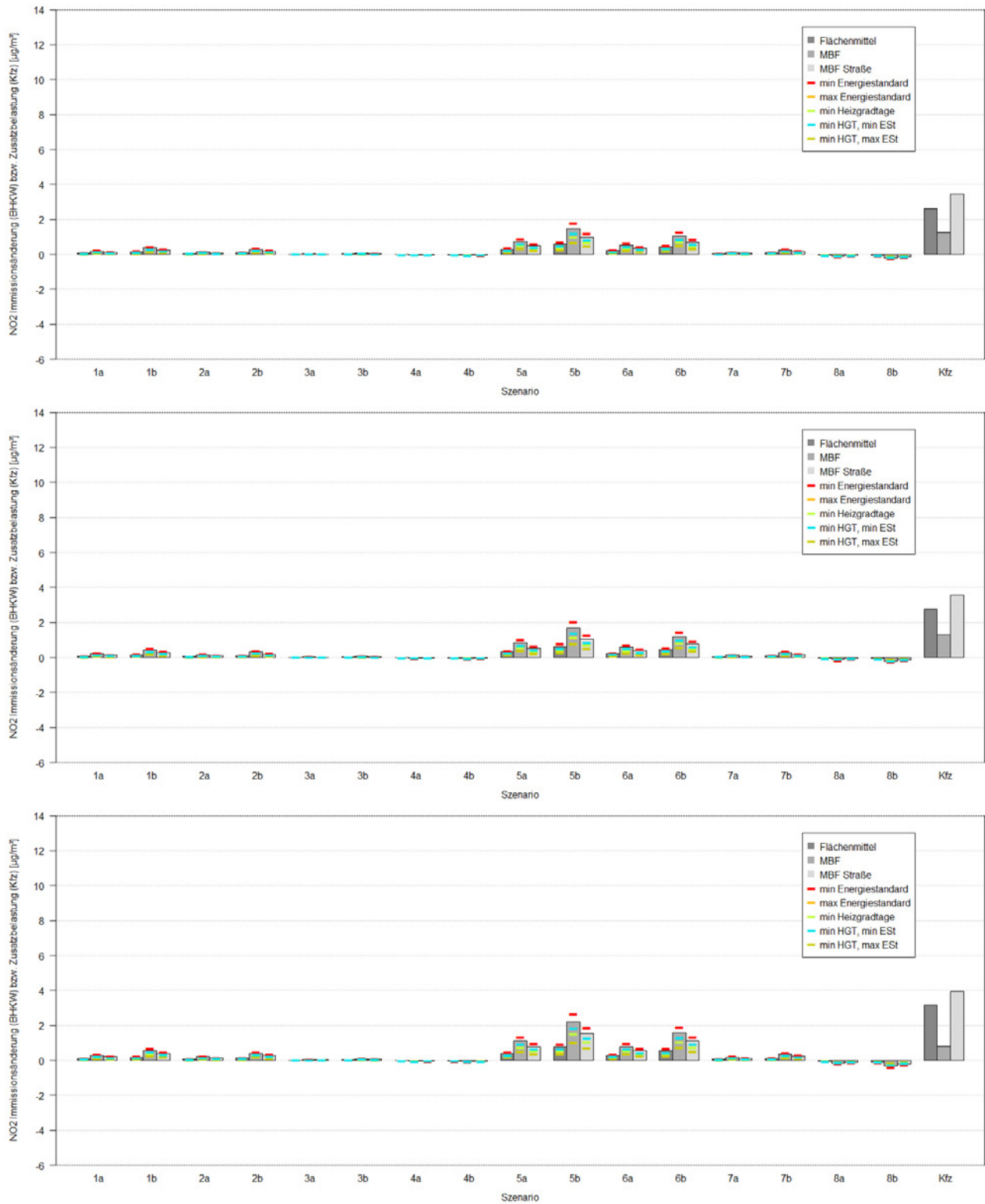
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-6: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



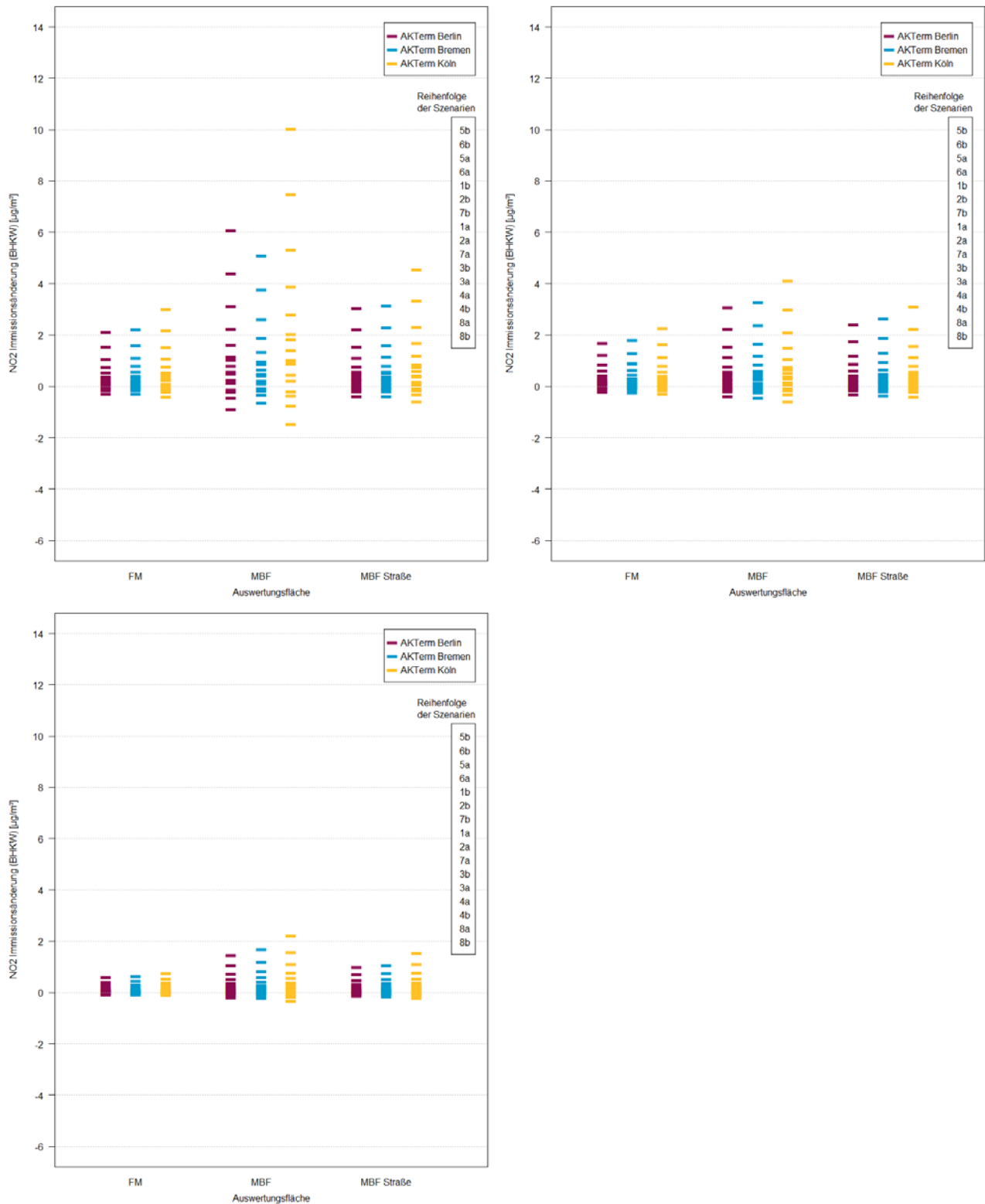
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-7: NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW und NO₂-Zusatzbelastung durch Kfz im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-8: Zusammenfassung der NO₂-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

9.2.4 NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau

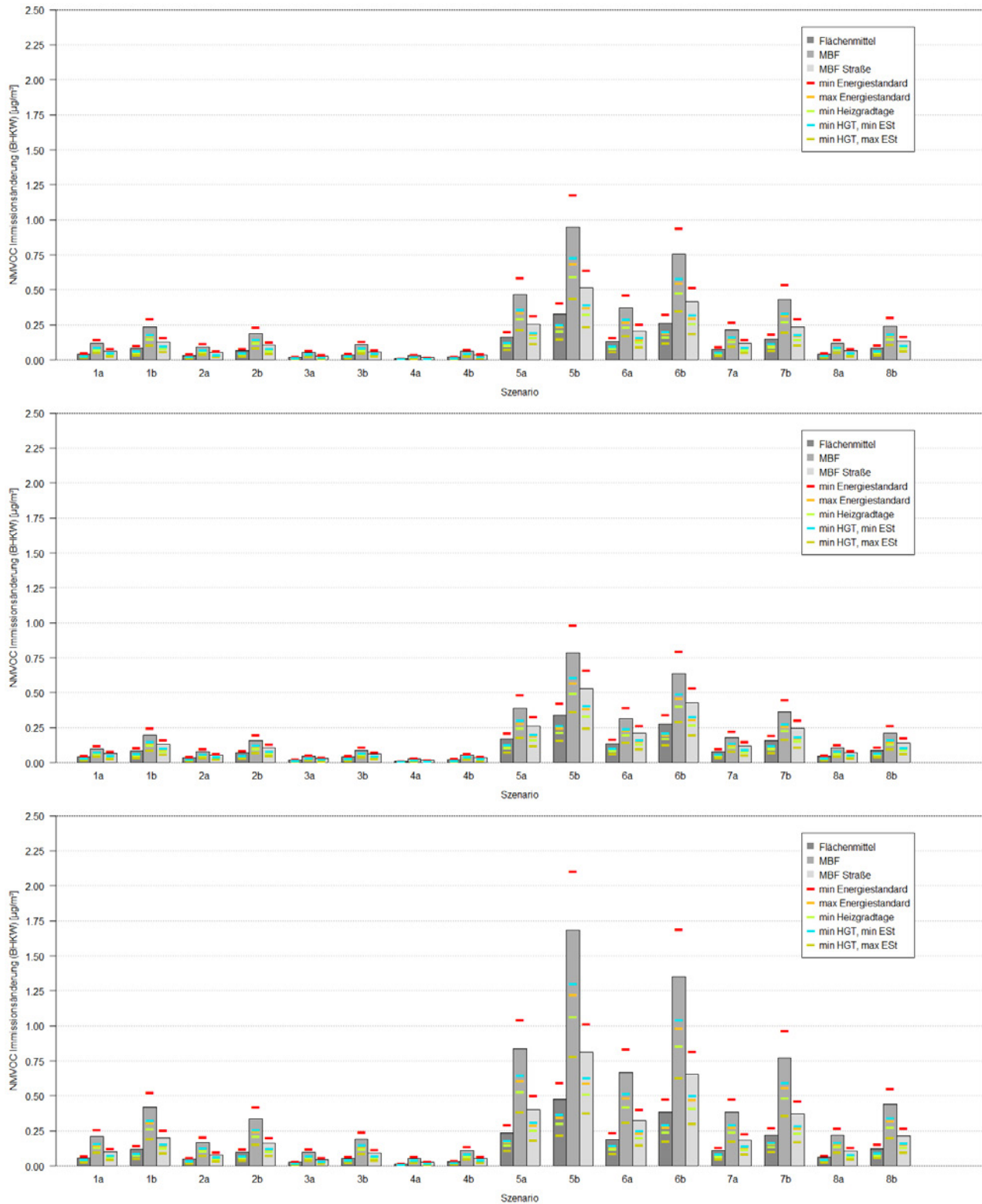
In Abbildung 9-9 bis Abbildung 9-11 wird für jedes Untersuchungsgebiet pro AKTerm die für 2020 prognostizierte NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für alle Szenarien nach Tabelle 9-1 und Abbildung 5-46 in Abhängigkeit von der ausgewerteten Fläche dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x -Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Für NMVOC wurde keine Kfz-bedingte Zusatzbelastung berechnet.

