

Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg

Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2024

Wissenschaftlicher Endbericht



Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg

Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2024

Wissenschaftlicher Endbericht

Auftraggeber Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
(LUBW)
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Vergabenummer LUBW-2023-0018

Datum der Beauftragung 13.06.2023

Messzeitraum 02.09.2023-30.08.2024

Projektgemeinschaft
Auftragnehmer
Sykno GmbH
Am Weichselgarten 7
91058 Erlangen
E-Mail: info@sykno.de



Unterauftragnehmer
EM-Institut GmbH
Oberhacken 6
95326 Kulmbach
E-Mail: info@em-institut.de



Projektleitung Dr.-Ing. Fabian Michler
E-Mail: michler@sykno.de

Qualitätssicherung Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek
E-Mail: matthias.wuschek@em-institut.de

Autoren des Berichts Dr.-Ing. Fabian Michler
Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitende Zusammenfassung	1
2	Hintergründe und Aufgabenstellung	2
2.1	Aufgabenstellung	2
2.2	Untersuchungsgebiete und frühere Messungen	2
2.3	Zielsetzung des Projektes	5
3	Grenzwerte zum Schutz vor Hochfrequenzfeldern	6
3.1	Bestimmung der wirksamen Summenimmission	8
3.2	Welche Feldgröße wird ermittelt?	9
4	Durchführung der Messungen	12
4.1	Messverfahren, Messgeräte	12
4.1.1	Grundsätzliche Vorgehensweise	12
4.1.2	Eingesetzte Messmittel	13
4.1.3	Qualitätssicherung	13
4.1.4	Messunsicherheit	14
4.2	Auswertung und Dokumentation der Messergebnisse	14
4.3	Besonderheiten	16
5	Ergebnisse	18
5.1	Ergebnisse für alle 600 Messpunkte	18
5.1.1	Summenimmission aller Funksignale	18
5.1.2	Immissionen aufgeschlüsselt nach Funkdiensten	20
5.1.3	Summenimmission aufgeschlüsselt nach Lage des Messpunkts	23
5.1.4	Regionen und Konstellationen mit besonders auffälligen Immissionen	24
5.1.5	Vergleich mit den Ergebnissen aus früheren Messkampagnen	25
5.2	Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsgebiete	32
5.2.1	Gesamtüberblick	33
5.2.2	Untersuchungsgebiet Stuttgart	34
5.2.2.1	Statistische Kenndaten	34
5.2.2.2	Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Stuttgart	37
5.2.2.3	Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009	42
5.2.3	Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim	43
5.2.3.1	Statistische Kenndaten	44
5.2.3.2	Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim	47

5.2.3.3	Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009.....	54
5.2.4	Untersuchungsgebiet Freiburg	56
5.2.4.1	Statistische Kenndaten.....	57
5.2.4.2	Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Freiburg	60
5.2.4.3	Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009.....	67
5.2.5	Untersuchungsgebiet Oberschwaben.....	69
5.2.5.1	Statistische Kenndaten.....	70
5.2.5.2	Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Oberschwaben	73
5.2.5.3	Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009.....	80
5.3	Ergebnisse der Zusatzuntersuchung: Typische Auslastung bei 4G (LTE)/5G	82
6	Diskussion der Ergebnisse	88
7	Literaturverzeichnis.....	91
8	Anhang	92
8.1	Aktuell besonders relevante Funkssysteme	92
8.1.1	Sendeanlagen im Frequenzbereich bis 30 MHz.....	92
8.1.2	Sendeanlagen für UKW und DAB.....	93
8.1.3	Sendeanlagen für die terrestrische TV-Versorgung (DVB-T)	95
8.1.4	Sendeanlagen für analogen und den digitalen (TETRA) BOS-Funk	96
8.1.5	Mobilfunksendeanlagen	97
8.2	Messpunkte	99
8.3	Details zu Messung und Ergebnisauswertung	102
8.3.1	Novellierung der 26. BImSchV im Jahr 2013.....	102
8.3.2	Elektrische Feldstärke als Beurteilungsgröße	105
8.3.3	Konfiguration des Feldanalysators	106
8.4	Messungen am Referenzpunkt.....	112
8.5	Beeinflussung der Messergebnisse durch das Umfeld	114
8.6	Ergebnisdokumentation (Beispiel).....	116
	Abbildungsverzeichnis.....	121
	Tabellenverzeichnis.....	126

1 Einleitende Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes "Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg" wurden in den Jahren 2023 und 2024 im Auftrag der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Messungen hochfrequenter elektromagnetischer Immissionen - verursacht durch Funkwellen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 6 GHz - an 600 Messpunkten in vier Regionen Baden-Württembergs vorgenommen. Die Ergebnisse wurden mit den aktuell in Deutschland verbindlichen Grenzwerten der 26. BImSchV bewertet. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich mit den Resultaten aus früheren in Baden- Württemberg durchgeführten Erhebungen dieser Art.

Die wichtigsten Ergebnisse der Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- An allen Messpunkten lagen die ermittelten Momentanimmissionswerte klar unterhalb der gesetzlichen Vorgaben. Die höchste Grenzwertausschöpfung betrug 10,3 Prozent. An allen anderen Messpunkten lag die Grenzwertausschöpfung unter 10 Prozent.
- Im Mittel über alle 600 Punkte ergab sich nach thermischer Bewertung eine Grenzwertausschöpfung von 1,0 Prozent.
- Bedingt durch die Abschaltung zahlreicher leistungsstarker Lang-, Mittel- und Kurzwellensender (LMK-Funk) in den Untersuchungsgebieten sanken die Immissionen in diesen Frequenzbändern im Vergleich zu den früheren Erhebungen deutlich.
- Der Ausbau des digitalen Ton- und Fernsehrundfunks sowie der Netze von Mobilfunk und digitalem Behördenfunk führte zu einem Anstieg der Immissionen in den Kategorien. Dieser wurde jedoch durch die oben bereits erwähnte Abschaltung der LMK-Sender kompensiert, sodass sich in der Gesamt-Summenimmission keine signifikanten Veränderungen im Vergleich zu den früheren beiden Messkampagnen (2003 bzw. 2009) zeigen.
- In der erstmalig durchgeführten Zusatzmessung wurde festgestellt, dass die gemessenen Mobilfunkimmissionen im Mittel um einen Faktor 4,5 (leistungsbezogen) unter der möglichen Volllast liegen.

2 Hintergründe und Aufgabenstellung

2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes "Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg" wurden in den Jahren 2023 und 2024 im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) von den Auftragnehmern Messungen hochfrequenter elektromagnetischer Immissionen - verursacht durch Funkwellen - an 600 Messorten in vier Regionen Badens-Württembergs durchgeführt. Dabei sollten die Funkwellen anhand wissenschaftlich abgesicherter Messverfahren und Grenzwerte großräumig erfasst, dokumentiert, ausgewertet und beurteilt werden. Zudem sollten die aktuellen Ergebnisse mit den Resultaten aus den beiden früheren in Baden-Württemberg durchgeführten Erhebungen dieser Art ("Funkwellenmessprojekt 2003" mit 895 Messpunkten und "Funkwellenmessprojekt 2009" mit 598 Messpunkten) [BOC 03], [GRI 10] verglichen werden.

Das aktuelle Projekt wiederholt die Immissionsmessungen an 499 Punkten, die bereits im Rahmen der beiden früheren Messkampagnen untersucht wurden, um hieraus durch Ergebnisvergleich eventuell vorhandene Veränderungen der Immissionssituation erkennen zu können. Gegenüber der Messkampagne 2009 wurde allerdings die Zahl an Messpunkten, die außerorts liegen, durch Zufallsauswahl verringert. Stattdessen wurden an 101 neu festgelegten Punkten (alle innerorts) in der aktuellen Kampagne zum ersten Mal Messungen vorgenommen.

Damit blieb die Gesamtanzahl der Messpunkte mit aktuell 600 gegenüber den Messungen in 2009 (598 Punkte) nahezu unverändert, nur der Anteil der Messpunkte innerorts hat, wie vom Auftraggeber gewünscht, deutlich zugenommen. Im Projekt 2024 war somit die Zahl der Messpunkte außerorts und innerorts mit jeweils 300 gleich groß.

Die Messungen wurden von der Sykno GmbH in Kooperation mit der EM-Institut GmbH durchgeführt. Nach Abschluss des Projekts werden die Ergebnisse auf den Internetseiten der LUBW bereitgestellt.

2.2 Untersuchungsgebiete und frühere Messungen

Ziel der Messungen ist die ortsbezogene Erfassung der in Baden-Württemberg typisch vorhandenen Hochfrequenzimmissionen, verursacht durch Funkwellen ortsfester Sender. Hierzu wurde bereits im Rahmen des Funkwellenmessprojektes 2003 die Grundstruktur der Erhebungen festgelegt. Da es zu aufwändig ist, die komplette

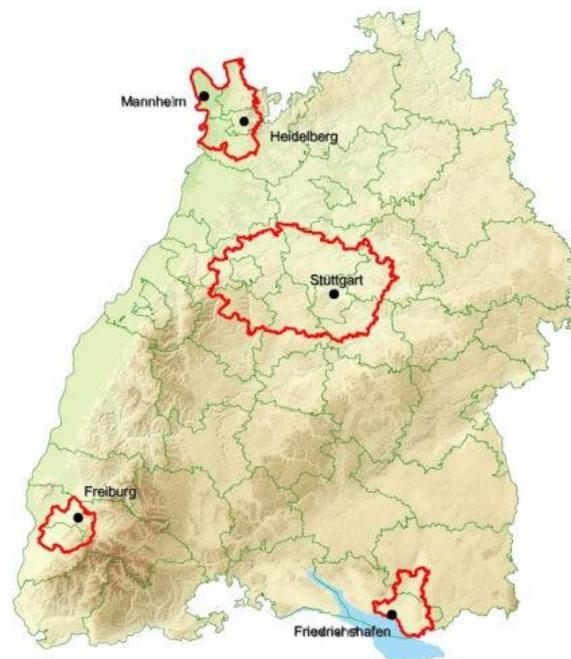


Abb. 2.1: Untersuchungsgebiete der Funkwellenmessprojekte 2003, 2009 und 2024.

Fläche des Bundeslandes Baden-Württemberg mit einem ausreichend kleinmaschigen Gitter aus Messpunkten zu überdecken, wurden die Messungen auf vier repräsentative Regionen Badens-Württembergs mit besonders hoher Bevölkerungsdichte beschränkt. Es handelt sich hierbei um folgende Regionen:

- Stuttgart (358 Messpunkte)
- Mannheim-Heidelberg (119 Messpunkte)
- Freiburg (54 Messpunkte)
- Oberschwaben (69 Messpunkte)

In Klammern ist oben für die vier Regionen jeweils die sich für die aktuelle Kampagne ergebende Anzahl an Messpunkten aufgeführt. Die Ausdehnung der Messregionen ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Man erkennt, dass die Region Stuttgart besonders groß ausgedehnt ist und daher auch die meisten Messpunkte enthält. In diesen vier Regionen wurden etwa 15 Jahre nach dem zweiten Messprogramm (2009) die Immissionen, verursacht durch Funkwellen ortsfester Sender erneut erfasst, dokumentiert, ausgewertet und bewertet.

Die Messorte wurden hierbei unabhängig von Funkanlagenstandorten in einem Gitternetz mit 2x2 Kilometern Maschenweite festgelegt (siehe Abbildung 2.2). Die Anzahl der in den einzelnen Kommunen der Untersuchungsgebiete vorhandenen Messpunkte ist daher ausschließlich von der Gemeindefläche abhängig. Das Konzept der Rastermessungen ist notwendig, um repräsentative Aussagen für die gesamte Fläche zu

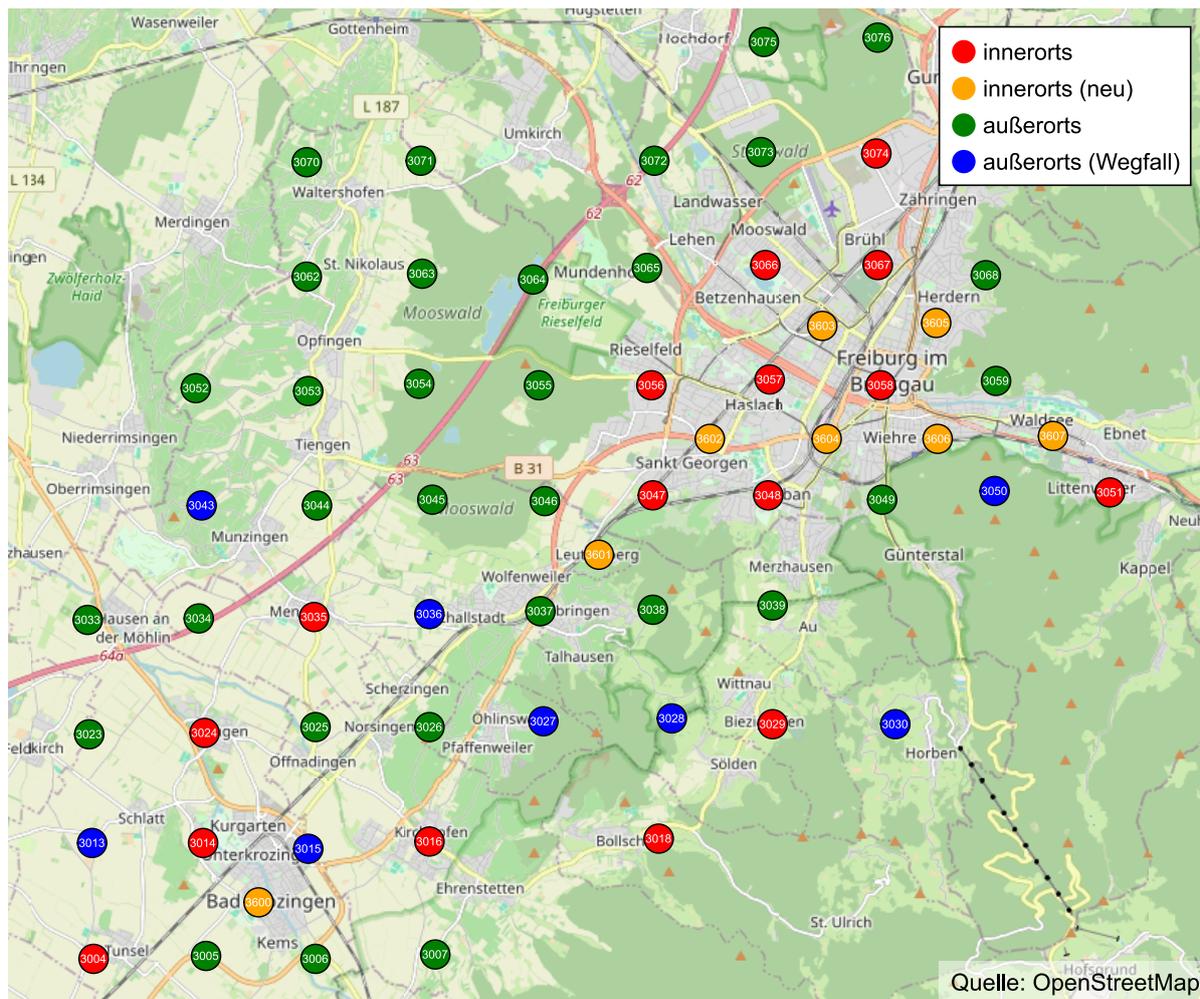


Abb. 2.2: Messpunktraster im Untersuchungsgebiet "Freiburg" (Messkampagne 2024).

erhalten. Zusätzlich wird dadurch auch ein Immissionsvergleich zwischen Stadt und Land möglich.

Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch an der Untersuchungsregion Freiburg das sich typisch ergebende Messpunkteraster für die Messkampagne 2024. Hierbei haben die verschiedenen Farben der Punktemarkierung folgende Bedeutung:

- Punkte (innerorts), auch bereits im Rahmen der Messkampagne 2009 gemessen
- Punkte (innerorts), im Rahmen der Messkampagne 2024 erstmals gemessen
- Punkte (außerorts), auch bereits im Rahmen der Messkampagne 2009 gemessen
- Punkte (außerorts), im Rahmen der Messkampagne 2024 nicht mehr gemessen

In Abbildung 2.2 erkennt man, dass die neu dazu gekommenen innerörtlichen Messpunkte per Zufallsauswahl immer in die Mitte zwischen vier "Altmesspunkte" gelegt wurden, sodass innerorts die Messpunktdichte zum Teil vergrößert wird.

2.3 Zielsetzung des Projektes

Die Ziele des Funkwellenmessprojekts 2024 sind größtenteils vergleichbar mit den Zielen der früheren Funkwellenmessprojekte:

- Repräsentative Erfassung der Einwirkungen durch Funkwellen in repräsentativen Regionen Baden-Württembergs für das Bezugsjahr 2024.
- Ermittlung und Bewertung der Einwirkungen durch Funkwellen anhand wissenschaftlich abgesicherter Messverfahren und Grenzwerte.
- Vergleich der Ergebnisse mit den Daten der Erhebungen in den Jahren 2003 beziehungsweise 2009.
- Dokumentation signifikanter Veränderungen der Immissionssituation im Vergleich zu 2003 beziehungsweise 2009.
- Zeigen die Immissionen signifikante Unterschiede zwischen Stadt und Land? Haben sich eventuelle Unterschiede gegenüber 2009 verändert?
- Gibt es Regionen mit besonders hohen oder niedrigen Immissionen?
- Herausarbeiten der möglichen Gründe für signifikante Immissionsveränderungen im Vergleich zur letzten Erhebung (2009). Dazu zählen beispielsweise
 - die Inbetriebnahme neuer Funkkommunikationssysteme,
 - die Erschließung neuer Frequenzbänder für den Mobilfunk der 4. bzw. 5. Generation (4G (LTE)- und 5G (NR)-Mobilfunk),
 - der Ausbau der Netze des digitalen Funks für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS-Digitalfunk),
 - die Leistungssteigerung und Netzverdichtung vorhandener Rundfunksysteme, beispielsweise bei DAB (Digital Audio Broadcasting),
 - die weitgehende Außerbetriebnahme veralteter Rundfunktechnologien (LMK- Funk, d.h. Funksender in den Frequenzbändern der Lang,- Mittel- und Kurzwelle zwischen 9 kHz und 30 MHz).
- Mittels der aktualisierten Umweltdaten im Bereich elektromagnetischer Felder in Baden-Württemberg soll die Risikokommunikation der Landesregierung im Bereich Mobilfunk und 5G (NR) unterstützt werden.
- Zusätzlich soll im Rahmen der aktuellen Messkampagne mittels spezieller Messungen im Bereich Mobilfunk erstmals auch eine Vergleichsbetrachtung der 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Immission bei aktueller und maximaler Anlagenauslastung im Bereich Mobilfunk erfolgen.

3 Grenzwerte zum Schutz vor Hochfrequenzfeldern

Für den Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor sowie zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder besteht in Deutschland seit dem Jahr 1996 mit der "Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)" und den darin festgelegten Grenzwerten eine verbindliche gesetzliche Regelung. Diese Verordnung wurde im Jahr 2013 novelliert [26. BImSchV]. Sie gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen.

Im hier relevanten Hochfrequenzbereich gilt die 26. BImSchV für ortsfeste Sendeanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) oder mehr, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz emittieren. Sie gilt ebenfalls für Anlagen mit einer Sendeleistung von weniger als 10 W EIRP, wenn diese an einem Standort errichtet werden, an dem unter Berücksichtigung der neuen Anlage die Grenze von 10 W EIRP überschritten wird. Die in diesem Projekt gemessenen Hochfrequenzfelder stammen im Regelfall von ortsfesten Sendeanlagen im Sinne der 26. BImSchV.

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind die unter die Verordnung fallenden Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung bestimmte Grenzwerte für den jeweiligen Frequenzbereich unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Hochfrequenzanlagen sowie Niederfrequenzanlagen nicht überschritten werden.

Basis für die Grenzwerte der 26. BImSchV sind die wissenschaftlich anerkannten Wirkungen elektromagnetischer Felder. Bei Hochfrequenzanlagen sind hierbei im Frequenzbereich ab 0,1 MHz die thermischen Wirkungen der Felder relevant. Das heißt, mögliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit durch die Erwärmung des Körpergewebes, verursacht durch Absorption eines Teils der von den hochfrequenten Feldern transportierten elektromagnetischen Energie. Die auf den thermischen Wirkungen basierenden Grenzwerte der 26. BImSchV sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tab. 3.1: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (thermische Wirkungen). Für die Frequenz f ist in die Formeln der Zahlenwert in MHz einzusetzen.

Frequenz f in MHz	Effektivwert, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle	
	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m
0,1 - 1	87	$0,73/f$
1 - 10	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$
10 - 400	28	0,073
400 - 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000 - 300000	61	0,16

Unterhalb von 0,1 MHz findet keine nennenswerte Absorption der Hochfrequenzenergie im Körper statt. Stattdessen sind im unteren Frequenzbereich die Reizwirkungen, verursacht durch von den Feldern im Körperinneren generierten Strömen dominant. Diese sind im Frequenzbereich von 9 kHz bis 10 MHz zusätzlich zu beachten. Auch für diese biologische Wirkung sind in der 26. BImSchV Grenzwerte vorgegeben. Sie sind in Tabelle 3.2 dokumentiert. Für die Bewertung der Reizwirkung gelten im hier relevanten Frequenzbereich konstante Grenzwerte von 83 V/m für das elektrische beziehungsweise 21,5 A/m für das magnetische Feld. Oberhalb von 10 MHz ist die Wirkung der induzierten Körperströme gegenüber den thermischen Wirkungen der Felder vernachlässigbar.

Tab. 3.2: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (Reizwirkungen).

Frequenz f in MHz	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m
0,009 - 10	83	21,5

Bei der Bewertung der Exposition gegenüber den von Hochfrequenzanlagen verursachten elektromagnetischen Feldern sind also je nach Frequenz unterschiedliche Grenzwerte heranzuziehen. Im Frequenzband von 0,1 bis 10 MHz sind sogar zwei unterschiedliche Grenzwerte relevant, da in diesem Frequenzbereich beide Einwirkungen der Hochfrequenzfelder (thermische Effekte bzw. Reizwirkung) von Bedeutung sein können.

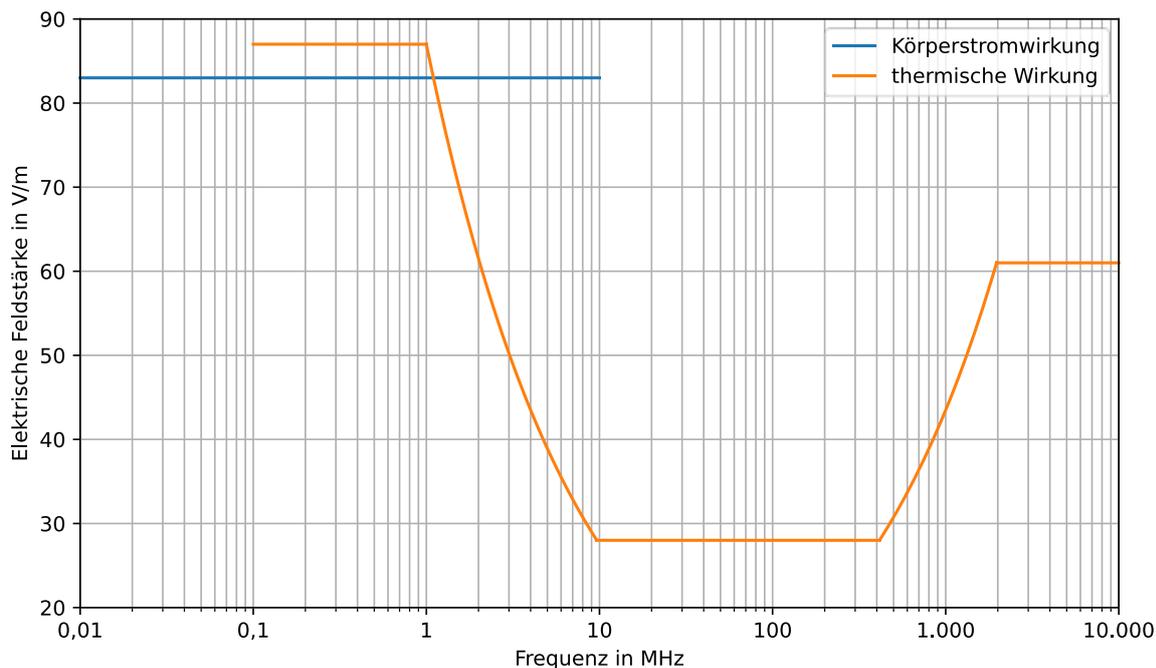


Abb. 3.1: Frequenzabhängiger Verlauf der Grenzwerte für die elektrische Feldstärke.

Aus Tabelle 3.1 bzw. Abbildung 3.1 erkennt man, dass in zwei Frequenzbereichen (1 bis 10 MHz bzw. 0,4 bis 2 GHz) die Grenzwerte für die Erwärmung frequenzabhängig sind.

3.1 Bestimmung der wirksamen Summenimmission

Da am Immissionsort gewöhnlich eine größere Anzahl an Hochfrequenzsignalen unterschiedlicher Frequenz vorhanden sind, ist eine normgerechte Summation der Einzelimmissionen vorzunehmen. Aufgrund der beiden in Abschnitt 3 erläuterten biologischen Wirkungen hochfrequenter Felder (Reizwirkung und thermische Wirkung), für die unterschiedliche Grenzwerte und Summationsvorschriften (siehe Abschnitt 8.3.1) anzuwenden sind, ergibt sich für jeden Messort nicht nur eine Summenimmission als Beurteilungsgröße der Exposition, es resultieren vielmehr zwei Werte.

Die Summenimmission bezüglich der thermischen Wirkung gibt an, wie weit in der Summe die durch die Hochfrequenzfelder verursachte Erwärmung des Körpergewebes vom maximal zulässigen Wert entfernt ist. Hierfür sind alle vorhandenen Felder mit Frequenzen ab 0,1 MHz zu betrachten.

Die Summenimmission bezüglich der Reizwirkung beschreibt hingegen, inwieweit die Summe aller durch die Felder im Körper generierten Ströme vom maximal zulässigen Wert entfernt sind. Für die Beurteilung sind alle vorhandenen Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 10 MHz heranzuziehen.

Wie in den beiden früheren Messkampagnen werden die beiden Summenimmissionswerte als prozentuale, feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung angegeben. Die

Vorgaben der 26. BImSchV sind eingehalten, wenn an einem Messort beide ermittelten Summenimmissionswerte unter 100 Prozent bleiben.

Die Vorschriften zur Summation der Einwirkung von Signalen unterschiedlicher Frequenz unterscheiden sich bei Betrachtung der Körperstromwirkung beziehungsweise der thermischen Wirkung grundlegend: Während sich die Summen-Körperstromwirkung durch eine lineare Addition der Beiträge der einzelnen Funksignale ermitteln lässt, da die von den Feldern generierten Körperströme proportional zur einwirkenden Feldstärke sind, erfolgt die Bestimmung der thermischen Wirkung über die Addition der jeweils generierten Wärmebeiträge. Diese sind proportional zur einfallenden Leistungsdichte und hängen daher quadratisch von der elektrischen Feldstärke ab. Zudem sind sowohl die Körperstromwirkungen als auch die thermischen Wirkungen in ihren Ausprägungen frequenzabhängig.

Details zur im Rahmen dieses Projekts vorgenommenen Auswertung insbesondere zur korrekten Summation der vorhandenen Einzelimmissionen finden sich in Abschnitt 8.3 dieses Berichts.

Anders als bei Ton- und TV-Rundfunksendern, die permanent eine konstante Leistung abstrahlen, ist die von Mobilfunkantennen emittierte Leistung von der aktuellen Auslastung (d.h. vornehmlich von der aktuell übertragenen Datenmenge) abhängig. Daher stellen die im Rahmen des Messprojekts ermittelten Feldstärkewerte nur die zum Zeitpunkt der Messung aktuell vorhandene, nicht jedoch die maximal mögliche Immission dar. Da die Vorgaben der 26. BImSchV jedoch auch noch bei höchster betrieblicher Auslastung der verursachenden Sendeanlagen einzuhalten sind, kann mit den Ergebnissen der Messkampagne genau genommen noch kein finaler Nachweis der Grenzwerteinhaltung geführt werden. Dies ist auch nicht die Aufgabenstellung des Funkwellenmessprojekts. Wie in Abschnitt 2.3 bereits erwähnt, soll mittels der an einer großen Zahl von Punkten gewonnenen Messergebnisse die typische Immissionssituation bezüglich hochfrequenter Felder in Baden-Württemberg sowie eventuell vorhandene signifikante Veränderungen im Vergleich zu den Erhebungen aus den Jahren 2003 beziehungsweise 2009 dargestellt werden.