Die Werte der in Abbildung 9-9 bis Abbildung 9-11 dargestellten NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau verhalten sich hinsichtlich der betrachteten Auswertungsflächen und des Einflusses der AKTerm genau wie die NO_x -Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau in Abschnitt 9.2.2. Die NMVOC-Immissionsbelastung nimmt durch den BHKW-Ausbau in allen Fällen zu und erreicht je nach Untersuchungsgebiet und verwendeter AKTerm für die maximal beaufschlagte Fläche MBF Maximalwerte von $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Insgesamt ergeben sich wie für NO_x maximale Werte der NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau im Szenario 5b und minimale Werte im Szenario 8b.

Durch die Variation des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten nach Tabelle 9-1 ändern sich die Werte der mit dem Ausgangsszenario bestimmten NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau entsprechend Tabelle 9-3. Der maximal ungünstige Fall ergibt sich wie bei NO_x und NO_2 bei der Annahme komplett unsanierter Gebäude im Modellgebiet („obere Abschätzung“) und der oberen Grenze der Heizgradtage, der günstigste Fall bei Annahme eines mittleren Energiestandards entsprechend dem von Neubauten nach EnEV (2002) („untere Abschätzung“) und der unteren Grenze der Heizgradtage. Diese beiden Grenzen geben die Spannbreite der NMVOC-Immissionsänderung durch Variation des Endenergiebedarfs vor, in die sich die Ergebnisse der anderen Variationen nach Tabelle 9-1 einsortieren.

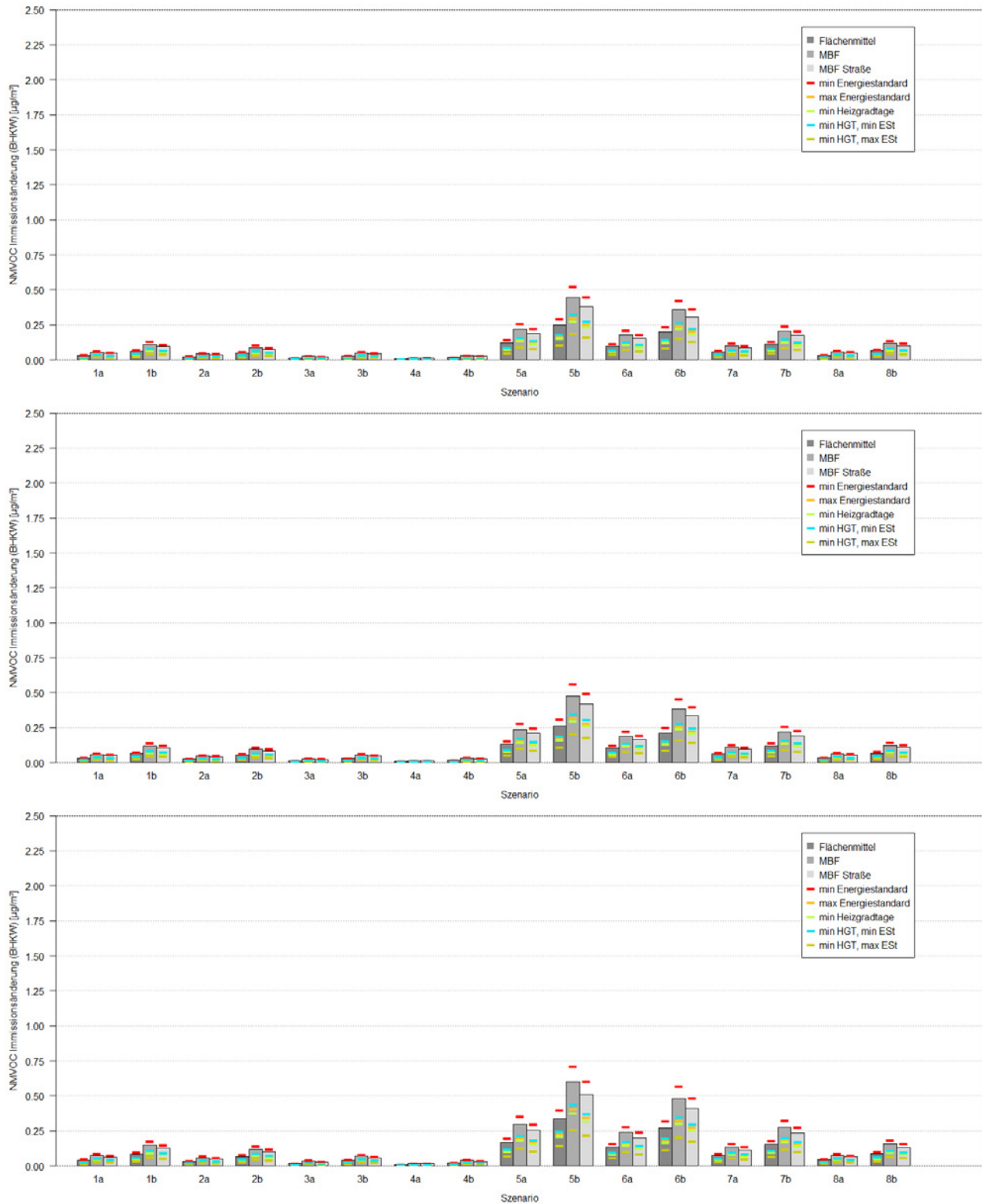
In Abbildung 9-12 werden die Ergebnisse des Ausgangsszenarios für die NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau noch einmal für alle drei Untersuchungsgebiete zusammenfassend dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x -Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Hinsichtlich des Einflusses der AKTerm und des Untersuchungsgebiets auf die Höhe der NMVOC-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau ergeben sich die gleichen Aussagen wie für NO_x in Abschnitt 9.2.2.

Abbildung 9-9: NMVOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



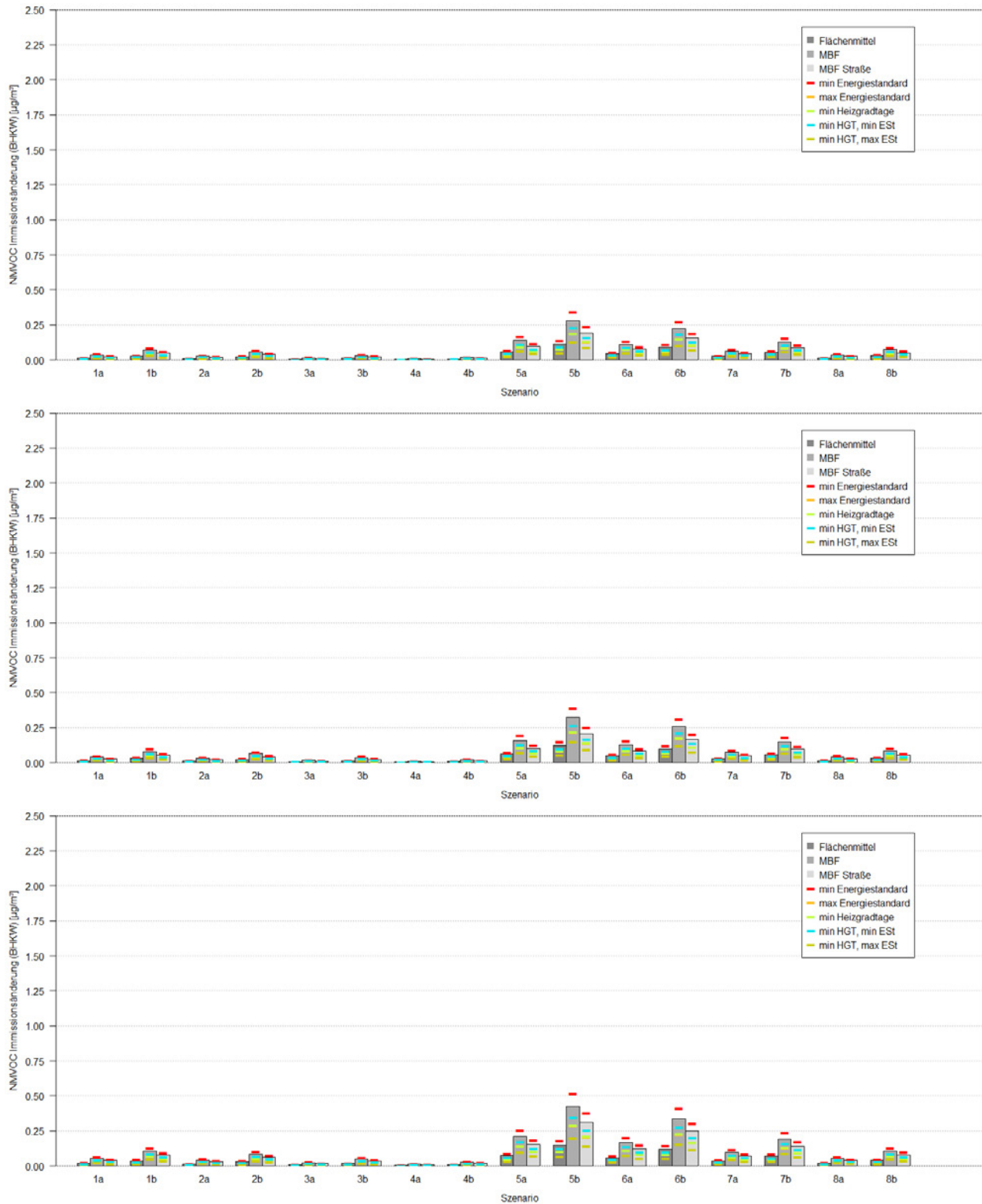
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-10: NMVOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



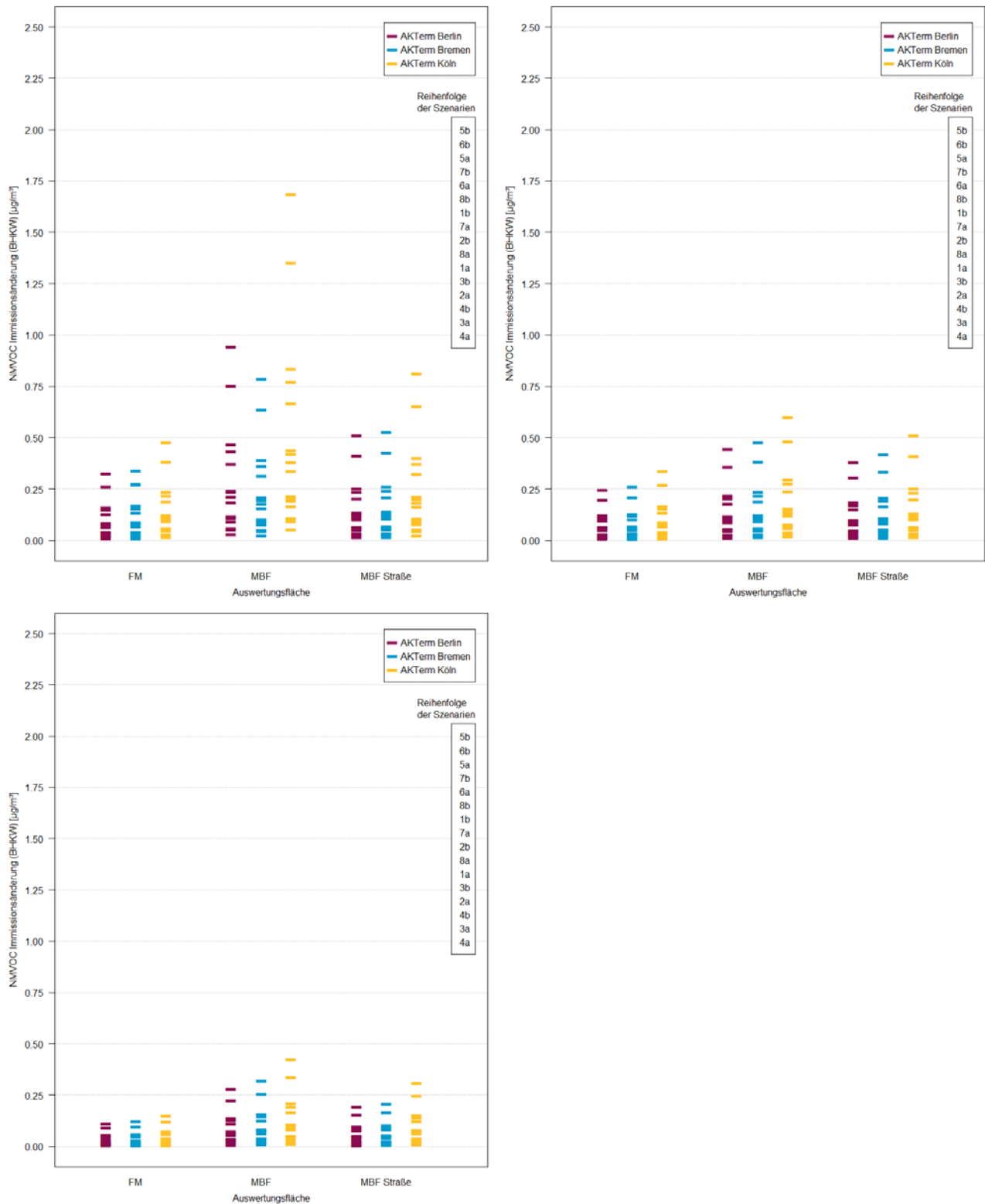
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-11: NMVOC-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-12: Zusammenfassung der NMVOC-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

9.2.5 PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau

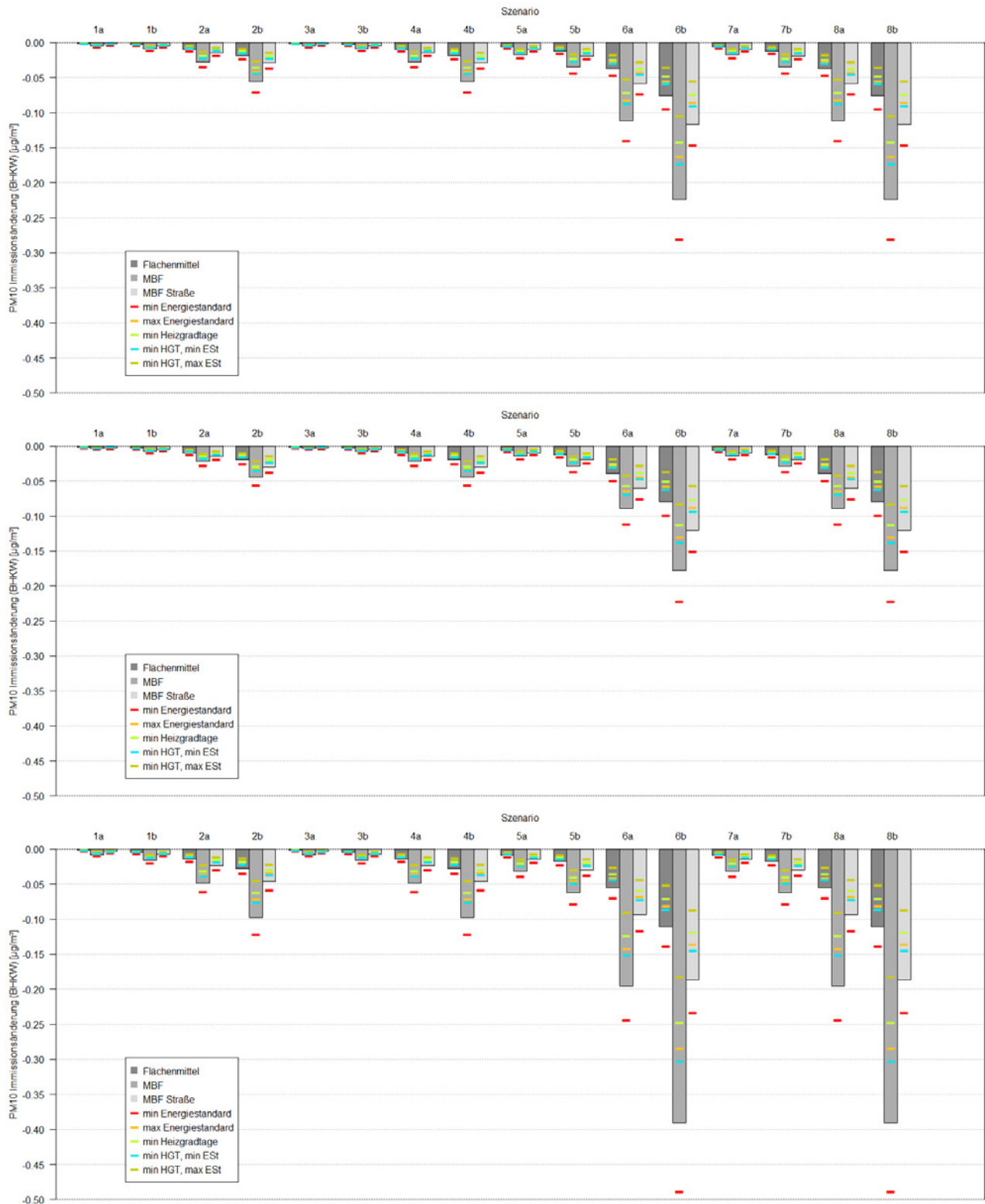
In Abbildung 9-13 bis Abbildung 9-15 wird für jedes Untersuchungsgebiet pro AKTerm die für 2020 prognostizierte PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau für alle Szenarien nach Tabelle 9-1 und Abbildung 5-46 in Abhängigkeit von der ausgewerteten Fläche dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x-Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Da die Werte der PM2.5-Immissionsänderung identisch zur PM10-Immissionsänderung sind (Abschnitt 9.2.1), erfolgt für PM2.5 keine eigene Darstellung der Ergebnisse. Für PM10 und PM2.5 wurde keine Kfz-bedingte Zusatzbelastung berechnet.

Bei PM10 und PM2.5 führt der Einsatz der Mini-BHKW in allen Szenarien zu Abnahmen der Immissionsbelastung, da bei den BHKW selbst keine Partikel-Emissionen angesetzt wurden (Abschnitt 6.5.2). Die Werte verhalten sich daher hinsichtlich der betrachteten Auswertungsflächen und des Einflusses der AKTerm genau wie die NO_x-Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2, nur dass es sich durchweg um Abnahmen handelt und nicht um Zunahmen. Die Abnahmen sind in allen Fällen gering und erreichen je nach Untersuchungsgebiet und verwendeter AKTerm für die maximal beaufschlagte Fläche (MBF) maximal -0.1 µg/m³ bis knapp -0.4 µg/m³. Über alle Szenarien betrachtet, ergeben sich größten Abnahmen in den Szenarien 6b und 8b (Ersatz von Ölheizkessel durch BHKW im Maximalszenario) und die geringsten Abnahmen in den Szenarien 1a und 3a (Ersatz von Gasheizkessel durch BHKW im Minimalszenario).

Durch die Variation des Endenergiebedarfs in den Modellgebieten nach Tabelle 9-1 ändern sich die Werte der mit dem Ausgangsszenario bestimmten PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau entsprechend Tabelle 9-3. Bei der Annahme komplett unsanierter Gebäude im Modellgebiet („obere Abschätzung“) und der oberen Grenze der Heizgradtage, in Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3 durch einen roten Balken gekennzeichnet, ergeben sich die größten Abnahmen durch die BHKW-bedingten Emissionsänderungen, der Betrag des Ausgangsszenarios vergrößert sich um 19 % bis 25%. Bei Annahme eines mittleren Energiestandards entsprechend dem von Neubauten nach EnEV (2002) („untere Abschätzung“) und der unteren Grenze der Heizgradtage (olivfarbener Balken in Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-3) verringert sich die Abnahme gegenüber dem Ausgangsszenario auf knapp die Hälfte. Diese beiden Grenzen geben die Spannbreite der PM10-Immissionsänderung durch Variation des Endenergiebedarfs vor, in die sich die Ergebnisse der anderen Variationen nach Tabelle 9-1 einsortieren.

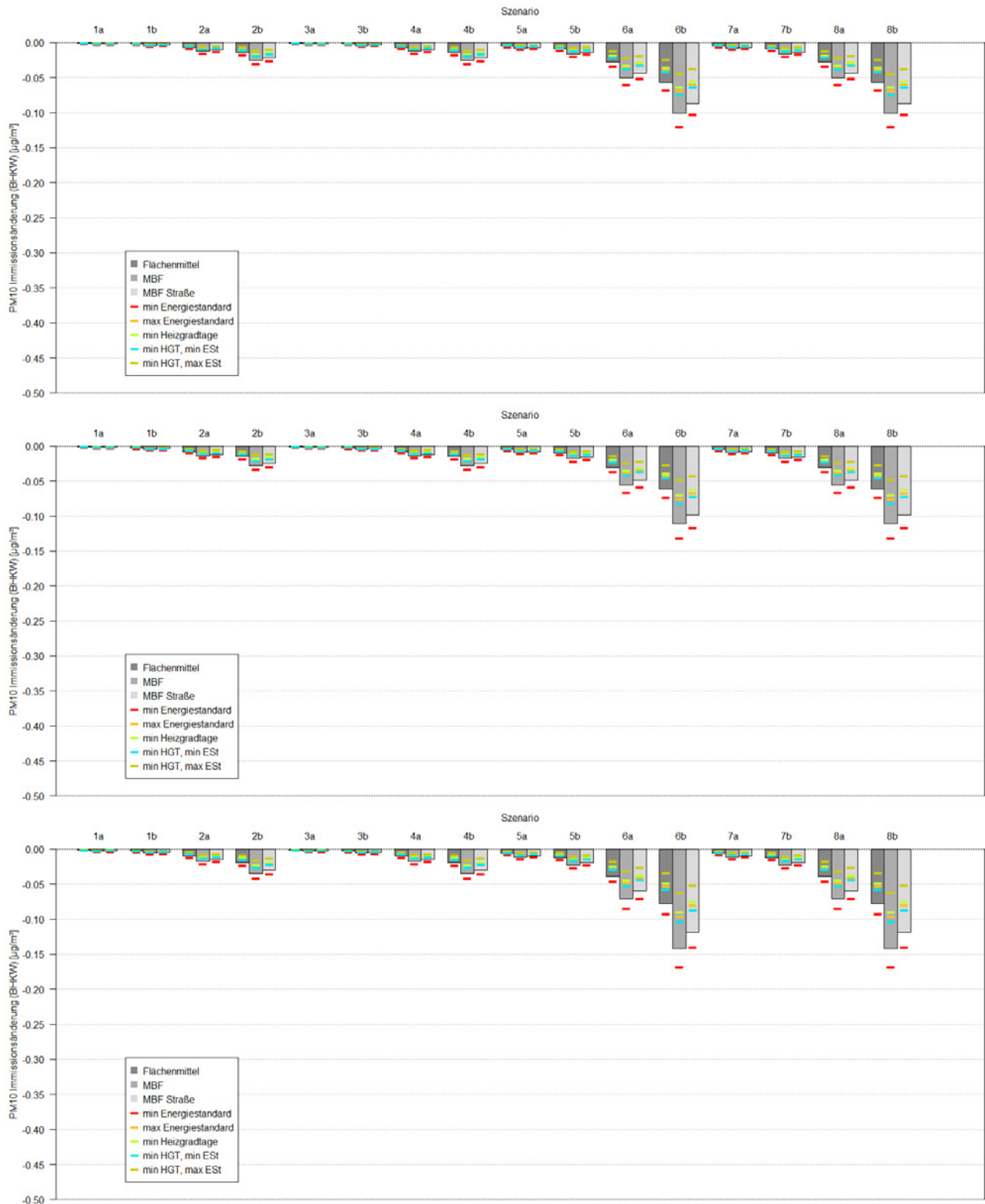
In Abbildung 9-16 werden die Ergebnisse des Ausgangsszenarios für die PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau noch einmal für alle drei Untersuchungsgebiete zusammenfassend dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zur NO_x-Immissionsänderung in Abschnitt 9.2.2. Hinsichtlich des Einflusses der AKTerm und des Untersuchungsgebiets auf die Höhe der PM10-Immissionsänderung durch den BHKW-Ausbau ergeben sich die gleichen Aussagen wie für NO_x in Abschnitt 9.2.2, nur dass es sich durchweg um Abnahmen handelt und nicht um Zunahmen.