Der Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV in der Umgebung von Funksendeanlagen mit mehr als 10 W EIRP erfolgt in Deutschland grundsätzlich im Rahmen des obligatorischen Standortbescheinigungsverfahrens der BNetzA.

3.2 Welche Feldgröße wird ermittelt?

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im sogenannten "Fernfeld" einer Strahlungsquelle über den Feldwellenwiderstand des Freiraumes, $Z_0 \approx 377\Omega$, ineinander überführbar und beinhalten dieselbe Information. Bei allen im Rahmen dieses Projektes vermessenen Punkten kann von Fernfeldbedingungen ausgegangen werden, da diese immer weit genug von den felderzeugenden Quellen (Sendantennen) entfernt waren.

Zudem sind die Grenzwerte der 26. BImSchV im hier relevanten Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 300 GHz so festgelegt, dass im Fernfeld bei Einhaltung des

Tab. 3.3: Wichtige Funkdienste mit ihren Frequenzbereichen und den dazugehörigen Grenzwerten nach 26. BImSchV.

Funkdienst	Frequenzbereich (Downlink)	Relevante Grenzwerte
AM-Rundfunk (LW / MW / KW)	0,1 - 30 MHz	87 - 28 V/m
UKW-Rundfunk	88 - 108 MHz	28 V/m
DAB-Rundfunk	174 - 230 MHz	28 V/m
BOS-Digitalfunk	390 - 400 MHz	28 V/m
Mobilfunk (700-MHz-Band)	758 - 788 MHz	37,8 - 38,6 V/m
Mobilfunk (800-MHz-Band)	791 - 821 MHz	38,7 - 39,4 V/m
Mobilfunk (900-MHz-Band)	918 - 960 MHz	41,7 - 42,6 V/m
Mobilfunk (1500-MHz-Band)	1.452 - 1.492 MHz	52,4 - 53,1 V/m
Mobilfunk (1800-MHz-Band)	1.805 - 1.880 MHz	58,4 - 59,6 V/m
Mobilfunk (2100-MHz-Band)	2.110 - 2.170 MHz	61 V/m
Mobilfunk (2600-MHz-Band)	2.570 - 2.690 MHz	61 V/m
Mobilfunk (3600-MHz-Band)	3.400 - 3.800 MHz	61 V/m

Grenzwertes für das elektrische Feld automatisch auch der Grenzwert für das magnetische Feld unterschritten wird. Im Rahmen des aktuellen Messprojektes wurde – so wie auch bei den früheren Erhebungen – nur eine der beiden Größen, nämlich die elektrische Feldstärke E als Beurteilungsgröße für die Immission herangezogen. Einige Erläuterungen dazu finden sich in Abschnitt 8.3.2.

In Tabelle 3.3 sind beispielhaft für einige wichtige Funksysteme die relevanten Grenzwerte nach 26. BImSchV (für die thermische Wirkung gemäß Tabelle 3.1) aufgelistet. Im Unterschied zu den beiden früheren Funkwellen-Messkampagnen ist beim Mobilfunk aktuell eine Aufspaltung der ermittelten Immissionen nach Funktechnologie (z.B. GSM, 4G (LTE), 5G (NR)) nicht mehr sinnvoll möglich, da inzwischen die einzelnen Mobilfunkbänder "technologieneutral" vergeben sind. Dies bedeutet, dass die Betreiber selbst entscheiden können, welche Funktechnologie sie in bestimmten Bändern einsetzen. Beispielsweise werden aktuell im 700-MHz-Band von manchen Betreibern 4g (LTE)-, von anderen hingegen 5G (NR)-Signale abgestrahlt. Im 900-MHz-Band nutzen die Betreiber derzeit bei vielen Senderstandorten sowohl den GSM- als auch den LTE-Funk. Bei manchen Standorten ist aber auch nur eines der beiden Funksysteme in Betrieb. 4G (LTE)- und 5G (NR)-Systeme können ein Frequenzband dynamisch untereinander aufteilen ("Dynamic Spectrum Sharing", DSS).

Aufgrund der Fortentwicklung der Funkssysteme insbesondere im Bereich des Mobilfunks ist es zwar immer noch möglich, die am Messpunkt aktuell ermittelten Gesamt- Summenimmissionen mit den Resultaten aus den früheren Erhebungen zu vergleichen. Der Immissionsvergleich von spezifischen Funkstandards oder -systemen hingegen ist nicht mehr uneingeschränkt realisierbar. Beispielsweise können weiterhin im Rundfunkbereich aktuell ermittelte Immissionen von AM-, UKW- und DAB-Tonrundfunk sowie von TV-Signalen mit den früheren Ergebnissen verglichen werden, beim Mobilfunk hingegen ist nur noch der Vergleich der Summenimmission sinnvoll möglich.

4 Durchführung der Messungen

4.1 Messverfahren, Messgeräte

4.1.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Mittels des Feldanalysators und einer geeigneten Messantenne wurden Frequenz und Stärke der einzelnen am Messort vorhandenen Hochfrequenzsignale festgestellt. Unter Einbezug der Kalibrierdaten der verwendeten Messantenne sowie der Dämpfung der verwendeten Koaxialleitung zwischen Messantenne und Feldanalysator kann damit die am Messort herrschende Feldstärke bestimmt werden.

Wie bereits in der Erhebung 2009 der Fall, wurde bei den Messungen die "Schwenkmethode" praktiziert: Hierbei wird durch Hin- und Herbewegen der Antenne das Messvolumen abgetastet (Vertikaler Schwenkbereich von zirka 1,2 bis zirka 1,6 Meter über Grund). Der Spektrumanalysator wird dabei im Modus "Max Hold" betrieben. Damit wird zuverlässig die jeweils stärkste im Messvolumen vorhandene Immission detektiert. Beim Schwenken wurde zusätzlich ein Mindestabstand von 0,5 Meter zum Boden und zu Wänden sowie zu metallischen Objekten eingehalten [LAI 14]. Zusätzlich ist sicherzustellen, dass die verschiedenen Funksignale mit Messbandbreiten und Detektoren zu erfassen sind, die an die Signalstruktur angepasst sind [LAI 14], was im Rahmen der durchgeführten Messungen geeignet berücksichtigt wurde.

Die Einzelimmissionen der verschiedenen gemessenen Funksignale wurden gemäß der in Kapitel 3 beschriebenen Formeln zur Bildung einer Gesamtimmission aufsummiert. Einzelimmissionen, die aufgrund geringer Stärke nur einen vernachlässigbar kleinen Beitrag zur Gesamtimmission liefern, wurden vernachlässigt.

Es resultiert somit im Wesentlichen die gleiche Vorgehensweise bei der Immissionsermittlung, wie es bei der letzten Erhebung (2009) der Fall war. Gewisse Unterschiede ergaben sich jedoch durch den technischen Fortschritt: Beispielsweise wurde 2024 für den Frequenzbereich unterhalb von 30 MHz eine einfacher zu handhabende Messantenne verwendet. Zudem wurden im Rahmen der aktuellen Kampagne auch Immissionen oberhalb von 3 GHz (bis maximal 6 GHz) erfasst, was insbesondere aufgrund der inzwischen stattgefundenen Ausweitung des Mobilfunkfrequenzbereichs bis 3,8 GHz unverzichtbar ist (siehe Tabelle 3.3). In den beiden früheren Kampagnen wurde nur der Frequenzbereich bis 3 GHz erfasst.

Zusätzlich sollte im Rahmen der aktuellen Erhebung mittels spezieller Messungen erstmals auch eine Vergleichsbetrachtung der Immission bei aktueller und maximaler Anlagenauslastung im Bereich 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Mobilfunk erfolgen. Dazu war

parallel zur "Hauptmessung" an jedem Punkt noch eine zweite Messung (separater Messaufbau mit einer auf einem Stativ fest montierten Messantenne) notwendig. Für diese Messung wurde ein zweiter Feldanalysator eingesetzt, mit dessen Hilfe die spezielle ("codeselektive") Erfassung von Signalisierungssignalen in den vorhandenen 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Frequenzbändern automatisch erfolgte. Aus den hierbei gewonnenen Messergebnissen kann auf die maximal mögliche 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Immission hochgerechnet werden, sodass anschließend ein Vergleich zwischen dieser Maximalimmission und der ebenfalls im Rahmen dieser "Zusatzmessung" am Messpunkt ermittelten aktuellen 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Immission erfolgen kann.

Details zur Messdurchführung und den vorgenommenen Auswertungen finden sich im Abschnitt 4.2 sowie im Anhang dieses Berichts (Abschnitt 8.3).

4.1.2 Eingesetzte Messmittel

Im Rahmen der Hochfrequenz-Immissionsmessungen wurde folgende Messausrüstung eingesetzt:

Tab. 4.1: Verwendete Messausrüstung.

Gerät	Hersteller	Art	Seriennummer
"Hauptmessung" (Ermittlung der aktuellen Immissionswerte)			
SRM-3006	Narda STS	Tragbarer Feldanalysator 9 kHz - 6 GHz	R-0157
3AX 9K-250M	Narda STS	Isotrope Messantenne (9 kHz - 250 MHz)	AA-0088
3AX 27M-3G	Narda STS	Isotrope Messantenne (27 MHz - 3 GHz)	D-0043
3AX 420M-6G	Narda STS	Isotrope Messantenne (420 MHz - 6 GHz)	G-0458
RF Cable SRM	Narda STS	HF-Koaxialkabel (1,5 m)	AB-2070
"Zusatzmessung" (Codeselektive Messung von 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Signalen)			
SRM-3006	Narda STS	Tragbarer Feldanalysator 9 kHz - 6 GHz	R-0266
3AX 420M-6G	Narda STS	Isotrope Messantenne (420 MHz - 6 GHz)	A-0067
RF Cable SRM	Narda STS	HF-Koaxialkabel (1,5 m)	AA-0085

Alle Messmittel unterliegen einem angemessenen Kalibrierzyklus (spätestens nach zwei Jahren).

4.1.3 Qualitätssicherung

Die Qualität der gewonnenen Messergebnisse wurde während der Messkampagne unter anderem durch folgende Maßnahmen sichergestellt.

- Überprüfung des Messaufbaus zu Beginn jedes Messtages mit einer Referenzstrahlungsquelle.

- Tägliche Sichtprüfung der Messgeräte und -kabel (insbesondere Kontrolle der Verbindungsstecker).
- Die Verbindung zwischen Messantenne und Koaxialkabel beziehungsweise zwischen Koaxialkabel und Feldanalysator wurde beim Transport zwischen den Messpunkten nicht geöffnet.
- Regelmäßige Überprüfung der Kabeldämpfung mittels Netzwerkanalysator im Labor.
- Regelmäßige Überprüfung der Messantennen (Frequenzgang der Eingangsimpedanz) mittels Netzwerkanalysator im Labor.
- Regelmäßige Messungen an einem festen Referenzpunkt und Vergleich der Messergebnisse.

Die Ergebnisse der Messungen am Referenzpunkt werden in Abschnitt 8.4 vorgestellt und erläutert.

4.1.4 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit für derartige Immissionsmessungen beträgt typisch ± 3 dB (erweiterte Messunsicherheit für $K = 2$, d.h. Vertrauensintervall = 95%). Hierbei sind sowohl die Unsicherheitsbeiträge für die Kalibrierung von Messantenne und Spektrumanalysator, als auch die Unsicherheit der Probennahme (z.B. Reproduzierbarkeit der Messung am Messpunkt) berücksichtigt [LAI 14], [GRI 10]. Um die Vergleichbarkeit mit den früheren Erhebungen sicherzustellen, wurden auch dieses Mal alle Messergebnisse um den Faktor der Messunsicherheit (3 dB) vergrößert. Das bedeutet bezüglich der Feldstärke einen Aufschlag von etwa 40 Prozent.

4.2 Auswertung und Dokumentation der Messergebnisse

Aussagekräftige Ergebnisse des Messprojektes finden sich nur bei kompletter Betrachtung der Messergebnisse an allen Messpunkten, denn aufgrund der großen Messpunkt- zahl sind statistisch belastbare Aussagen zur typischen Funkwellen- Immissionssituation in Baden-Württemberg möglich. Auch können dann Immissionsvergleiche zwischen einzelnen Verursachern (z.B. Rundfunk im Vergleich zu Mobilfunk) oder Lage der Messpunkte (z.B. innerhalb bzw. außerhalb von Ortschaften) erfolgen.

Die Ergebnisse an nur einem Messpunkt geben hingegen nur die Situation dieses speziellen Ortes wieder. Aufgrund der großen Anzahl an Mobilfunksenderstandorten können schon am benachbarten Messort deutlich andere Immissionswerte vorliegen.

Sinnvoll ist es natürlich dennoch, für jeden untersuchten Messpunkt eine individuelle Ergebnisdokumentation zu erstellen. Dazu wurde ein einheitliches Dokument entwickelt, in dem folgende Informationen zu finden sind:

1. Lage des Messpunkts und Messbedingungen

- Beschreibung des Messpunkts (Ort, Straße, Beschreibung der Lage des Messpunkts).
- Koordinaten (WGS84, ETRS89/UTM)
- Datum und Uhrzeit (von - bis) der Messung
- Wetterbedingungen (Niederschlag, Nebel, Temperatur, relative Luftfeuchte)
- Gegebenenfalls Dokumentation eines im unmittelbaren Umfeld des Messpunkts sichtbaren Senderstandortes (z.B. Funkmast). Falls möglich: Angabe einer geschätzten Entfernung und des Azimuts zum Standort.
- Sonstige Besonderheiten.
- Landkartenausschnitt (OpenStreetMap) mit eingezeichnetem Messpunkt sowie ein Foto des Messpunkts und der unmittelbaren Umgebung.