Abbildung 9-13: PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Berlin für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



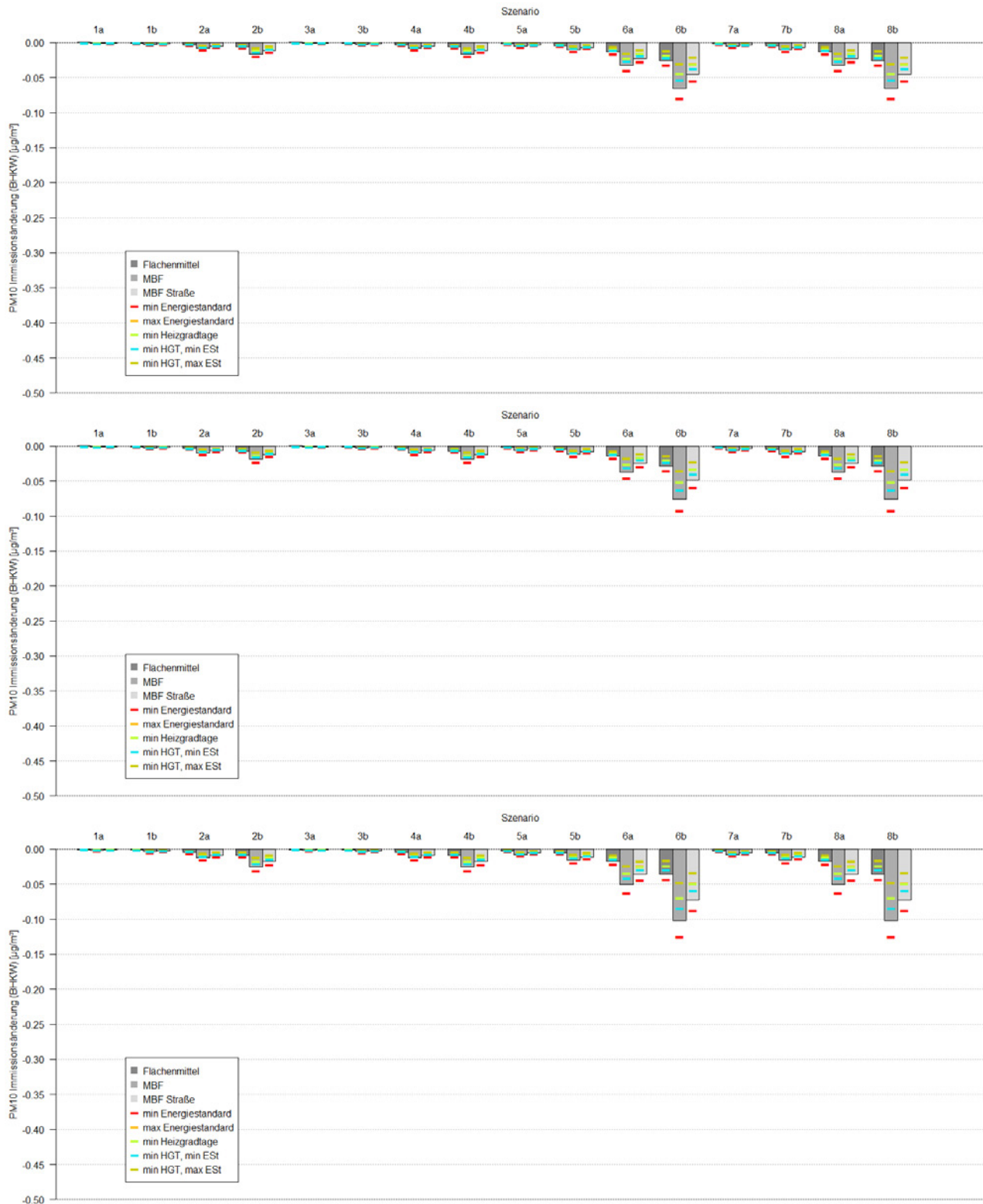
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-14: PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Bremen für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



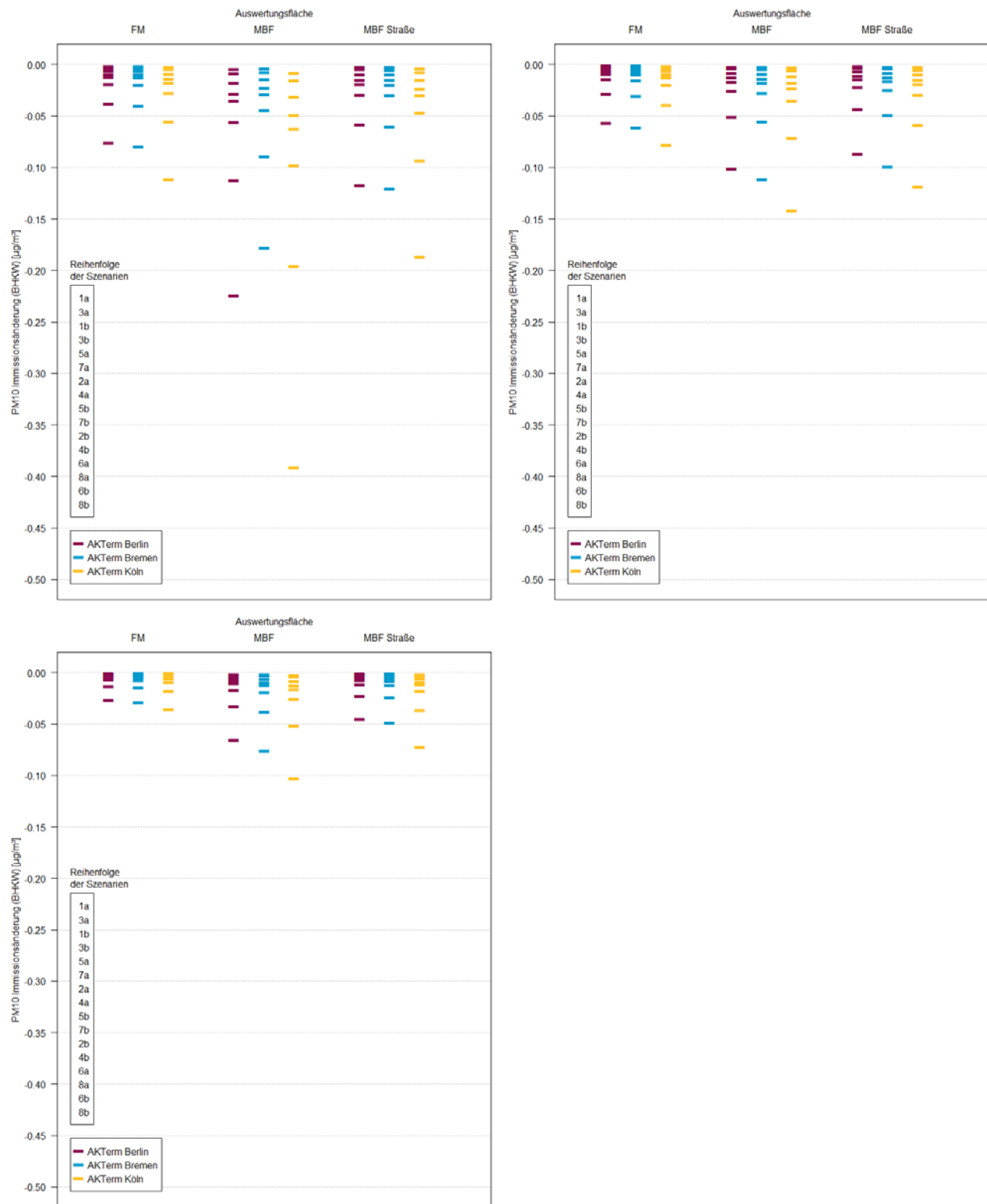
Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-15: PM10-Immissionsänderungen durch BHKW im Untersuchungsgebiet Köln für AKTerm Berlin (oben), AKTerm Bremen (Mitte) und AKTerm Köln (unten)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

Abbildung 9-16: Zusammenfassung der PM₁₀-Immissionsänderungen durch BHKW für alle Auswertungsflächen und AKTerm in den Untersuchungsgebieten Berlin (oben links), Bremen (oben rechts) und Köln (unten links)



Quelle: Eigene Darstellung (IVU Umwelt GmbH)

9.3 Diskussion der Wahrscheinlichkeit der Szenarien

9.3.1 Allgemeines

In den Szenarien wurden jeweils unterschiedlich hohe Substitutionsgrade (Zubau von BHKW, Abschnitt 5.2.1) mit unterschiedlich hohen Emissionsfaktoren kombiniert (vgl. Tabelle 5-12). Es wird daher im Folgenden zunächst die Wahrscheinlichkeit für die Substitutionsgrade, dann die für die Emissionsfaktoren und zum Schluss die der nationalen und lokalen Szenarien diskutiert.

9.3.2 Substitutionsgrade (Zubau von BHKW-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 50 kW bis 2020)

Zu den wesentlichen Einflussgrößen, die über den Zubau von Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlagen und damit auch den Zubau von Blockheizkraftwerken (BHKW) entscheiden, gehört die Entwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen.

In Deutschland werden hocheffiziente KWK-Anlagen aus klimapolitischen Gründen durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG) gefördert. Das geltende Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz aus dem Jahre 2012 (KWKG, 2012) wurde am 1. Januar 2016 durch das „Gesetz zur Neuregelung der Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG, 2016)“ ersetzt und durch das „Gesetz zur Änderung der Bestimmungen zur Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung und zur Eigenversorgung“ vom 22. Dezember 2016 geändert. Diese Änderungen des KWKG 2016 traten am 1. Januar 2017 in Kraft. Obwohl die neuen Bestimmungen des KWKG-Gesetzes erst am 1. Januar 2017 in Kraft traten, wird das derzeit gültige KWKG-Gesetz offiziell weiterhin als „KWKG 2016“ bezeichnet (KWKG, 2016).

Die KWK-Nettostromerzeugung ist im Zeitraum 2003 bis 2016 von 77.5 TWh auf 102.2 TWh gestiegen (UBA, 2017). Der Zuwachs ist auf den Zubau von im Wesentlichen mit Biomasse und in geringerem Ausmaß auch mit Erdgas befeuerten KWK-Anlagen zwischen 2003 – 2010 zurückzuführen. Die auf Steinkohle und Mineralölen basierende KWK-Stromerzeugung ist im Zeitverlauf dagegen zurückgegangen. Im Leistungsbereich der Mini-BHKW bis 50 kW_{el} spielt die KWK aus Biomasse eine untergeordnete Rolle (BMWi, 2014). Ein Zubau in dieser Leistungsklasse findet für Biomasse derzeit nicht statt. Mit der Novellierung des KWKG zum 01.01.2016 wurde das bisher auf die Gesamtnettostromerzeugung bezogene relative Ziel (25 % KWK-Anteil bis 2020) durch ein absolutes Mengenziel (110 TWh bis zum Jahr 2020; 120 TWh bis zum Jahr 2025) ersetzt. Damit ist gegenüber den Zielvorgaben des KWKG 2012 ein deutlich geringerer Zubau an KWK-Anlagen politisch vorgegeben.