2. Zusammenfassung der Messergebnisse (Summenimmissionen)

- Festgestellte Summenimmission (total) als prozentualer Wert für die thermische Wirkung (Summe aller gemessenen und bewerteten Immissionen im Frequenzbereich von 0,1 MHz bis 6 GHz).
- Festgestellte Summenimmission (total) als prozentualer Wert für die Körperstromwirkung (Summe aller gemessenen und bewerteten Immissionen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 10 MHz).
- Festgestellte Summenimmission für bestimmte spezielle Frequenzbereiche (bzw. Funkdienste) zwischen 0,1 MHz bis 6 GHz, bewertet mit den Grenzwerten für die thermische Wirkung:
 - Frequenzbereich der LMK-Funksender (0,1 bis 30 MHz)
 - Frequenzbereich des UKW-Tonrundfunks (87,5 bis 108 MHz)
 - Frequenzbereich des DAB-Tonrundfunks (174 bis 230 MHz)
 - Frequenzbereich des DVB-T-Fernsehrundfunks (470 bis 694 MHz)
 - Frequenzbänder des Mobilfunk-Downlinks
 - Frequenzbereich des BOS-Digitalfunks (Behördenfunk) und anderer Funkdienste (390 bis 470 MHz)
 - Sonstige am Messpunkt nennenswert vorhandene Signale (9 kHz bis 6 GHz), wie z.B. Radar oder Funknavigationssignale

Es werden hierbei nicht nur die aktuellen Ergebnisse dokumentiert, sondern zum Vergleich auch die Resultate der Erhebungen aus 2003 und 2009 angegeben. Zudem wird ersichtlich, wie die am Messpunkt aktuell ermittelten Summenimmissionswerte im Vergleich zum Mittelwert über alle 600 Messpunkte der Kampagne liegen. Zum einfacheren Vergleich sind zudem die Resultate nicht nur als Zahlenwerte, sondern auch in einem Säulendiagramm dargestellt.

3. Detaillierte Messergebnisse

- Detaillierte tabellarische Dokumentation der am Messpunkt nennenswert vorhandenen Einzelimmissionen, aufgegliedert nach Frequenzbändern bzw. Funkdiensten. Ergänzend zu den prozentualen Grenzwertausschöpfungen sind in der Tabelle auch absolute Feldstärkewerte angegeben.

Ein derartiges Dokument ist beispielhaft in Abschnitt 8.6 diesem Bericht beigelegt.

Die statistischen Auswertungen über alle 600 Messpunkte, Vergleiche mit den früheren Messkampagnen sowie die sich ergebenden Schlussfolgerungen sind in den Kapiteln 5 und 6 dieses Berichts zu finden.

4.3 Besonderheiten

Es war nicht zu erwarten, dass nach 15 Jahren der Zugang zu allen Messpunkten noch möglich ist. Vielmehr musste damit gerechnet werden, dass einige der früheren Messpunkte gar nicht mehr zugänglich sind, sodass sie durch neue Punkte ersetzt werden müssen. Dies war letztlich bei den folgenden drei Punkten der Fall:

- Messpunkt innerorts (Nr. 1070); Lage weit innerhalb des nicht zugänglichen Hafengebäudes. Entscheidung: Wahl eines neuen Messpunkts (Nr. 1626)
- Messpunkt außerorts (Nr. 2193); alle Zufahrten/Waldwege gesperrt. Entscheidung: Wahl eines neuen Messpunkts (Nr. 2096)
- Messpunkt außerorts (Nr. 3045); geschlossene Schranke am Waldweg. Entscheidung: Wahl eines neuen Messpunkts (Nr. 3055)

30 Messpunkte mussten verschoben werden. Maximal betrug die Verschiebung 250 Meter, im Mittel waren es etwa 100 Meter. Hierzu zwei Beispiele:

- Neuer Messpunkt Nr. 2502: Ursprüngliche Lage direkt an einer Bundesstraße. Die Messung dort war zu gefährlich, daher Verschiebung zur nächsten Haltebucht (Verschiebung: 250 Meter).



- Messpunkt Nr. 1142: Lage innerorts hinter einer Straßenbaustelle mit Vollsperrung (Verschiebung: 50 Meter).



Die häufigsten Gründe für eine Verschiebung waren: Lage des Messpunkts auf Privatgrund, nicht befahrbare Feldwege (Matsch), nicht mehr existierende Feldwege (zusammengelegte Felder), geschlossene Schranken an Waldwegen oder eine geänderte Bebauung (z.B. ein 2009 noch freies Grundstück ist inzwischen bebaut).

An einigen Messpunkten waren zudem die GPS-Koordinaten der früheren Messkampagnen ungenau. Dank der Fotos der alten Messberichte konnte der genaue Messpunkt in der Regel genau bestimmt werden.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse für alle 600 Messpunkte

5.1.1 Summenimmission aller Funksignale

Die Übersicht über die ermittelte Summen-Grenzwertausschöpfung aller 600 Messpunkte ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Immissionen, die nach der thermischen Wirkung bewertet werden, im Vergleich zu den Immissionen, die auf der Körperstromwirkung beruhen, an den meisten Messpunkten (568 von 600) klar überwiegen. Während die maximale nach Körperstromwirkung bewertete Grenzwertausschöpfung lediglich 0,32% beträgt (Messpunkt 2636), liegt die maximale nach thermischer Bewertung ermittelte Grenzwertausschöpfung bei 10,28% (Messpunkt 2038). Immissionen im Frequenzbereich unter 10 MHz haben im Vergleich zu den früheren Erhebungen offensichtlich nahezu komplett an Bedeutung verloren. Aus diesem Grund beschränken sich die folgenden Detailanalysen allein auf die Grenzwertausschöpfung bezüglich der thermischen Wirkung.

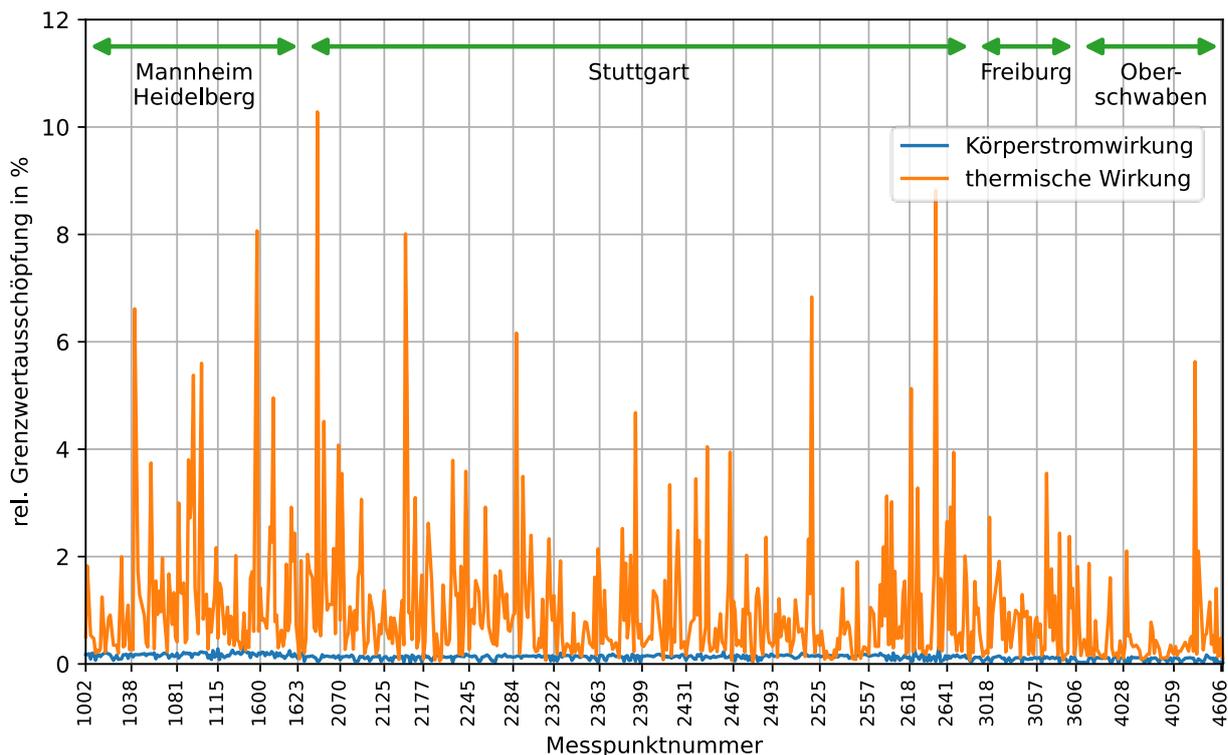


Abb. 5.1: Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte.

Abbildung 5.2 zeigt eine grobe Aufschlüsselung der ermittelten Immissionswerte mittels vier Größenklassen. Daraus wird ersichtlich, dass an mehr als zwei Drittel aller Messpunkte (69% bzw. 410 Punkte) eine Grenzwertausschöpfung von weniger als 1% vorlag. An 16 dieser 410 Punkte lag die Grenzwertausschöpfung sogar unter 0,1%. Lediglich an 2% aller Messpunkte konnte eine Grenzwertausschöpfung von mehr als 5% nachgewiesen werden (12 Messpunkte).

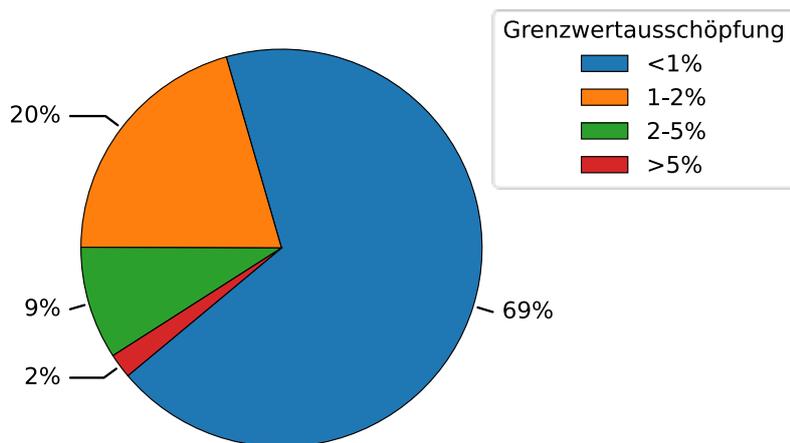


Abb. 5.2: Verteilung der ermittelten thermischen Grenzwertausschöpfung in vier Größenklassen.

Dieselbe Aufteilung wurde in Abbildung 5.3 für die Grenzwertausschöpfung nach Körperstromwirkung vorgenommen. Es zeigt sich klar, dass dieser im Rahmen der Messkampagne keine praktische Bedeutung mehr zukommt.

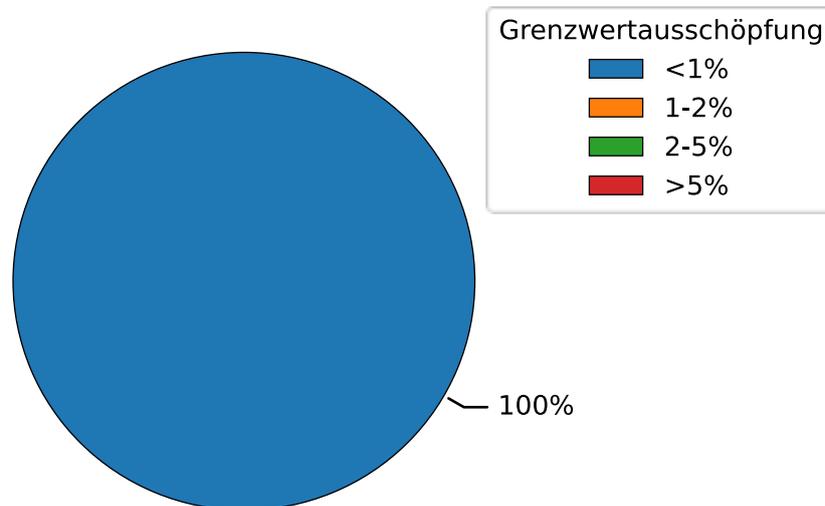


Abb. 5.3: Verteilung der ermittelten Grenzwertausschöpfung nach Körperstromwirkung in vier Größenklassen.

5.1.2 Immissionen aufgeschlüsselt nach Funkdiensten

In der Darstellung der Median-, Mittel- und Maximalwerte der Grenzwertausschöpfung in Abhängigkeit der einzelnen Funkdienste, gezeigt in Abbildung 5.4, zeigt sich sehr anschaulich, dass der Mobilfunk sowohl den höchsten Maximalwert der Grenzwertausschöpfung als auch den höchsten Medianwert aller Funkdienste erreicht. Danach folgen der Fernseh Rundfunk (DVB-T), der digitale (DAB), der analoge Tonrundfunk (UKW), sonstige Sender, der digitale Behördenfunk (BOS) und schließlich der LMK-Funk. Die statistischen Kennzahlen hierzu sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

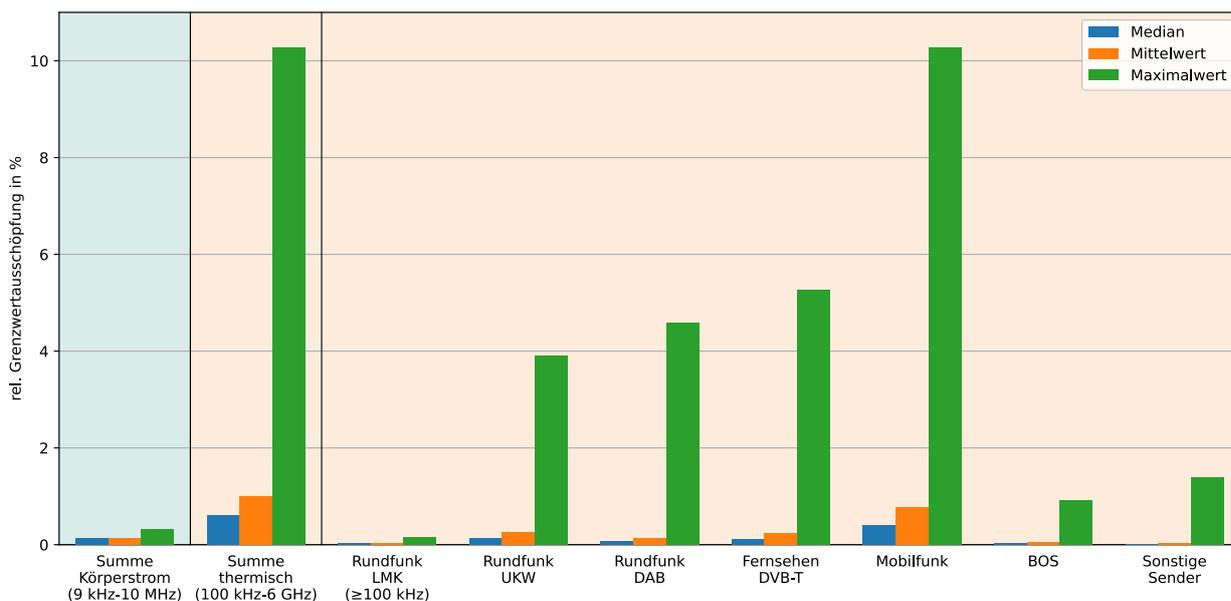


Abb. 5.4: Mittlere Immission, Median und höchster Immissionswert aufgeschlüsselt für die einzelnen Immissionsklassen.

Tab. 5.1: Statistische Kenndaten der ermittelten Immissionen in Prozent.

Kategorie	Mittelwert	Perzentile			Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		25%	50%	75%			
Summe Körperstrom	0,13	0,11	0,14	0,16	0,32	0,05	0,38
Summe thermisch	1,00	0,30	0,61	1,28	10,28	1,19	1,19
Rundfunk LMK	0,04	0,02	0,03	0,05	0,16	0,02	0,55
Rundfunk UKW	0,26	0,08	0,13	0,25	3,90	0,40	1,54
Rundfunk DAB	0,13	0,00	0,07	0,14	4,58	0,29	2,17
Fernsehen DVB-T	0,23	0,00	0,12	0,26	5,27	0,40	1,70
Mobilfunk	0,78	0,17	0,40	0,93	10,28	1,13	1,45
BOS	0,05	0,03	0,03	0,05	0,92	0,08	1,45
Sonstige Sender	0,03	0,01	0,02	0,03	1,40	0,07	2,35

Betrachtet man die Anteile der Grenzwertausschöpfungen der einzelnen Funkdienste an der mittleren Gesamt-Grenzwertausschöpfung, so zeigt sich, dass der Mobilfunk im Mittel über alle 600 Punkte mit 52% den größten Beitrag zur Gesamtimmission liefert (siehe Abbildung 5.5). Der Rest wird größtenteils von UKW-, DAB- und DVB-T-Sendern erzeugt (41%). Die verbleibenden 7% stammen vom LMK- und BOS-Funk sowie sonstigen Sendern.

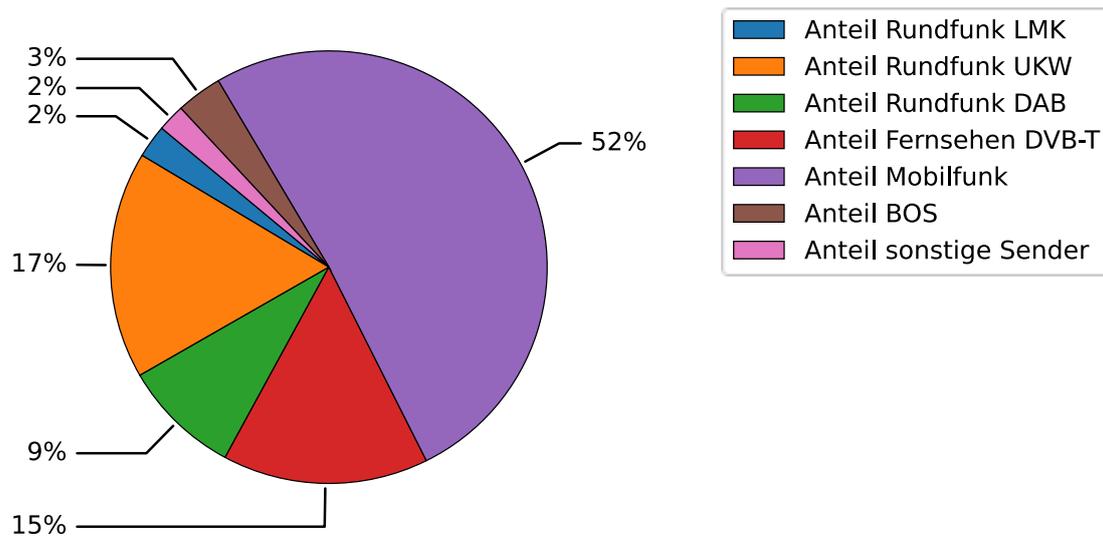


Abb. 5.5: Prozentualer Anteil der einzelnen Funkdienste an der mittleren thermischen Gesamtgrenzwertausschöpfung.

In der Betrachtung der Klassenmittelwerte der einzelnen Funkdienste über alle Messpunkte, welche in Abbildung 5.6 gezeigt ist, dominiert erneut der Mobilfunk. Der Mittelwert über alle Messpunkte liegt jedoch mit lediglich 0,78% weit unterhalb der maximal zulässigen Grenzwertausschöpfung von 100%. Die mittlere thermische Summen- Grenzwertausschöpfung über alle vorhandenen Hochfrequenzimmissionen beträgt 1%, während die mittlere, nach Körperstromwirkung bewertete Grenzwertausschöpfung nur 0,13% beträgt.

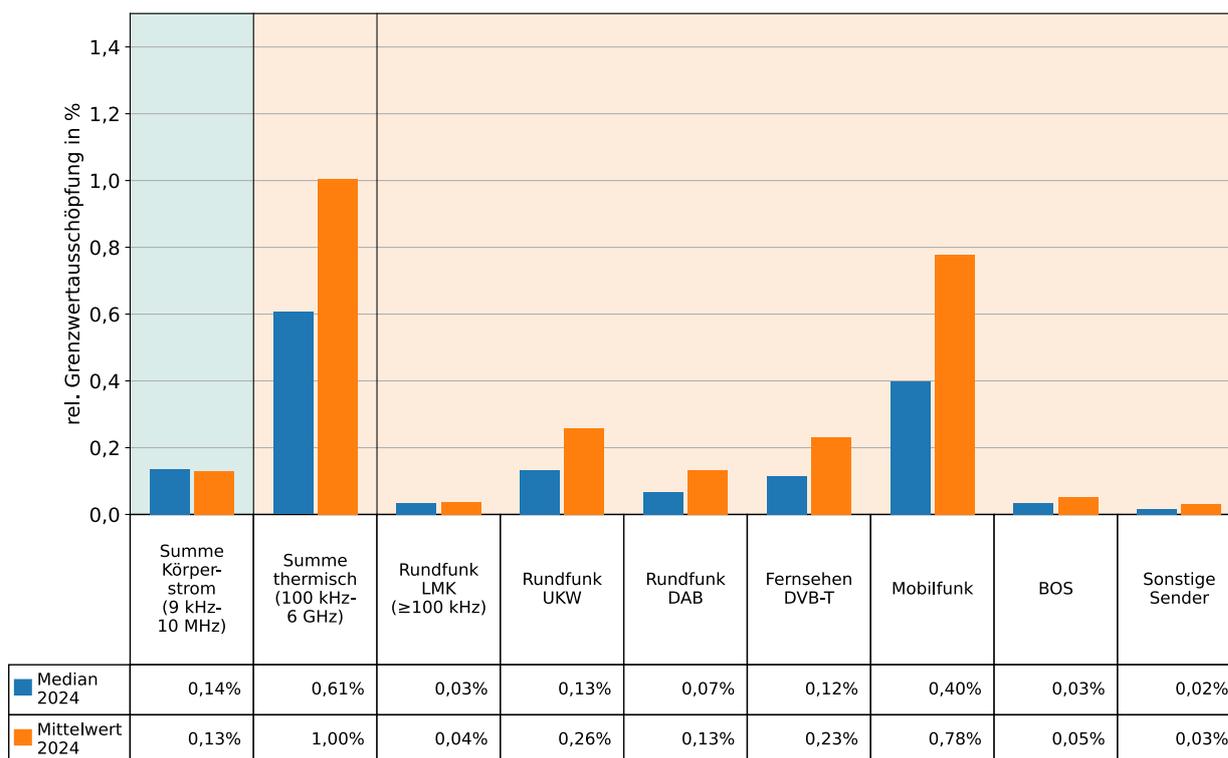


Abb. 5.6: Klassenmittel- und Medianwerte über alle 600 Messpunkte.

5.1.3 Summenimmission aufgeschlüsselt nach Lage des Messpunkts

Wie eingangs erwähnt, befand sich die Hälfte der 600 Messpunkte innerorts, während sich die restlichen 300 Messpunkte außerhalb geschlossener Ortschaften befanden. Vergleicht man nun die mittleren Grenzwertausschöpfungen für beide Gebietsklassen (Abbildung 5.7), zeigt sich mit 1,14% innerorts eine höhere mittlere Grenzwertausschöpfung als außerorts (0,87%), welche hauptsächlich aus den höheren Mobilfunk- Immissionen innerorts resultiert. Dies ist vermutlich auf das innerorts dichter ausgebaute Mobilfunknetz zurückzuführen. Beim Ton- und Fernsehrundfunk hingegen zeigt sich eher der gegenteilige Effekt. Grund dafür ist vermutlich hauptsächlich die Tatsache, dass die Rundfunk-Sendetürme der üblicherweise außerorts in exponierter Lage (Berge) errichtet wurden.

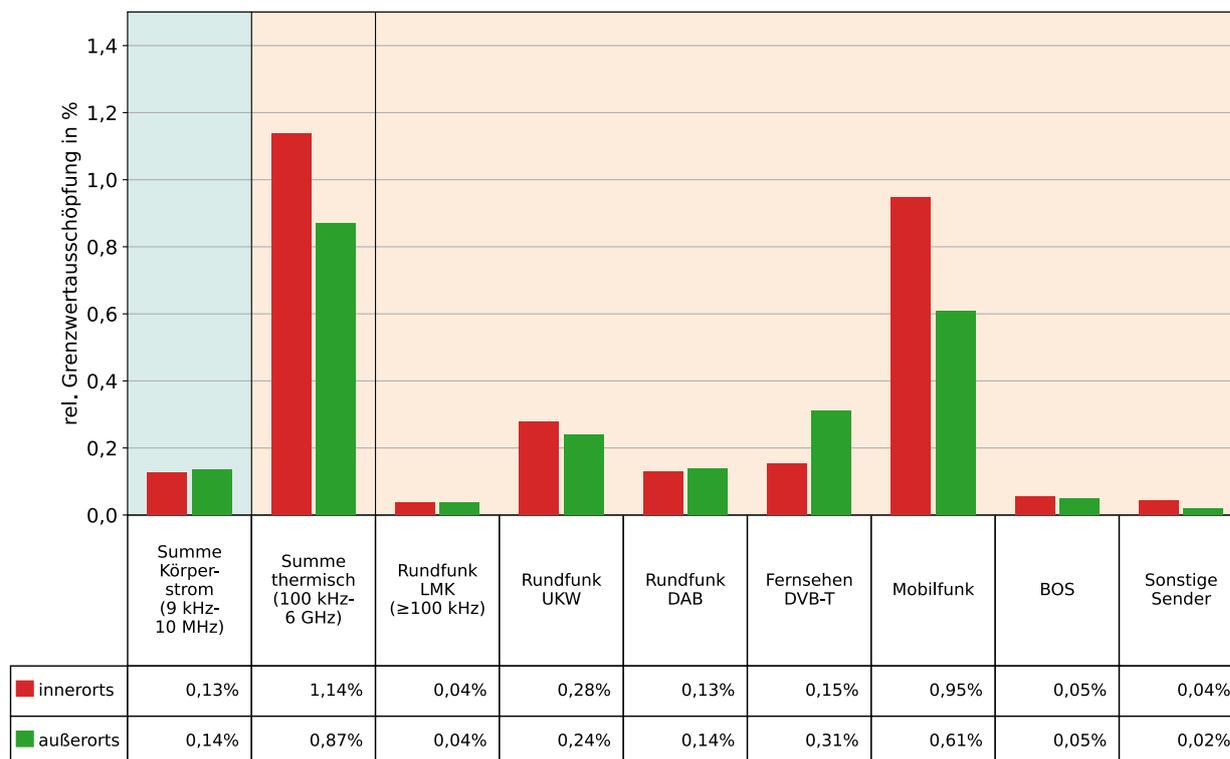


Abb. 5.7: Durchschnittliche Summenimmissionen der einzelnen Funkdienste inner- und außerorts im Vergleich.

5.1.4 Regionen und Konstellationen mit besonders auffälligen Immissionen

An einigen Messpunkten wurden gegenüber dem Mittelwert über alle Messpunkte signifikant höhere Immissionen festgestellt. Die zehn Messpunkte mit den höchsten Immissionen sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Es zeigt sich, dass an neun von zehn Punkten eine Mobilfunksendeanlage in unmittelbarer Nähe (≤ 500 m) des Messpunkts und in Sichtverbindung zu diesem lag. Ein Messpunkt befand sich unmittelbar neben dem Stuttgarter Fernsehturm, woraus vergleichsweise hohe Immissionen durch den digitalen Fernseh Rundfunk (DVB-T) resultierten.

Tab. 5.2: Punkte mit den höchsten Immissionen. An allen Punkten bestand Sichtverbindung zu einem Sendemasten.

Messpunkt	Grenzwertausschöpfung thermisch in %	Hauptursache	Entfernung	Mittenfrequenz des Hauptbeitrags
2038	10,28	Mobilfunk MB08	500 m	806 MHz
2634	8,82	Mobilfunk MB08	60 m	806 MHz
1147	8,07	Mobilfunk MB08	90 m	806 MHz
2156	8,01	Fernsehen DVB-T	100 m	626 MHz
2517	6,84	Mobilfunk MB18	180 m	1842,5 MHz
1042	6,62	Mobilfunk MB09	250 m	939 MHz
2286	6,16	Mobilfunk MB21	155 m	2140 MHz
4072	5,63	Mobilfunk MB09	170 m	939 MHz
1103	5,60	Mobilfunk MB21	300 m	2140 MHz
1095	5,38	Mobilfunk MB08	200 m	806 MHz

5.1.5 Vergleich mit den Ergebnissen aus früheren Messkampagnen

In diesem Abschnitt werden die in der aktuellen Messkampagne erfassten Immissionswerte mit denen der früheren Messkampagnen verglichen. In einer ersten Darstellung in Abbildung 5.8 zeigt sich, dass sich die 2024 ermittelten Immissionen gegenüber den Werten aus 2009 an über der Hälfte der Messpunkte (61%) nur um maximal $\pm 50\%$ verändert haben. Mit anderen Worten: Die Werte haben sich an 61% der Messpunkte nicht signifikant verändert, da sich dort die ermittelte Zu- bzw. Abnahme der Immission maximal in etwa in der Größenordnung der für diese Untersuchung anzusetzenden Messunsicherheit bewegt. An 21% der Messpunkte hat sich eine signifikante Abnahme, an den verbleibenden 18% eine signifikante Zunahme der Immissionswerte ergeben. Insgesamt sind die Immissionen an 36% der Messpunkte gestiegen, während sie an den verbleibenden 64% gesunken sind.