Erstmals seit 2010 wird für 2016 mit einer deutlichen Steigerung der KWK-Stromerzeugung gerechnet. Sie ist aber nach den vorläufigen Zulassungszahlen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, 2017) nicht auf einen verstärkten Zubau an Anlagen, sondern auf geringere Temperaturen und vor allem auf einen niedrigen Erdgaspreis gegenüber 2015 zurückzuführen.

Dem vorgegebenen Ziel des KWKG 2016 entsprechend hat sich auch die Fördersystematik des KWKG zugunsten von Bestandsanlagen geändert. So werden auch Bestandsanlagen, die nicht mehr in der bisherigen KWK-Förderung sind, ab 2016 gefördert. Bestandsanlagen wurden und würden sonst wegen der niedrigen Strombörsenpreise zeitweise oder ganz abgeschaltet. Seit 2009 waren die Jahre 2013-2014 in fast allen Leistungsklassen durch vergleichsweise hohe Zubauraten gekennzeichnet. Die Zulassungszahlen für 2016 mit Stand vom 16.1.2017 sind nur eingeschränkt aussagekräftig, da Zulassungsanträge noch bis zum 31.12.2017 eingereicht werden können.

Dennoch zeigen die Zahleninsbesondere bei den Anlagen > 50 kW_{el} einen deutlichen Einbruch beim Zubau in den Jahren 2015 und 2016 gegenüber 2013, dem Bezugsjahr für das Minimalszenario (bei Fortschreibung bis 2019). Dies gilt in abgeschwächter Form auch für die Mini-KWK-Anlagen bis 50 kW_{el} (Tabelle 9-4).

Tabelle 9-4: Anzahl der beim BAFA zugelassenen neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen nach Größenklassen und Inbetriebnahmejahren (BAFA, 2017, Datenstand: 16.01.2017)

		$\leq 2 \text{ kW}_{\text{el}}$	> 2 $\leq 10 \text{ kW}_{\text{el}}$	> 10 $\leq 20 \text{ kW}_{\text{el}}$	> 20 $\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$	Summe
2009	Anzahl	83	3 222	932	545	4 782
	MW _{el}	0.12	17.4	14	23	55
2010	Anzahl	239	1 695	649	475	3 058
	MW _{el}	0.27	9	10	20	39
2011	Anzahl	708	1 929	786	598	4 021
	MW _{el}	0.7	10.1	13	25	49
2012	Anzahl	1 505	2 193	950	520	5 168
	MW _{el}	1.5	11.4	17	22	52
2013	Anzahl	2 026	2 517	1.12	686	6 349
	MW _{el}	2	13.4	20	30	65
2014	Anzahl	1 469	2 649	1 458	886	6 462
	MW _{el}	1.5	14.5	27	38	81
2015	Anzahl	1 051	2 072	922	554	4 599
	MW _{el}	1	11.7	18	26	57
2016 *)	Anzahl	814	1 229	556	477	3 076
	MW _{el}	0.9	7	10	20	38
*): Die Zulassungszahlen für 2016 mit Stand vom 16.1.2017 sind nur eingeschränkt aussagekräftig, da Zulassungsanträge noch bis zum 31.12.2017 eingereicht werden können.						

Ähnliche Ergebnisse ergab die Befragung der Hersteller der Zeitschrift Energie & Management im BHKW-Ranking & Prognose 2016 (E&M 2016).

Das aktuelle KWKG sieht vor allem auch für die Mini-KWK-Anlagen bis 50 kW_{el} deutlich veränderte Fördersätze und -zeiträume vor. So wurden die Fördersätze für die Leistungsklasse bis 50 kW_{el} der KWK-Zulage für den selbstverbrauchten Strom von 5.41 Cent/kWh auf 4 Cent/kWh gesenkt.

Auf der anderen Seite sind die Vergütungssätze für den eingespeisten Strom von 5.41 Cent/kWh auf 8 Cent/kWh angehoben worden, und die KWK Zuschläge werden seit dem 1.1.2016 für 60 000 Volllaststunden gezahlt und sind nicht mehr auf zehn Jahre beschränkt. Der höhere KWK-Zuschlag für den eingespeisten Strom reicht gerade aus, um die niedrigeren Einspeisevergütungen (KWK-Index, 2016 bei <3 Cent/kWh) der letzten Jahre auszugleichen.

Darüber hinaus hat sich mit dem EEG 2014 (EEG 2017) und der Erhebung einer EEG-Umlage auf eigengenutzten und/oder direktvermarkteten Strom in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit von BHKW in Kundenanlagen verschlechtert.

Erfahrungsgemäß sind jedoch in den überwiegenden Fällen BHKW im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} für einen wirtschaftlichen Betrieb angewiesen auf hohe Eigenstromanteile. Für diese Anlagen hat sich die Wirtschaftlichkeit durch niedrigere KWK-Zulage und höhere EEG-Umlagen bei gleicher Auslegung verschlechtert.

Die Wertunterschiede zwischen eigengenutztem und eingespeistem Strom sind seit dem KWKG 2016 und durch die gestiegene EEG-Umlage nicht mehr so groß wie bislang, aber Volleinspeisungsanlagen werden dennoch auch weiterhin so lange eine extreme Ausnahme bleiben, bis die Strombörsenpreise (KWK-Index)

wieder deutlich ansteigen. Und ein deutlicher Anstieg des KWK-Index ist bis 2020 derzeit nicht zu erwarten. Das bedeutet, dass auch zukünftige Anlagen auf hohe Eigenstromanteile angewiesen sind, die aber nun geringer vergütet werden.

Am Rande wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in den letzten Jahren die formalen Anforderungen (Meldepflichten, Know-how u. v. m.) an den Betrieb eines BHKWs immer größer geworden sind und immer weniger Eigentümer bereit sind, diese bürokratischen Hürden zu überwinden. Insbesondere in der Wohnungswirtschaft wird ein großes Potential für die KWK gesehen (BKWK, 2016), dessen Ausnutzung aber aus Gründen zunehmender formaler Hemmnisse in der Praxis immer unwahrscheinlicher wird.

Für die Betriebsweise und die Betriebsmodelle von BHKW lassen sich daraus folgende Perspektiven für die KWK, insbesondere der Leistungsklasse bis 50 kW_{el}, ableiten:

1. Die Auslegung geht aus wirtschaftlichen Gründen bei gleichem Wärmebedarf hin zu BHKW mit größerer Leistung, Teillastbetrieb bei saisonal niedrigerem Wärmebedarf und damit geringeren durchschnittlichen Volllaststunden pro Jahr.
2. BHKW werden flexibler ausgelegt und stromorientierte Betriebsweisen nehmen zu.
3. Mit einem verstärkten Zubau von Motoren-BHKW (BHKW auf der Grundlage von Automotoren) ist aufgrund der zuvor genannten veränderten wirtschaftlichen und formalen Rahmenbedingungen durch EEG und KWKG nicht zu rechnen.

Derzeit dominieren im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} BHKW auf der Grundlage von Automotoren (Motoren-BHKW). Im Leistungsbereich bis 10 kW_{el} wird die Anzahl an zugebauten Motoren-BHKW wegen fehlender Wirtschaftlichkeit voraussichtlich abnehmen. Ob Brennstoffzellen, die derzeit zur Markteinführung sehr hoch von Bund und zusätzlich einigen Bundesländern gefördert werden, den Rückgang von Motoren-BHKW kompensieren können, ist derzeit offen.

Als Fazit ist unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ein Zubau von Mini-BHKW bis 2020 über das Niveau von 2013, d. h. ein größerer Zubau als im Minimalszenario (Substitutionsgrad BHKW niedrig) nach Tabelle 5-1 angenommen, sehr unwahrscheinlich.

9.3.3 Emissionsfaktoren

BHKW werden in dicht besiedelten Innenstädten, wie den dieser Untersuchung zugrunde gelegten Modellgebieten, heute fast ausschließlich mit Erdgas betrieben. Beim Erdgas-Einsatz spielen im Wesentlichen die Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid und Stickoxide eine Rolle. Zu den NMVOC liegen keine praktischen Erfahrungen vor, diese können damit hier nicht diskutiert werden. Die vorliegende Diskussion beschränkt sich daher auf die zugrundeliegenden Emissionsfaktoren für Stickoxide (NO_x). Die Tabelle 9-5 gibt eine Übersicht über bestehende oder kommende technische Anforderungen (Grenzwerte) sowie über die in der vorliegenden Studie verwendeten Emissionsfaktoren für NO_x.

Tabelle 9-5: Emissionsfaktoren für NO_x in der Übersicht

	Emissionsfaktor NO _x [t/GWh]	Emissionsfaktor NO _x [mg/kWh]	Emissionsfaktor NO _x [mg/m ³]
Technische Anforderungen für NO_x			
nach TA-Luft 2002 Magerbetrieb mit Oxydationskatalysator	0.450	450.0	500
nach TA-Luft 2002 λ=1-Betrieb mit Drei-Wege-Katalysator	0.225	225.0	250

	Emissionsfaktor NO _x [t/GWh]	Emissionsfaktor NO _x [mg/kWh]	Emissionsfaktor NO _x [mg/m _n ³]
Diskutierter Grenzwert TA Luft Neu ab 2018 (Gailfuß, 2017)			100
EU-Verordnung (Ökodesign-Richtlinie) Nr. 813/2013 ab 26.09.2018 bis 50 kW _{el} (EU, 2013)	0.240	240.0	267
In der vorliegenden Studie verwendete Emissionsfaktoren			
Erdgasheizkessel	0.098	97.0	108
Ölheizkessel	0.157	157.0	174
Emissionsfaktoren BHKW hohe Abschätzung	0.328	327.6	364
Emissionsfaktoren BHKW niedrige Abschätzung	0.113	112.5	125

Die Emissionen für Stickoxide hängen im Wesentlichen von den technischen Anforderungen und der Betriebsweise der BHKW-Module ab. Mit der Luftzahl $\lambda = 1$ geregelte Motoren-BHKW mit Drei-Wege-Katalysatoren können bei regelmäßiger Wartung die Vorgaben auch des angedachten Grenzwertes der neuen TA Luft (Gailfuß, 2017) von 100 mg/m_n³ für Anlagen > 1 MW auch im Dauerbetrieb einhalten. Die von Wartungsfirmen übliche Fernüberwachung und -wartung der BHKW, so auch der Lambdaspaltung, sind heute auch bei Anlagen bis 50 kW_{el} Standard. Weicht der Istwert der Lambdaspaltung längere Zeit vom Sollwert ab, wird eine entsprechende Störmeldung ausgegeben. Technisch möglich wären auch noch geringere NO_x-Emissionen, lediglich der Regelbereich (umgangssprachlich: das Lambdafenster) wird entsprechend kleiner. Um die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nicht nur auf dem Prüfstand, sondern auch im Dauerbetrieb zu gewährleisten, kann dies in der Praxis bedeuten, dass entsprechende Abgasmessungen in einem kürzeren Zeitintervall stattfinden müssen oder der Katalysator stärker beladen werden muss. Wenn geringere NO_x-Werte als 100 mg/m_n³ (bzw. 112 mg/kWh als niedrige Abschätzung) eingehalten werden müssten, kann das mit höheren Kosten für den Betreiber verbunden sein.

Sollte der Grenzwert auch für Mager-Motoren-BHKW ($\lambda = 1,6$) mit Oxidationskatalysator auf 100 mg/m_n³ gesenkt werden, so ist dies nur mit einem Leistungsverlust von ca. 15 % der elektrischen Leistung, einer weitergehenden Abgasreinigung (z. B. SCR-Technologie) oder einer spezifischen Weiterentwicklung der Motoren möglich.

Von den im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} in der Statistik des BAFA im Jahr 2015 gebauten Leistung von insgesamt 57 MW wurden 2015 nach Herstellerangaben (E&M 2016, BHKW Ranking) allein 33 MW - also mehr als 50 % der im Jahr 2015 zugebauten Leistung - durch Module von lediglich vier Herstellern bereitgestellt (Tabelle 9-6).

Tabelle 9-6: Angaben zu Anzahl und Leistung von vier wesentlichen Herstellern im Jahr 2015 (E&M 2016, BHKW Ranking)

Hersteller	Anzahl BHKWs 2015	Mittlere Leistung der Module [kW]	Summe der install. Leistung [MW]
EC Power	1200	15	18.0
KW Energie	330	25	7.8
Kraftwerk	173	27	4.8

Hersteller	Anzahl BHKWs 2015	Mittlere Leistung der Module [kW]	Summe der install. Leistung [MW]
RMB	194	14	2.7
Summe	1897	-	33.3

Aus Tabelle 9-7 geht hervor, dass unter den angebotenen Modulen der vier genannten Hersteller jene mit $\lambda=1$ -Motoren-BHKW deutlich überwiegen. Die Tabelle zeigt auch die Werte für Stickoxide, die die Hersteller angeben zu unterschreiten, bzw. konkrete Prüfwerte.

Tabelle 9-7: Angaben zu Anzahl und Leistung von vier wesentlichen Herstellern im Jahr 2015 (E&M 2016)

Hersteller	Modell	Betriebsweise Luftzahl λ	NO _x -Wert aus Datenblatt [mg/m _n ³]	Quelle (abgerufen am 15.6.2017)
EC Power	XRGI 6	1.6	319	www.ecpower.eu/de/
EC Power	XRGI 9	1	52	www.ecpower.eu/de/
EC Power	XRGI 15	1.6	293	www.ecpower.eu/de/
EC Power	XRGI 20	1	26	www.ecpower.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 7,5	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 16	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 22	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 22	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 33	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
KW Energie ¹	Smartblock 50	1	< 100	www.smartblock.eu/de/
Kraftwerk	G16	1.6	< 250	www.kwk.info
Kraftwerk	G20+	1	< 125	www.kwk.info
Kraftwerk	G22	1	< 125	www.kwk.info
Kraftwerk	G26	1.6	< 250	www.kwk.info
Kraftwerk	G34	1	< 125	www.kwk.info
Kraftwerk	G50	1	< 125	www.kwk.info
RMB ¹	neoTower 2	1.65	199	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 5	1.65	340	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 7,2	1	7	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 11	1.65	238	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 16	1	56	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 20	1	43	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 21	1	48	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 25	1	k.A.	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 30	1	0	RMB (2017)
RMB ¹	neoTower 50	1	6	RMB (2017)

¹: bei 5 Vol % Restsauerstoff

Maßgebliche Hersteller von BHKW geben also auch heute schon an, deutlich niedrigere Emissionswerte einzuhalten als den Emissionsfaktor für NO_x von 327.6 mg/kWh der Maximalszenarien im Mittel. Ein Hersteller (RMB), der inzwischen nach eigenen Aussagen auch für den amerikanischen Markt produziert, hat für bestimmte Modelle die Emissionen durch verbesserte Motoren (Vorkühlung des Abgases auf für

den Katalysator optimale Temperaturen) und bessere Katalysatoren auf sehr niedrige Werte reduzieren können.

In wie weit die für die vorliegende Studie zugrunde gelegten Emissionsfaktoren für Gas- und Heizölkessel in der Praxis erreicht werden, kann an dieser Stelle auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Quellen nicht diskutiert werden. So hängen die Emissionsfaktoren bei Stickoxiden auch davon ab, welche Art von Heizgeräten (Kombiwasserheizer, Durchlaufwasserheizer, Vorratswasserheizer, Raumheizer, Brennwertgeräte) Verwendung finden (Struschka et al., Anhang A, S. 59-64). Die dem Vorhaben zugrunde gelegten Emissionsfaktoren entsprechen in etwa den Mittelwerten über alle Heizgeräte (Struschka et al., 2008; Tebert et al., 2016), die aber nicht den Mittelwerten in einem spezifischen Quartier entsprechen müssen.

Fazit: Ab dem 26.09.2018 tritt für die Stickoxide nach EU-Verordnung (Ökodesign-Richtlinie) Nr. 813/2013 (EU, 2013) ab 26.09.2018 ein Grenzwert von 240 mg/kWh bei Anlagen bis 50 kW_{el} in Kraft. Spätestens ab da ist zu erwarten, dass die tatsächlichen Emissionen im Mittel aufgrund der bereits jetzt niedrigeren Emissionswerte der verbreiteteren $\lambda=1$ -Motoren-BHKW deutlich unter diesem Grenzwert liegen werden. Auch die Messreihe der Fachhochschule Nürtingen zum XRG1 15 in Abschnitt 6.6 weist darauf hin, dass der Grenzwert 240 mg/kWh nach EU (2013) auch von Motoren-BHKW im Betrieb mit einem mageren Gemisch von etwa $\lambda=1,6$ eingehalten werden kann. Die Emissionen für Stickoxide hängen damit im Wesentlichen von den technischen Anforderungen und der Betriebsweise der BHKW-Module ab.

9.3.4 Nationale und lokale Szenarien

Wie aus Abschnitt 9.3.2 hervorgeht, ist unter den aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Strombörsenpreise um die 3 Cent/kWh, KWKG 2016) bis 2020 von keinem verstärkten Zubau von BHKW im Leistungsbereich bis 50 kW_{el} auszugehen. Aus der Diskussion in Abschnitt 9.3.3 geht hervor, dass auch die Emissionswerte letztlich von den technischen Anforderungen abhängen, die man für die Motoren-BHKW formuliert. Spätestens mit dem Grenzwert nach EU-Verordnung (813/2013) von 240 mg/kWh ab 2018 ist das Erreichen von hohen Emissionsfaktoren für NO_x von 327.6 mg/kWh, wie im Maximalszenario vorgegeben, im Mittel bis 2020 sehr unwahrscheinlich.

9.3.4.1 Nationale Szenarien

Unter der Annahme, dass Blockheizkraftwerke auch zukünftig überwiegend nur dort zugebaut werden, wo auch heute schon Erdgas verfügbar ist, und damit vor allem auch die Wärme aus erdgasbetriebenen Heizkesseln verdrängt wird, ergibt sich, dass bis 2020 national das Szenario 3 am wahrscheinlichsten ist.

Der Berechnung der nationalen Szenarien lagen für die durch den BHKW-Einsatz vermiedenen Emissionen der Stromerzeugung die Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes (Abschnitt 5.3.2) zugrunde. Für die Treibhausgase ist es inzwischen Praxis, für die Berechnung der durch den BHKW-Einsatz vermiedenen Emissionen den sogenannten Verdrängungsmix anzusetzen (Öko-Institut, 2015). Das heißt, es wird diejenige fossile Stromerzeugung als potenziell durch KWK verdrängbar angenommen, welche nicht selbst im KWK-Modus stattfindet. Erneuerbare Stromerzeugung und Kernkraft sind angesichts der Einsatzreihenfolge der Kraftwerke (Merit-Order) aus diesem Verdrängungsmix ausgenommen. Bei Ansatz eines auch für Stickoxide angemesseneren, aber derzeit noch nicht bestimmten Verdrängungsmixes statt des deutschen Strommixes würden damit noch niedrigere Emissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau als im Szenario 3 errechnet auch weit über 2020 hinaus wahrscheinlich sein. Mit Ansatz des deutschen Strommixes werden die durch BHKW real verdrängten Emissionen des vorwiegend fossilen Kraftwerksparks unterschätzt und damit die BHKW-bedingten NO_x-Emissionsänderungen überschätzt.

9.3.4.2 Lokale Szenarien

Unter der Annahme, dass in - zu den Modellgebieten vergleichbar strukturierten –Quartieren Erdgas in der Regel verfügbar ist und damit auch die Heizkessel überwiegend mit Erdgas betrieben werden, ergibt sich, dass bis 2020 die Szenarien 3a und 3b am wahrscheinlichsten sind.

9.3.4.3 Ausblick

Sollten sich die Strombörsenpreise wider Erwarten bis 2020, z. B. durch höhere CO₂-Preise, deutlich nachhaltig und planbar erhöhen, würde sich die Wirtschaftlichkeit der KWK insgesamt deutlich verbessern. In zu den Modellgebieten vergleichbar strukturierten Quartieren ist in diesem Fall jedoch davon auszugehen, dass Contractoren versuchen würden, dort wieder verstärkt in Nahwärmekonzepten mit KWK zu investieren und dann mit dem objektbezogenen Ausbau von KWK-Anlagen in der Leistungsklasse bis 50 kW_{el} konkurrieren.

9.4 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf Luftqualitätsziele

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Abschnitt 5.3, Abschnitt 8 und Abschnitt 9.1 bis 9.3 wurde eine Bewertung der Emissions- und Immissionsänderungen durch den BHKW-Ausbau im Hinblick auf die z. Zt. gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der 39. BImSchV vorgenommen. Für SO₂ wurden gemäß Abschnitt 5.3 für alle untersuchten Szenarien ausschließlich Minderemissionen ermittelt. Für PM₁₀ und PM_{2.5} wurden für alle untersuchten Szenarien ausschließlich Abnahmen der Immissionsbelastung durch den Einsatz von BHKW ermittelt. Im Folgenden werden daher emissionsseitig nur NO_x und NMVOC und immissionsseitig nur NO₂ als grenzwertrelevante Größe betrachtet.

Die 39. BImSchV legt für die Bundesrepublik Deutschland Emissionshöchstmengen u. a. für NO_x und NMVOC entsprechend Tabelle 9-8 fest. Diese Höchstmengen dürfen ab dem Jahr 2011 nicht mehr überschritten werden.

Tabelle 9-8: Emissionshöchstmengen in Deutschland gemäß 39. BImSchV

Stoff	Emissionshöchstmenge gemäß 39. BImSchV [kt/a]
NO _x	1 051
NMVOC	995

Für NO_x liegen die durch den Einsatz von Mini-BHKW erzeugten Mehremissionen in Deutschland im ungünstigsten Fall des Szenarios 5 (Maximalszenario, hohe BHKW-Emissionsfaktoren, Ersatz von Gasheizkesseln) bei 2660 t/a, das entspricht 0.25 % der durch die 39. BImSchV vorgegebenen Emissionshöchstmengen. Für NMVOC liegen die durch den Einsatz von Mini-BHKW erzeugten Mehremissionen in Deutschland im ungünstigsten Fall des Szenarios 5 bei 383 t/a und damit deutlich unter 0.1 % der vorgegebenen Emissionshöchstmengen. Im nach Abschnitt 9.3 wahrscheinlichsten Szenario 3 ergeben sich für NO_x Minderemissionen von 1 396 t/a (0.13 % der vorgegebenen Emissionshöchstmenge) und für NMVOC Mehremissionen von 17 t/a. Demnach können die Emissionsänderungen durch den Ausbau der Mini-BHKW entsprechend den vorgegebenen Szenarien auf nationaler Ebene als nicht relevant eingestuft werden.

Immissionsseitig gibt die 39. BImSchV für den NO₂-Jahresmittelwert einen Grenzwert von 40 µg/m³ vor. Zusätzlich existiert ein Kurzzeitgrenzwert für NO₂, wonach der Stundenmittelwert nicht öfter als 18 Mal im Kalenderjahr 200 µg/m³ überschreiten darf. Dieser Grenzwert ist jedoch nicht besonders anspruchsvoll. Er wurde in den letzten Jahren nur an sehr wenigen hochbelasteten verkehrsbezogenen Messstellen in

Deutschland überschritten und wird nicht überschritten, ohne dass auch der Jahresgrenzwert überschritten wird, so dass er hier nicht betrachtet wurde.