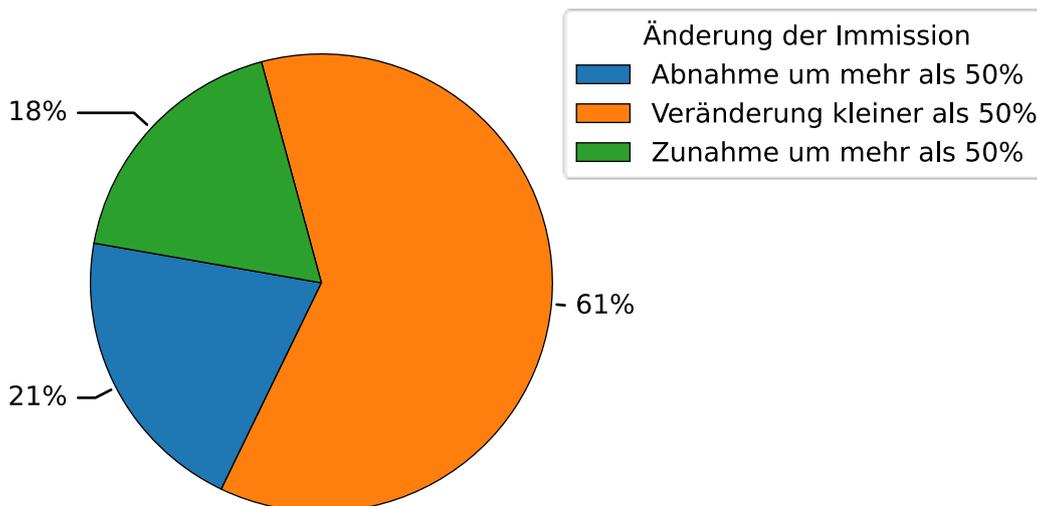


Abb. 5.8: Prozentuale Anteile der Messpunkte bezüglich der Änderung der thermischen Gesamtmission von 2009 auf 2024.

Betrachtet man die Klassenmittel- und Medianwerte der Grenzwertausschöpfungen der einzelnen Funkdienste für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024, (Abbildungen 5.9 und 5.10), erkennt man eine starke Abnahme der Grenzwertausschöpfung nach Körperstromwirkung im Vergleich zwischen der aktuellen Messkampagne und den früheren Messungen. Dies lässt sich durch die flächendeckende Abschaltung der Lang-, Mittel- und Kurzwellenrundfunksender in Deutschland erklären.

Während die mittleren Messwerte beim analogen UKW-Tonrundfunk während der letzten 20 Jahre nahezu unverändert blieben, stiegen sie beim digitalen Ton- und Fernsehrundfunk (DAB, DVB-T) an, was auf den Ausbau dieser Netze zurückzuführen ist. Allerdings sollte man beachten, dass beim Fernsehrundfunk nur eine Verlagerung der Immission von analoger Technik (2003 wurde hier eine Summenimmission von 0,36% gemessen) auf die digitale Variante stattgefunden hat. Im Ganzen gesehen, hat sich die mittlere Immission, verursacht durch Fernsehsender von 2003 bis 2024 von 0,36 auf 0,25% verringert. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass in einem Frequenzkanal mit DVB-T mehrere TV-Programme gleichzeitig übertragen werden können, was bei der analogen Technik nicht möglich war. Somit wird bei DVB-T zur Übertragung der gleichen Anzahl von Programmen weniger Leistung abgestrahlt, da weniger Frequenzkanäle genutzt werden müssen (höhere "spektrale Effizienz").

Gestiegen sind die Immissionen beim Mobil- und BOS-Funk, was ebenfalls eine Folge des Netzausbaus ist.

Die mittlere Grenzwertausschöpfung bezüglich der thermischen Wirkung ist nahezu konstant geblieben (mit einer leichten Abnahmetendenz). Man kann also festhalten, dass die in den letzten 20 Jahren zu beobachtende Zunahme der Immissionen im Bereich Mobil- und BOS-Funk sowie beim digitalen Tonrundfunk durch die Abnahme im Bereich LMK-Rundfunk an den 499 Messpunkten im Mittel mindestens kompensiert wurde.

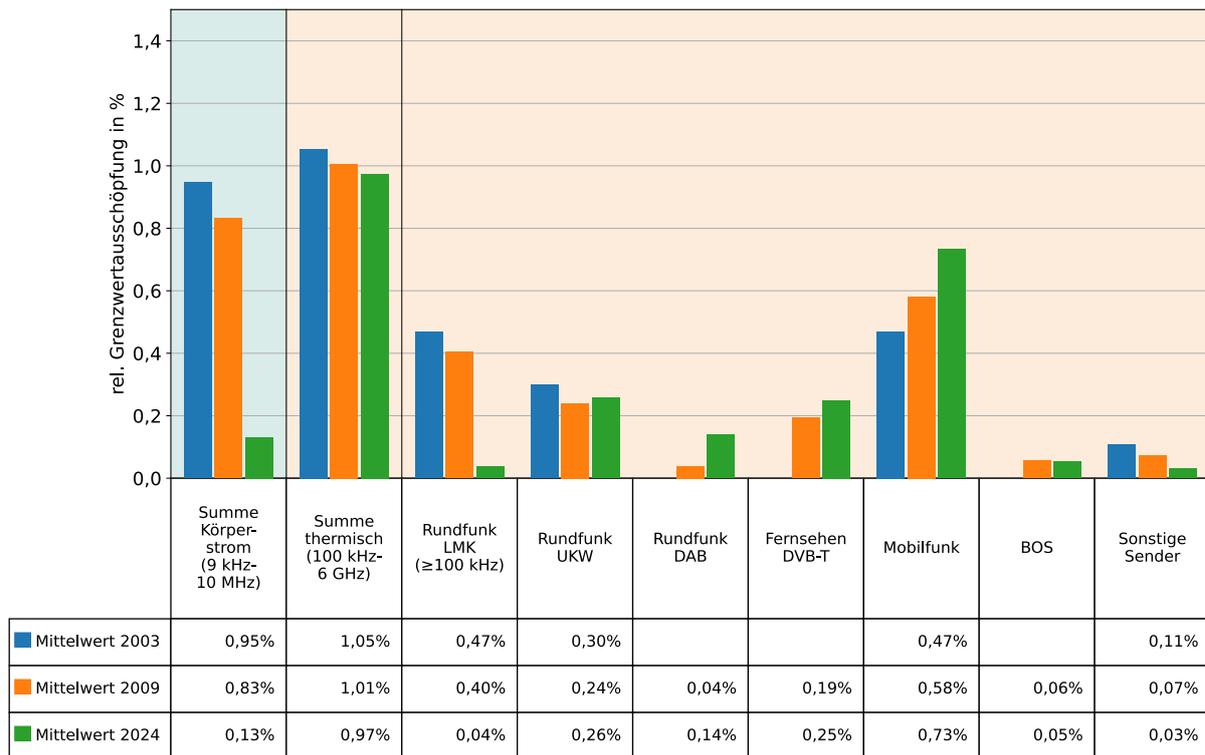


Abb. 5.9: Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024.

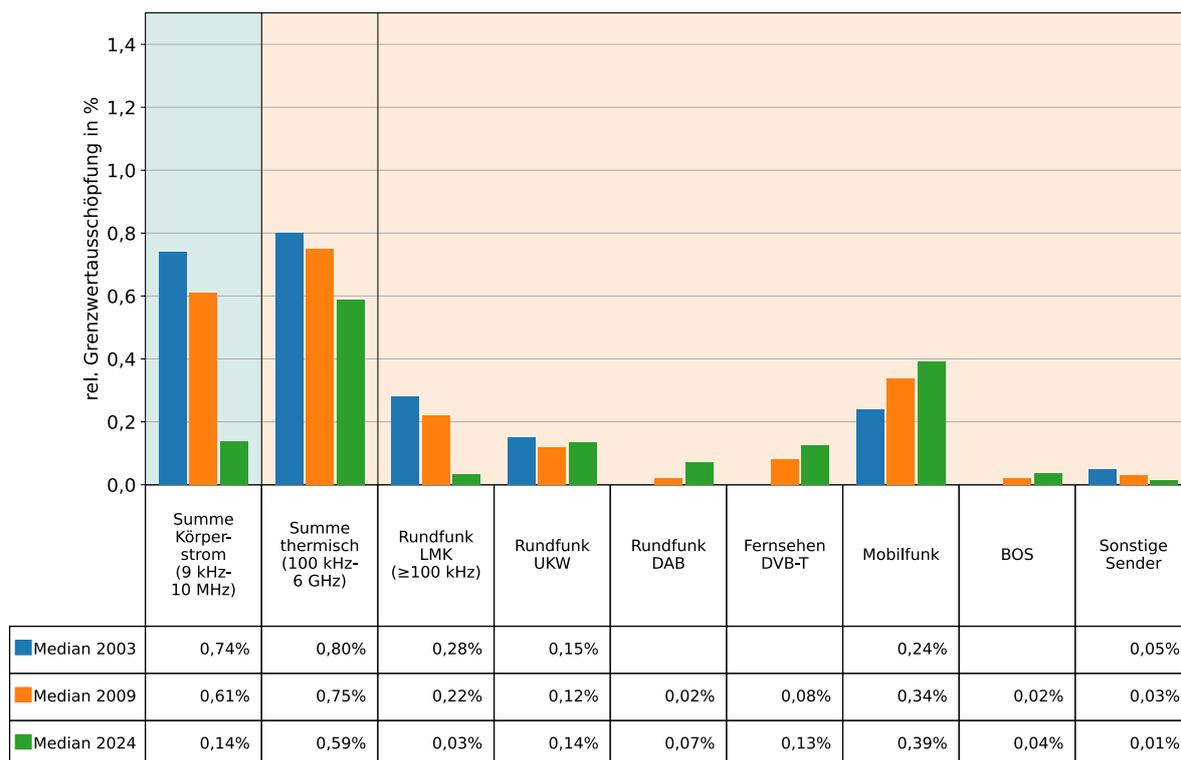


Abb. 5.10: Vergleich des Klassenmedians für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024.

In der Darstellung der Veränderung von Klassenmittelwert, Median und Maximalwert der Grenzwertausschöpfungen zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 in Abbildung 5.11 zeigen sich wie erwartet die größten Abnahmen im Bereich des Lang-, Mittel- und Kurzwellenrundfunks. Beim Digitalradio (DAB) ist der größte relative Anstieg zu verzeichnen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Absolutwerte dieses Funkdienstes verglichen mit der Gesamtmission nur sehr gering ausfallen (siehe Abbildung 5.9). Wie oben bereits erwähnt, geht mit der in Abbildung 5.11 sichtbaren Zunahme des Klassenmittelwerts bei DVB-T eine Abnahme beim analogen Fernsehfunk (auf den Wert Null) einher.

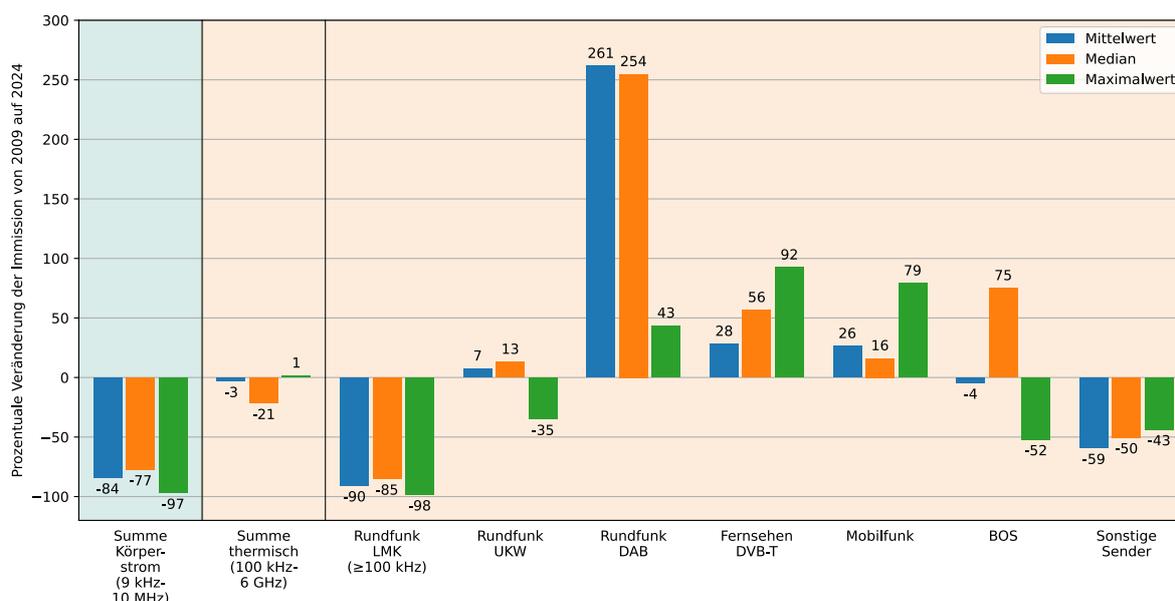


Abb. 5.11: Veränderung von Klassenmittelwert, Median und Maximalwert für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.

Im Vergleich der relativen Häufigkeiten der thermischen Gesamtimmersion zwischen den einzelnen Messkampagnen in Abbildung 5.12 zeigt sich, dass sich die Anteile kaum geändert haben. Während in 2024 an 70% der Messpunkte eine Summen-Grenzwertausschöpfung von weniger als 1% erreicht wurde, waren es im Jahr 2009 65% in dieser Kategorie. Eine Zunahme von 1% auf 2% ist für Grenzwertausschöpfungen (>5%) zu verzeichnen, während die relative Anzahl der Messpunkte mit Grenzwerten zwischen 2% und 5% mit 8% unverändert blieb. Eine leichte Abnahme von 26% auf 20% zeigt sich im Intervall der Grenzwertausschöpfungen von 1% bis 2%.

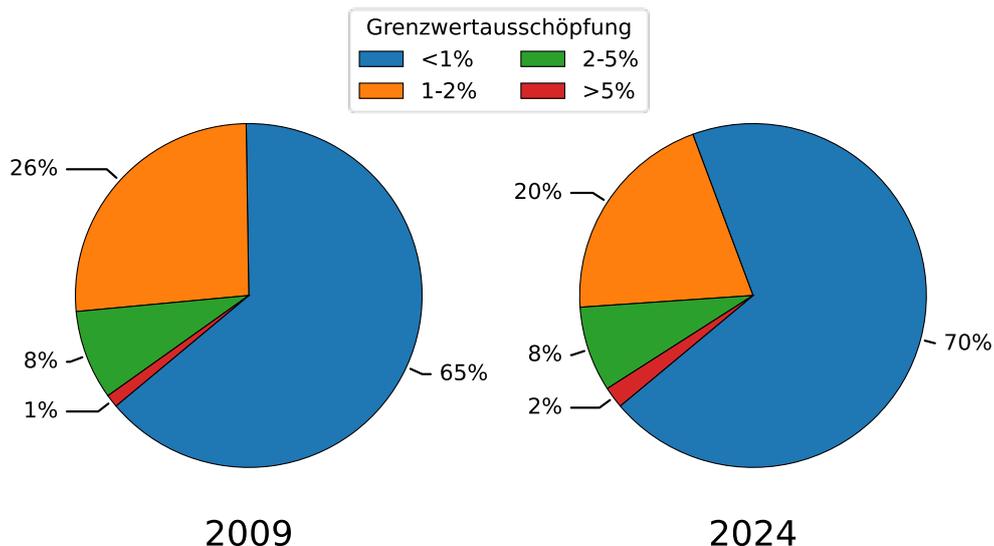


Abb. 5.12: Verteilung der ermittelten thermischen Grenzwertausschöpfung in vier Größenklassen – Vergleich der Messprogramme 2009 und 2024 (499 Messpunkte).

Betrachtet man die relativen Anteile der mittleren Immissionen der einzelnen Funkdienste an der durchschnittlichen thermischen Gesamtmission (Abbildung 5.13), zeigen sich wieder die bereits mehrfach beobachteten Verschiebungen zwischen den Jahren 2009 und 2024. Während die Anteile des Mobilfunks (von 37% auf 49%) und des digitalen Tonrundfunks (von 2% auf 9%) gewachsen sind, blieben die Anteile des UKW-Rundfunks und des digitalen Fernsehfunks an der Gesamtmission in etwa unverändert. Beim Lang-, Mittel- und Kurzwellenrundfunk hingegen ist eine starke Abnahme (von 25% auf 2%) zu verzeichnen. Er spielt also nahezu keine Rolle mehr.

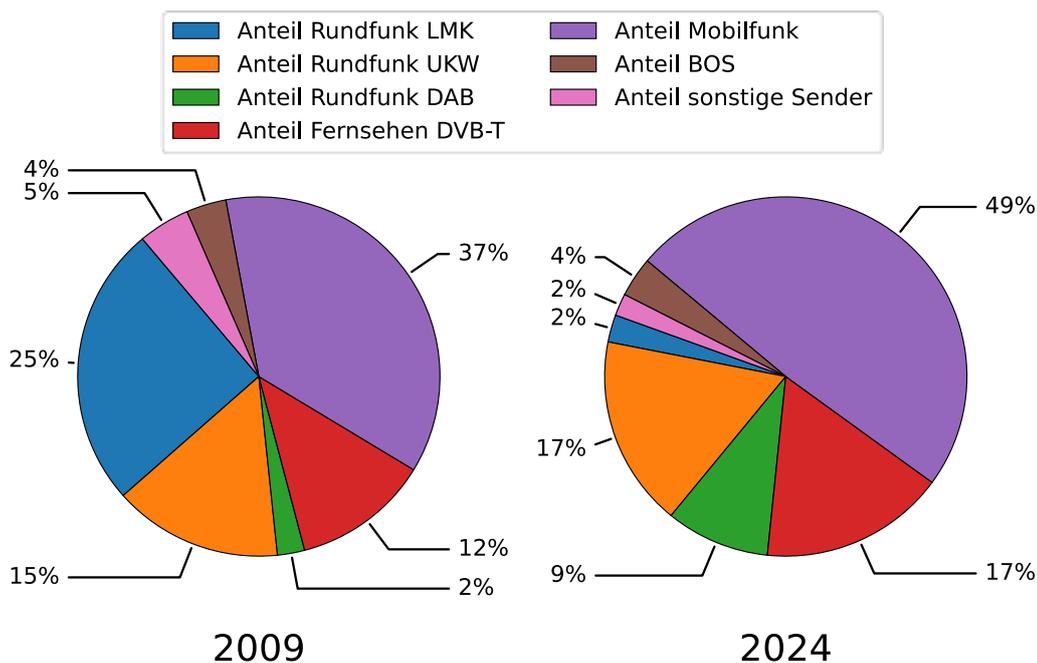


Abb. 5.13: Veränderung der Anteile der Funkdienste an der Gesamtimmission zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.

Betrachtet man die relative Veränderung der mittleren Immissionen der Funkdienste für das gleiche Messpunktekollektiv aufgeschlüsselt nach den vier Untersuchungsgebieten zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 5.14. Für die meisten Funkdienste sind in den Untersuchungsgebieten vergleichbare Veränderungen festzustellen, wobei der größte relative Anstieg beim digitalen Tonrundfunk (DAB), die größte relative Abnahme beim LMK-Rundfunk zu verzeichnen ist.

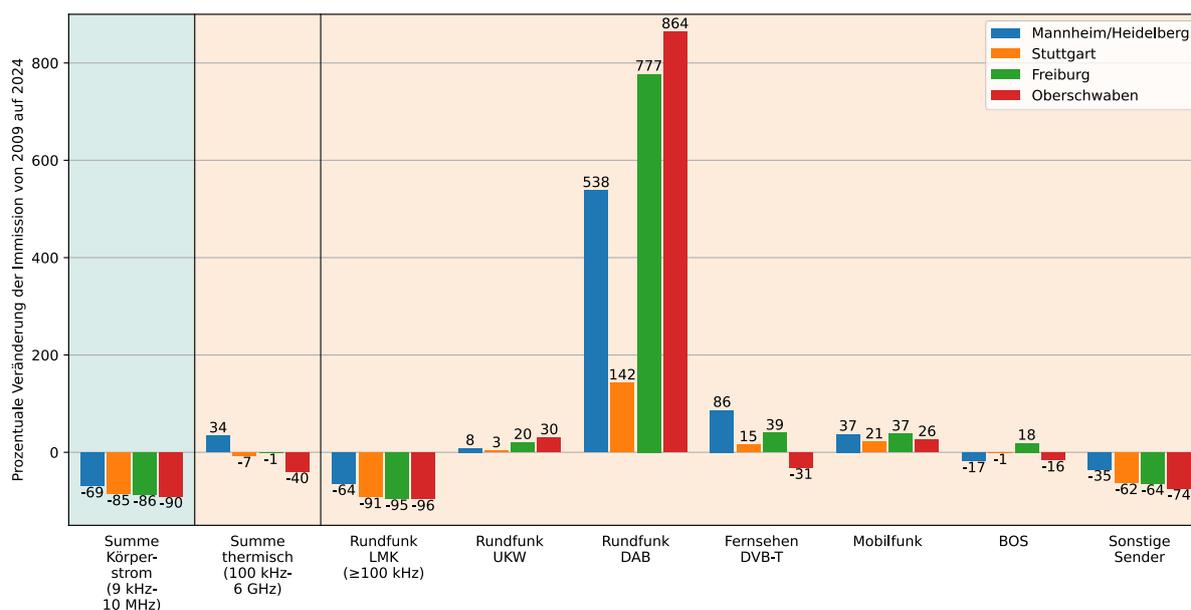


Abb. 5.14: Prozentuale Veränderung der mittleren Immissionen der Funkdienste für das gleiche Messpunktekollektiv in den vier Untersuchungsgebieten zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.

5.2 Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsgebiete

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Immissionswerte für jedes der vier Untersuchungsgebiete individuell vorgestellt. Hierbei werden die aktuellen mittleren Summenimmissionen angegeben, eventuell beobachtete Unterschiede im Vergleich zu anderen Regionen oder den Mittelwerten über alle 600 Messpunkte vorgestellt sowie Vergleiche mit den Ergebnissen früherer Kampagnen vorgenommen. Bei diesen Vergleichen mit früheren Kampagnen wurden die 499 Messpunkte ausgewertet und damit dasselbe Messpunktekollektiv zugrunde gelegt.

Beim in Abbildung 5.15 dargestellten Vergleich der mittleren Grenzwertausschöpfungen nach Regionen zeigen sich regionale Unterschiede. Diese ergeben sich beispielsweise aus den unterschiedlichen Bevölkerungsdichten der Regionen, was zu Unterschieden beim Ausbaugrad der einzelnen Funkdienste führt. Zudem ergeben sich durch unterschiedliche geographische Gegebenheiten in den Regionen (Bergland, Flachland) unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen der Funkwellen. Im Messgebiet befinden sich weitere regionale UKW- und DAB-Sender, die aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet sind.

5.2.1 Gesamtüberblick

In Abbildung 5.15 sind zunächst die beiden gesamten mittleren Summenimmissionen sowie die Verteilung der thermischen Summenimmission auf wichtige Funkdienste vergleichend für die vier Regionen bzw. die komplette Anzahl der Messpunkte dargestellt.

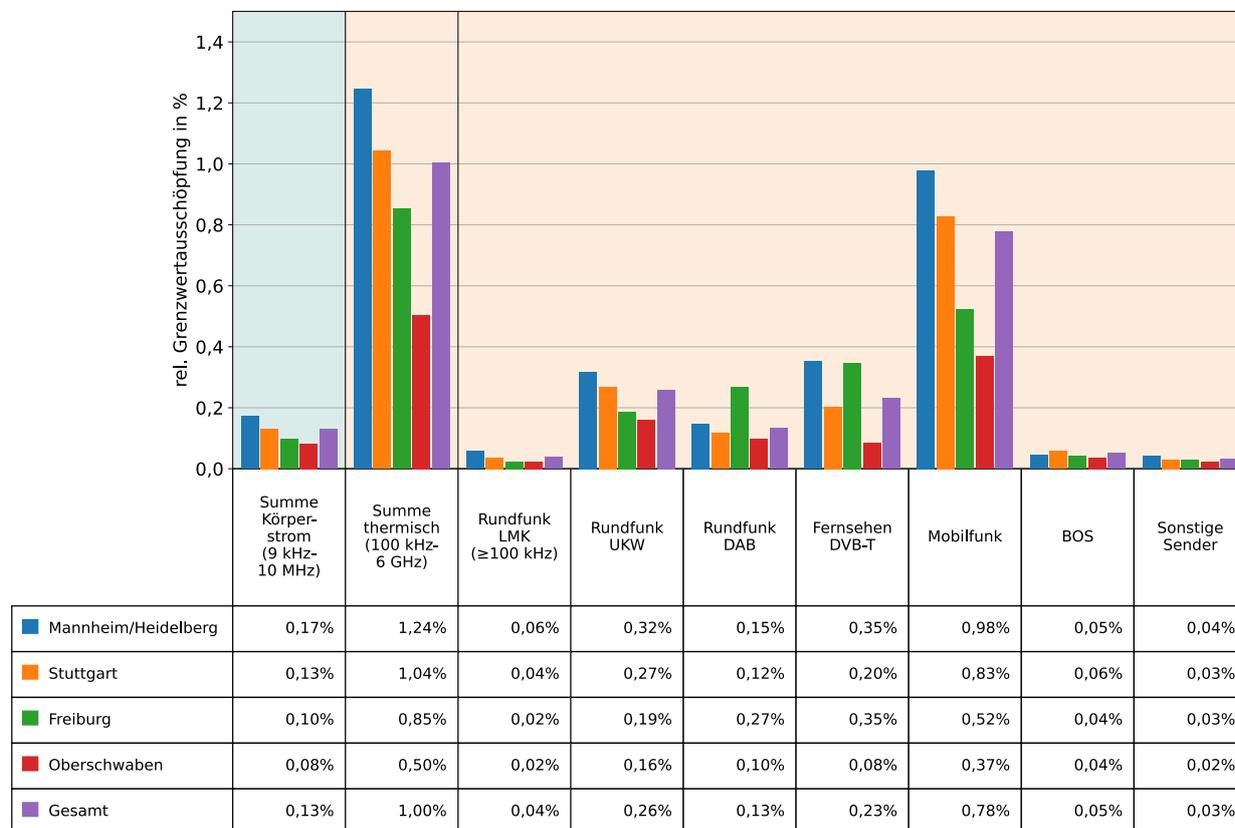


Abb. 5.15: Durchschnittliche Immissionswerte für alle 600 untersuchten Punkte, sowie aufgeschlüsselt nach Regionen.

Der in Abbildung 5.15 dargestellte Vergleich der mittleren Grenzwertausschöpfungen nach Regionen zeigt regionale Unterschiede. Im Mittel finden sich in der Region Mannheim/Heidelberg die größten, in Oberschwaben die geringsten Summenimmissionen. Die Ursache dafür ist vermutlich hauptsächlich in den unterschiedlichen Bevölkerungsdichten der Regionen zu sehen, was zu Unterschieden beim zahlenmäßigen Verhältnis der Messpunkte innerorts zu außerorts führt (siehe Abbildung 8.10). Da gemäß Abbildung 5.7 die im Regelfall im Mittel dominierende Mobilfunkimmission innerorts signifikant höher ausfällt als außerorts, ist es nicht verwunderlich, dass in Regionen mit mehr Messpunkten außerorts tendenziell geringere Immissionen zu beobachten waren.

5.2.2 Untersuchungsgebiet Stuttgart

In Abbildung 5.16 wird die räumliche Verteilung der Messpunkte im Untersuchungsgebiet Stuttgart gezeigt. Es beinhaltet neben dem urbanen Großraum Stuttgart auch das überwiegend ländlich geprägte Gebiet zwischen Stuttgart und Pforzheim. Das Gebiet Stuttgart besteht aus insgesamt 358 Messpunkten, von denen 170 Punkte (47%) innerhalb geschlossener Ortschaften liegen. Südlich der Stuttgarter Innenstadt befinden sich zwei große Funktürme (Stuttgarter Fernsehturm mit UKW und DAB, Stuttgarter Fernmeldeturm mit UKW, DAB und DVB-T).