Die NO₂-Immissionsbelastung erhöht sich auf lokaler Ebene durch den Einsatz von Mini-BHKW in den betrachteten Untersuchungsgebieten im ungünstigsten Fall des Szenarios 5b um maximal 6 – 10 µg/m³ (Berlin) für die maximal beaufschlagte Fläche (MBF). Wird dann noch die ungünstigste Variation der Energiestandards aus Abschnitt 9.1 herangezogen, der von komplett unsanierten Gebäuden und eine hohen Anzahl Heizgradtage ausgeht, so erhöht sich dieser Wert auf maximal 12 µg/m³. Die MBF ist im Regelfall in einem Hinterhof lokalisiert, in dem kaum Kfz-bedingte Immissionen auftreten. Liegt allerdings schon die Hintergrundbelastung für NO₂ bei 27 µg/m³ (z. B. Berlin-Nansenstraße im Jahr 2015 (SenBerlin, 2016)), so können durch den Einsatz von Mini-BHKW im ungünstigsten Fall des Szenarios 5b grenzwertnahe Belastungen im Bereich der MBF auftreten.

Wie in Abschnitt 9.3.2 diskutiert, ist unter den aktuell gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen das Eintreten der Szenarien 5 bis 8 (Maximalszenario des Zubaus von Mini-BHKW) sehr unwahrscheinlich. Für das gemäß Abschnitt 9.3 wahrscheinlichste Szenario 3 wurden BHKW-bedingte Zunahmen der NO₂-Immissionsbelastung von maximal 0.5 µg/m³ (Berlin) für die MBF berechnet. Selbst bei Annahme komplett unsanierter Gebäude erhöht sich dieser Wert nur auf maximal 0.6 µg/m³. Damit wird eine Überschreitung des NO₂-Grenzwerts im Bereich der MBF, die wesentlich durch den Einsatz von Mini-BHKW verursacht ist, ebenfalls sehr unwahrscheinlich.

Im Bereich der maximal beaufschlagten Fläche im Straßenraum (MBF Straße) erhöht sich die NO₂-Immissionsbelastung durch den Einsatz von Mini-BHKW in den betrachteten Untersuchungsgebieten im ungünstigsten Fall des Szenarios 5b um maximal 3 – 5 µg/m³ (Berlin), unter Annahme komplett unsanierter Gebäude um maximal 6 µg/m³. In dieser Größenordnung können Mini-BHKW durchaus zu Grenzwertüberschreitungen im Straßenraum beitragen, insbesondere, wenn die MBF Straße, die am Ort der höchsten Belastung durch BHKW im Straßenraum definiert ist, mit einem verkehrlichen Hotspot zusammenfällt. Auch hier gilt jedoch wie bei der Diskussion der Werte zur MBF, dass das Eintreten der Szenarien 5 bis 8 sehr unwahrscheinlich ist. Wird das wahrscheinlichste Szenario 3 betrachtet, so ergibt sich als maximale BHKW-bedingte NO₂-Zusatzbelastung für die MBF Straße ein Wert von 0.2 µg/m³ (Berlin), auch unter der Annahme komplett unsanierter Gebäude. Damit wird, wie bei der MBF, eine Überschreitung des NO₂-Grenzwerts im Bereich der MBF Straße, die wesentlich durch den Einsatz von Mini-BHKW verursacht ist, ebenfalls sehr unwahrscheinlich.

Insgesamt ist im Rahmen der Szenarien 1 bis 4 (Minimalszenario des Zubaus von Mini-BHKW) kein relevanter Beitrag der Mini-BHKW zur NO₂-Gesamtbelastung für die MBF oder die MBF Straße zu erwarten. Sollte der Zubau der Mini-BHKW entgegen den Überlegungen in Abschnitt 9.3.2 größer ausfallen als im Minimalszenario vorgesehen, so kann der Beitrag der Mini-BHKW zur NO₂-Gesamtbelastung auf dem Niveau des Minimalszenarios gehalten werden, indem ausschließlich BHKW mit niedrigen NO_x-Emissionsfaktoren (entsprechend Szenarien 7 und 8) zum Einsatz kommen. Wie in Abschnitt 9.3.3 diskutiert, weisen bereits aktuelle Mini-BHKW niedrigere NO_x-Emissionsfaktoren auf als die im vorliegenden Projekt als „niedrig“ (Tabelle 9-5) angenommenen NO_x-Emissionsfaktoren. Tabelle 9-9 fasst die Ergebnisse der Bewertung im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV zusammen.

Tabelle 9-9: Ergebnisse der Bewertung der BHKW-bedingten Emissions- und Immissionsänderungen im Hinblick auf die Vorgaben der 39. BImSchV

	Szenarien 1 - 4	Szenarien 5 - 8
Wahrscheinlichkeit	hoch	sehr gering

	Szenarien 1 - 4	Szenarien 5 - 8
Emissionsänderungen NO _x , NMVOC nationale Ebene	nicht relevant	nicht relevant
Immissionsänderungen NO ₂ MBF	nicht relevant	zusammen mit einer hohen Hintergrundbelastung ggf. relevant
Immissionsänderungen NO ₂ MBF Straße	nicht relevant	zusammen mit einer hohen Belastung im Straßenraum ggf. relevant

10 Quellenverzeichnis

1. BImSchV (2017): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), die durch Artikel 16 Absatz 4 des Gesetzes vom 10. März 2017 (BGBl. I S. 420) geändert worden ist). 2017.
4. BImSchV (2017): Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440)). 2017.
22. BImSchV (2007): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. Juni 2007 (BGBl. I S. 1006)). 2007.
39. BImSchV (2016): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 10. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2244) geändert worden ist). 2016.
- Bächlin, W.; Bössinger, R. (2007): Aktualisierung des NO-NO₂-Umwandlungsmodells für die Anwendung bei Immissionsprognosen für bodennahe Stickoxidfreisetzung. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co KG. Auftraggeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen, 2007.
- BAFA (2014): Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) mit Stand vom 09.04.2014. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. 2014.
- BAFA (2017): Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) mit Stand vom 16.1.2017. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/kwk_statistik_zulassungen_2009_16.html. 2017.
- Baumbach, G.; Struschka, M.; Juschka, W.; Carrasco, M.; Ang, K. B.; Hu, L.; Bächlin, W.; Sörgel, C. (2010): Modellrechnungen zu den Immissionsbelastungen bei einer verstärkten Verfeuerung von Biomasse in Feuerungsanlagen der 1. BImSchV. FKZ 205 43 263. Veröffentlichung UBA-Texte 37/2010. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2010.
- BBSR (2012): Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden.- BMVBS-Online-Publikation, Nr. 11/2012.
http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL_ON112012.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zuletzt abgerufen am 19.6.2017.
- BBSR (2015): Telefonische Rücksprache mit Frau Filz im BBSR.
- Beekmann, M.; Kerschbaumer, A.; Reimer, E.; Stern, R. (2007): PM Measurement Campaign HOVERT in the Greater Berlin area: model evaluation with chemically specified observations for a one year period. Atmos. Chem. Phys., 76, 55-68. 2007.
- BKG (2013): Verwaltungsgebiete 1:250 000, VG250 und VG250-EW. Geodaten der deutschen Landesvermessung GeoBasis-DE. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Stand 31.12.2012.
- BKG (2014): Digitales Landschaftsmodell 1:250 000 (AAA-Modellierung, DLM250 (AAA). Geodaten der deutschen Landesvermessung GeoBasis-DE. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Stand 31.12.2013.
- BKWK (2016): Kraft-Wärme-Kopplung in der Wohnungswirtschaft. Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V.

- https://www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/aktuelles/Broschur/Broschuere_Wohnungswirtschaft_fina-l-kl.pdf, zuletzt aufgerufen am 14.6.2017.
- BMVBS (2007): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte im Wohngebäudebestand vom 26. Juli 2007. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlin, 2007.
- BMVBS (2009): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand vom 30. Juli 2009. http://www.zukunft-haus.info/fileadmin/zukunft-haus/energieausweis/Gesetze_Verordnungen/EnEV/DL3_NWG-Regeln-Energieverbrauchskennwerten.pdf. Zuletzt abgerufen am 19.6.2017.
- BMW (2014): Marktanalyse Biomasse. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmw_de/marktanalysen-photovoltaik-biomasse.pdf?__blob=publicationFile&v=5, abgerufen am 23. Juni 2017.
- Bogenstätter, U. (2007): Flächen- und Raumkennzahlen, ifBOR FRZ 2007-10, www.ifbor.eu/resources/ifBOR+FRZ+2007-10+S1-10.pdf. Oktober 2007. Zuletzt abgerufen am 21.06.2017.
- Builtjes, P.; Jörß, W.; Stern, R.; Theloke, J. (2012): Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung (PAREST). Zusammenfassender Abschlussbericht. FE-Vorhaben FKZ 206 43 200/01. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 09/2012.
- Carter, W. (1996): Condensed atmospheric photooxidation mechanisms for isoprene. *Atmospheric Environment* 30. 4275-4290. 1996.
- DESTATIS (2015a): Aktuelle Informationen zum Zensus 2011. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Zensus/_Zensus.html, Tabellen -> Gebäude und Wohnungen -> „Download-Tabelle "Gebäude und Wohnungen" im Excel-Format (xlsx)“. Aufgerufen am 03.03.2015.
- DESTATIS (2015b): Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys, Gebietsänderungen (Namen-, Grenz- und Schlüsseländerungen). Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/NamensGrenzAenderung/NamensGrenzAenderung.html>. Aufgerufen am 12.03.2015.
- Düring, I.; Bächlin, W. (2009): Tendenzen der NO₂-Belastung im Land Brandenburg. 2009. Auftraggeber: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Unter Mitarbeit von IFEU GmbH, Heidelberg, Planungsbüro Dr. Hunger, Dresden, und des Dänischen National Environmental Research Institute (NERI), Roskilde. Potsdam, 2009.
- Düring, I.; Bächlin, W.; Ketzler, M.; Baum, A.; Friedrich, U.; Wurzel, S. (2011): A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift* 20 Nr. 1, S. 67-73. 2011.
- DWD (2014): Bestimmung der in AUSTAL2000 anzugebenden Anemometerhöhe. Merkblatt. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2014101714948>. Stand 15.10.2014.
- E&M (2016). BHKW Ranking. *Energie & Management* 15. November 2016. http://www.ecpower.eu/de/presse-einzelseite/energie-management-bhkw-ranking-ec-power-erneut-auf-platz-1.html?file=files/ecpower/DE/Downloads_DE/Energie_und_Management_BHKW-Ranking%202016.pdf. Zuletzt aufgerufen am 17.6.2017.
- EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf, abgerufen am 23.06.2017.
- Eichhorn (2013): MISKAM. Handbuch zu Version 6. 2013.

- EnEV (2002): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV). Berlin, 2002.
- EnEV (2009): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV). Berlin, 2009.
- EU (2001): Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Official Journal of the European Communities Nr. L 309, S. 22. 2001.
- EU (2008): Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union Nr. L 152, S. 1. 2008.
- EU (2013): Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 2. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union vom 06.09.2013, Nr. L 239.
- FZ Jülich (2017): Photolysis Frequency Browser. <https://apps.fz-juelich.de/iek-8/VDI/2016/PhotolysisFrequencies.xhtml>. Abgerufen am 12.04.2017.
- Gailfuß (2017): Schärfere Grenzwerte – aber keine neue TA Luft. https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/26207_Schaerfere-Grenzwerte-aber-keine-neue-TA-Luft.html, zuletzt abgerufen am 23.06.2017.
- GBG (2013): Verbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen. VDI-Richtlinie 3807 Blatt 1. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG). 2013.
- Gery, M.; Whitten, G.; Killus, J. (1989): A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. J. of Geophys. Res. 94, pp. 12925-12956. 1989.
- Gipson, G.; Young, J. (1999): Gas-phase chemistry. Chapter 8 in: Science Algorithms Of The EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Edited by: D. W. Byun and J. K. S. Ching. Atmospheric Modeling Division National Exposure Research Laboratory U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711, EPA/600/R-99/030. 1999.
- Hertel, O.; Berkowicz, R. (1989): Modelling NO₂ concentrations in a street canyon. DMU Luft A-131. National Environmental Research Institute, Division of Emissions and Air pollution, Denmark. 1989.
- IER (2005): Fortschreibung des Emissionskatasters Bayern für das Jahr 2000. Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Stuttgart, 2005.
- infas (2008): Postleitzahlgrenzen 2008. infas geodaten GmbH, 2008.
- INFRAS (2014): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. HBEFA Version 3.2. INFRAS AG, Bern. Auftraggeber: Umwelt-bundesamt, Berlin (Deutschland); Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern (Schweiz); Umweltbundesamt, Lebensministerium und Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (Österreich); Trafikverket (Schweden); ADEME (Frankreich); SFT (Norwegen) und JRC (Joint Research Center der Europäischen Kommission). 2014.
- IVU Umwelt (2002): Automatische Klassifizierung der Luftschadstoff-Immissionsmessungen aus dem LIMBA-Messnetz. FE-Vorhaben FKZ 200 42 265. Auftraggeber: Umweltbundesamt. Berlin, 2002.
- IVU Umwelt (2006): Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. FKZ 204 42 222. Veröffentlichung UBA-Texte 22/07. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Unter Mitarbeit von ifeu Heidelberg GmbH. 2006.
- IVU Umwelt (2009): Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse für den Luftreinhalteplan Rhein-Main. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2009.

- IVU Umwelt (2011a): Fortschreibung des Berliner Luftreinhalteplans (LRP) 2009 - 2020. In Zusammenarbeit mit VMZ Berlin und Dr. Rainer Stern. Auftraggeber: Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz Berlin. 2011.
- IVU Umwelt (2011b): Ausbreitungsrechnungen für die Gebiete Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill und den Ballungsraum Kassel. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2011.
- IVU Umwelt (2012a): Einfluss des Verkehrs und seiner Entwicklung auf die Luftqualität im Land Brandenburg. Verkehrsgutachten. Auftraggeber: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg. 2012.
- IVU Umwelt (2012b): Analyse der PM10-Grenzwertüberschreitungen im Jahre 2010 im ländlichen und urbanen Hintergrund in Ostbrandenburg. Auftraggeber: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg. 2012.
- IVU Umwelt (2014a): Flächendeckende Ermittlung der Immissions-Vorbelastung für Baden-Württemberg 2010. Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung des landesweiten Emissionskatasters und unter Berücksichtigung von gemessenen Immissionsdaten. Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) Baden-Württemberg. Veröffentlichung durch den Auftraggeber. 2014.
- IVU Umwelt (2014b): Modellrechnungen für die Gesamtbelastung an Stickstoffdioxid (NO₂) im Straßenraum zur Aktualisierung des Berliner Luftreinhalteplans 2011-2017 für die Jahre 2013-2020. Auftraggeber: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin. 2014.
- IVU Umwelt (2015): IMMIS^{em/luft/lärm} - Handbuch zur Version 6. IVU Umwelt GmbH, Freiburg. 2015.
- IVU Umwelt (2016): Ausbreitungsrechnung. Flächendeckende Ermittlung der Immissions-Vorbelastung für Niedersachsen auf Grundlage von Ausbreitungsrechnungen und unter Berücksichtigung von gemessenen Immissionsmessdaten. Auftraggeber: Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim. 2016.
- IVU Umwelt (2017a): Ausbreitungsberechnungen zur flächendeckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung. Unter Mitarbeit von Dr. Rainer Stern, Berlin und Dr. Eberhard Reimer, Berlin. Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). 2017.
- IVU Umwelt (2017b): Urbane NO₂- und PM10-Konzentrationen: Grundlagen für die Entwicklung einer modellgestützten flächenbezogenen Beurteilung der Luftqualität. FKZ 3715 51 200 0. Unter Mitarbeit von Dr. Rainer Stern, Berlin und Dr. Eberhard Reimer, Berlin. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2017.
- IWU (2005): Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden, Kurztitel: „Kurzverfahren Energieprofil“ Teil I: Flächenschätzverfahren; Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen Z6-5.4.00-12/II 13 -80 01 03-15); https://www.energieverbraucher.de/files_db/dl mg_1118992834.pdf
- IWU (2011): Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden;
http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf
- IWU (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden – zweite erweiterte Auflage –, Darmstadt.
http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf. Zuletzt abgerufen am 14.6.2017.

IWU (2017): Gradtagszahlen in Deutschland.

http://t3.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen_Deutschland.xls.

Zuletzt abgerufen am 04.04.2017.

Janicke (2014): AUSTAL2000. Programmbeschreibung zu Version 2.6. Stand 26.06.2014.

Janicke (2015): Dispersion Model LASAT Version 3.3. Reference Book. Janicke Consulting. 2015.

Jänich, F.; Lorentz, H.; Nagel, T. (2011): Aktualisierung des Luftreinhalteplans der Stadt Bremen - Auswirkungen der Umweltzone - Grobabschätzung 2015. Auftraggeber: Senator für Umwelt, Bau und Verkehr Bremen. 2011.

Kerschbaumer, A.; Reimer, E. (2003): Erstellung der Meteorologischen Eingangsdaten für das REM/CALGRID-Modell: Modellregion Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben FE-Vorhaben 299 43 246. Freie Universität Berlin. Institut für Meteorologie. 2003.

KRdL (2004): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Partikelmodell. VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL. 2004.

KRdL (2005): Umweltmeteorologie – Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL. 2005.

KRdL (2009): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen. VDI-Richtlinie 3782 Blatt 1. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Düsseldorf, 2009.

KRdL (2017): Umweltmeteorologie - Reaktionsmechanismus zur Bestimmung der Stickstoffdioxid-Konzentration. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 2017.

KWKG (2012): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. 2012.

KRdL (2015): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier. VDI-Richtlinie 3782 Blatt 6. Entwurf. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Düsseldorf, 2015.

KWKG (2016): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/kwkg_2016/gesamt.pdf, abgerufen am 23.Juni 2017.

Lenschow, P.; Abraham, H. J.; Kutzner, K.; Lutz, M.; Preuss, J. - D.; Reichenbacher, W. (2001): Some ideas about the sources of PM10. Atmospheric Environment 35 Nr. Supplement 1, S. 23-33. 2001.

Letzel, M. O. ; Flassak, T. ; Angel, D. (2012): Verbesserung der AUSTAL2000-Ergebnisse durch Strömungs- und Turbulenzübernahme aus MISKAM. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 72 Nr. 5, S. 329-334. 2012.

Nenes, A., Pilinis, C., Pandis, S. N. (1999): Continued Development and Testing of a New Thermodynamic Aerosol Module for Urban and Regional Air Quality Models. Atmospheric Environment. 33, 1553-1560. 1999.

Neunhäuserer, L.; Diegmann, V.; Gäßler, G., Pfäfflin, F. (2011): Stand der Modellierungstechnik zur Prognose der NO₂-Konzentrationen in Luftreinhalteplänen nach der 39. BImSchV. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA Texte 70/2011, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. 2011.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; Luca de Tena, D.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M.; Wenzel, B. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei

- Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global; Schlussbericht BMU – FKZ 03MAP146; März 2012.
- Öko-Institut (2013): Umweltbundesamt [Hrsg.]: F. Matthes u.a.: Politiksszenarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Öko-Institut, FZ Jülich IEKSTE, DIW Berlin, Fraunhofer ISI Karlsruhe. Auftraggeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2013.
- Öko-Institut (2015): Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030. <https://www.oeko.de/oekodoc/2328/2015-497-de.pdf>. Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Zuletzt aufgerufen am 14.6.2017.
- RAL gGmbH (2012): Vergabegrundlage für Umweltzeichen; Klein-Blockheizkraftwerke; RAL-UZ 108; Ausgabe Juli 2012.
- Reimer, E.; Scherer, B. (1992): An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modelling, Air Poll. Modelling and its Applications IX. Plenum Press. 1992.
- RMB (2017): persönliche Email der Fa. RMB vom 27.06.2017.
- Romberg E.; Börsinger, R.; Lohmeyer, A.; Ruhnke, R.; Röth, E. (1996): NO-NO₂-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 56 (1996) Nr. 6, S. 215-218. 1996.
- Schell, B.; Ackermann, H. I.; Hass, J.; Binkowski, F.S.; Ebel, A. (2001): Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality modeling system. J. Geophys. Res., 106, 28275 - 28293. 2001.
- Seinfeld J.; Pandis, S.N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics. John Wiley and Sons. 1998.
- SenBerlin (2016): Luftgütemessdaten 2015. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin. Juli 2016.
- Stern, R. (2003): Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts "Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon". 2003.
- Stern, R. (2006a): Großräumige PM₁₀-Ausbreitungsmodellierung: Abschätzung der gegenwärtigen Immissionsbelastung in Europa und Prognose bis 2010. S. 85-102. In: KRdL (Hrsg.): Feinstaub und Stickstoffdioxid. Wirkung, Quellen, Luftreinhaltepläne, Minderungsmaßnahmen. Herausgeber: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL. Beuth Verlag, 2006.
- Stern, R. (2006b): Der Beitrag des Ferntransports zu den PM₁₀- und den NO₂-Konzentrationen in Deutschland unter besonderer Betrachtung der polnischen Emissionen: Eine Modellstudie. Abschlussbericht zu dem F&E-Vorhaben 204 42 202/03 "Analyse und Bewertung der Immissionsbelastung durch Feinstaub in Deutschland durch Ferntransporte" und zu dem F&E-Vorhaben 202 43 270 "Entwicklung von Modellen zur Identifizierung von Schadstoffquellen -insbesondere im Verkehrsbereich- im Rahmen der 22. BIm-SchV - Dokumentation, Weiterentwicklung, Validierung und Maßnahmenplanung für ein bundeseinheitliches Vorgehen". Im Auf-trag des Umweltbundesamtes. 2006.
- Stern, R. (2010a): Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM₁₀- und PM_{2.5}-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 "Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung". Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R. (2010b): Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO₂- und O₃-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren

- Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R. (2010c): The Chemical Transport Model REM-CALGRID. Model's formulation and user's guide. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Bericht im Rahmen des FE-Vorhabens FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaub-belastung" PAREST. Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R. (2013): Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO₂- und O₃-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Teilbericht zum F&E-Vorhaben "Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST". Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 62/2013.
- Stern, R.; Builtjes, P.; Schaap, M.; Timmermans, R.; Vautard, R.; Hodzic, A.; Memmesheimer, M.; Feldmann, H.; Renner, E.; Wolke, R.; Kerschbaumer, A. (2008): A model intercomparison study focussing on episodes with elevated PM₁₀ concentrations. Atmospheric Environment 42 S. 4567-4588. 2008.
- Stockwell, W. R.; Kirchner, F.; Kuhn, M.; Seefeld, S. (1996): A new mechanism for regional atmospheric chemistry modelling (RACM). J. Geophys. Res. 102 (1996), pp. 4745 – 4757. 1996.
- Struschka, M.; Kilgus, D.; Springmann, M.; Baumbach, G. (2008): Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Auftraggeber: Umweltbundesamt. FKZ 205 42 322 UBA-FB 001217. UBA-Texte 44/08. 2008.
- TA Luft (2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. In der Fassung vom 24.07.2002. GMBI. Nr. 25 - 29, S. 511. 2002.
- Tebert, C.; Volz, S.; Töfge, K. (2016): Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher. Ökopol GmbH, Hamburg. Auftraggeber: Umweltbundesamt. Abschlussbericht, FKZ 3712 42 313-2. 2016.
- TRNSYS: TRNSYS 17.02.0004. TRaNsient SYstem Simulation program. Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart. www.trnsys.de
- UBA (2011): Luftqualität 2010. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau, 2011.
- UBA (2012): Luftqualität 2011. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau, 2012.
- UBA (2013): Luftqualität 2012. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau, 2013.
- UBA (2014): Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien. UBA-Texte 35/2014. Umweltbundesamt. 2014.
- UBA (2017): KWK-Nettostromerzeugung nach Energieträgern. Stand April 2017.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_datentab-zur-abb_kwk-nettostromeerzeugung-nach-et_2017-04-19.pdf. Zuletzt aufgerufen am 14.6.2017.