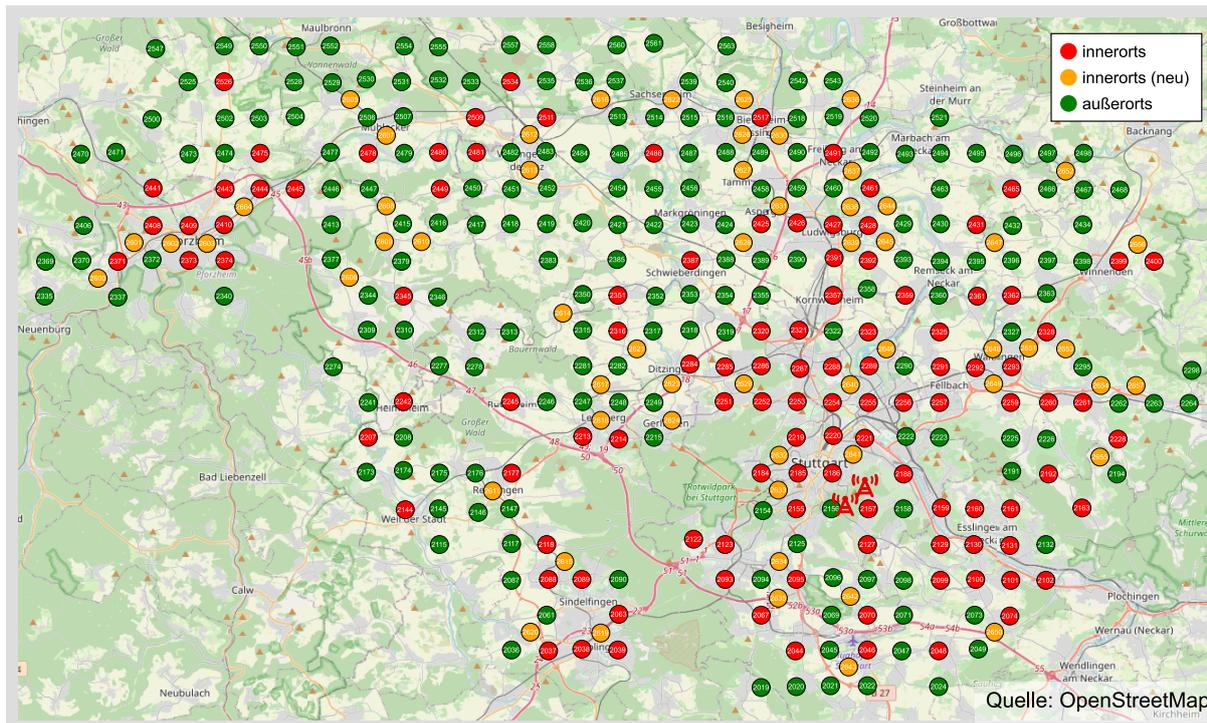


Abb. 5.16: Untersuchungsgebiet Stuttgart einschließlich Lage leistungsstarker Sendeanlagen.

5.2.2.1 Statistische Kenndaten

Die Übersicht der relativen Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte im Gebiet Stuttgart in Abbildung 5.17 und Tabelle 5.3 zeigt eine mittlere thermische Grenzwertausschöpfung von 1,04%. An einzelnen Punkten, deren Verteilung keine erkennbare Systematik zugrunde liegt, werden größere Ausschöpfungen bis maximal 10,28% erreicht. Wie später noch gezeigt wird (Abbildung 5.22 bis Abbildung 5.25), werden diese Immissionsspitzen in der Regel von im näheren Umfeld des Messpunkts vorhandenen Rundfunk- oder Mobilfunkstandorten verursacht.

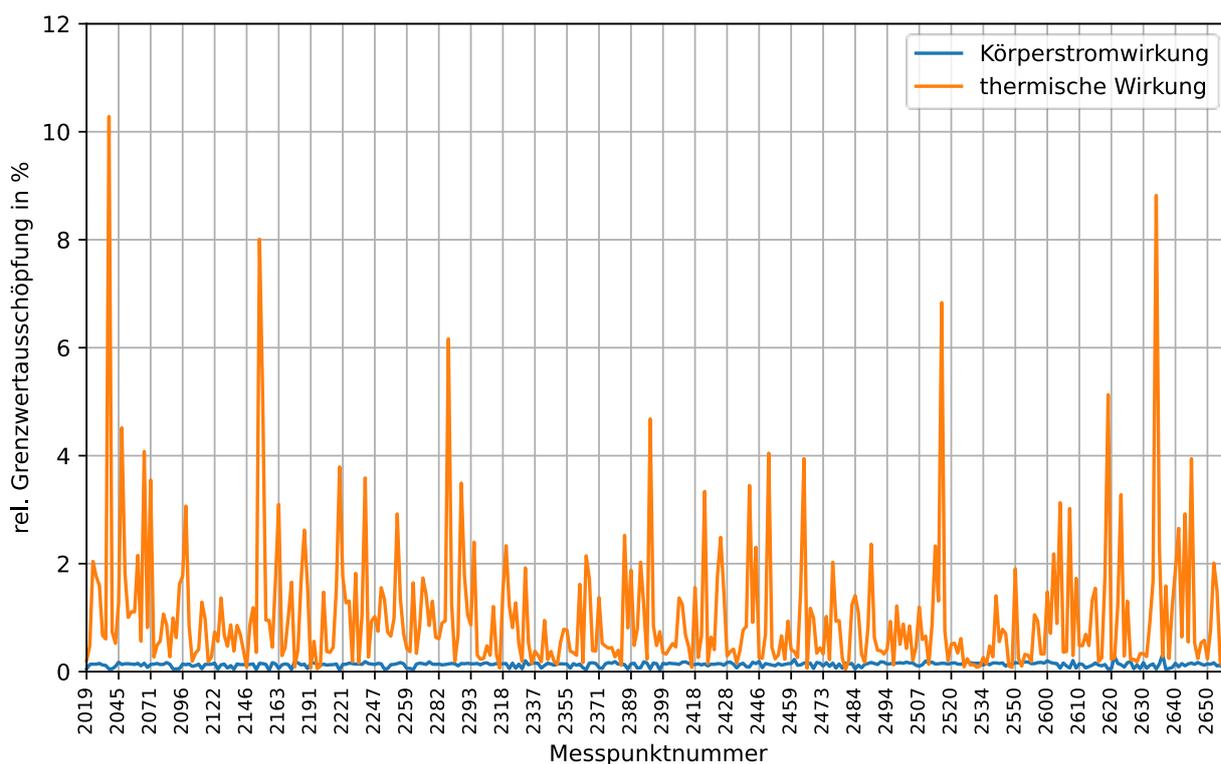


Abb. 5.17: Übersicht für das Untersuchungsgebiet Stuttgart hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).

Tab. 5.3: Statistische Kenndaten für die 358 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Stuttgart.

Kategorie	Mittelwert	Perzentile			Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		25%	50%	75%			
Summe Körperstrom	0,13	0,12	0,14	0,16	0,32	0,04	0,31
Summe thermisch	1,04	0,33	0,65	1,30	10,28	1,25	1,19
Rundfunk LMK	0,04	0,02	0,03	0,04	0,16	0,02	0,50
Rundfunk UKW	0,27	0,07	0,13	0,27	3,90	0,43	1,60
Rundfunk DAB	0,12	0,00	0,05	0,11	4,58	0,34	2,93
Fernsehen DVB-T	0,20	0,00	0,09	0,23	5,27	0,42	2,07
Mobilfunk	0,83	0,21	0,44	0,99	10,28	1,15	1,39
BOS	0,06	0,03	0,04	0,05	0,92	0,09	1,57
Sonstige Sender	0,03	0,01	0,02	0,03	0,34	0,04	1,52

Im Vergleich mit der Messkampagne des Jahres 2009, dargestellt in Abbildung 5.18, wird deutlich, dass der Anteil der Messpunkte mit Grenzwertausschöpfungen größer

als 5% sehr gering ist und unverändert bleibt (2%). Der Anteil der Messpunkte mit relativen Grenzwertausschöpfungen <1% ist leicht angestiegen (von 60% auf 68%). Der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 1 bis 2% hat leicht abgenommen (von 28% auf 21%), ebenso der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 2 bis 5% (von 10% auf 9%).

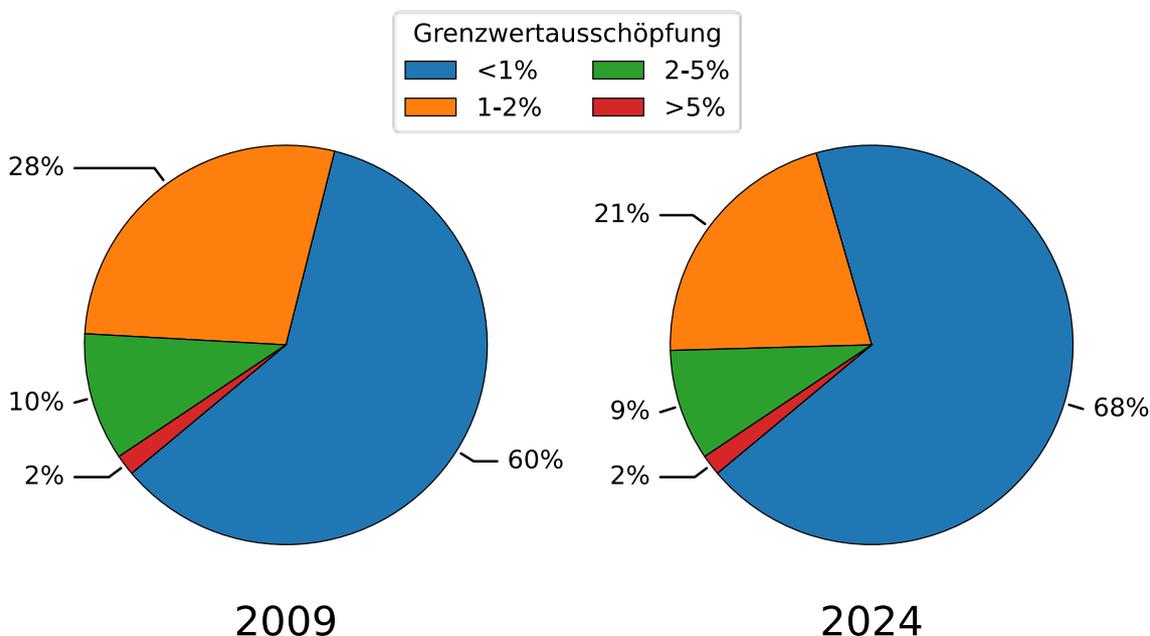


Abb. 5.18: Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Stuttgart.

Der Vergleich mit beiden früheren Messkampagnen (Abbildung 5.19) zeigt einen leichten Rückgang der thermischen Grenzwertausschöpfung (von 1,13% in 2003 auf 1,01% in 2024), der vornehmlich aus der Abschaltung der LMK-Sender resultiert. Dieser überkompensiert die vorhandene leichte Zunahme der Immissionen in den Bereichen digitaler Ton- und Fernsehrundfunk sowie im Mobilfunk.

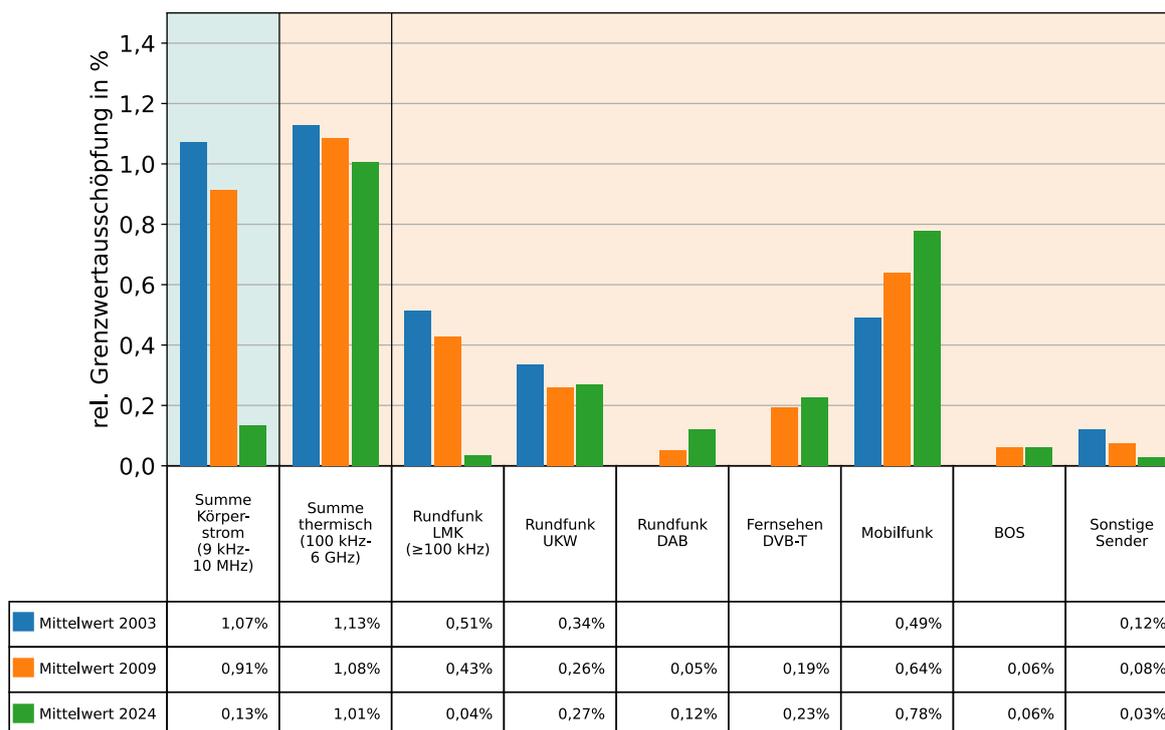


Abb. 5.19: Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Stuttgart.

5.2.2.2 Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Stuttgart

Die folgenden Kartendarstellungen zeigen die räumliche Verteilung der Immissionen. Zu beachten ist hierbei, dass für die folgenden sieben Kartendarstellungen die Farbskalierung nicht immer den gleichen Wertebereich besitzt, sondern so gewählt ist, dass Immissionsunterschiede möglichst gut sichtbar werden.

Für die Körperstromwirkung (Abbildung 5.20) ergibt sich eine relativ homogene Verteilung von Ausschöpfungen zwischen 0,1% und 0,2% im Untersuchungsgebiet, die von weiter entfernten Sendern (z.B. Zeitzeichensender Mainflingen) und den großen Wellenlängen dieser Signale herrührt, welche kaum durch kleinräumige Topografie beeinflusst werden. Wenige Ausreißer nach oben entstehen durch lokale Immissionsquellen, Ausreißer nach unten sind durch Abschattung (z.B. in engen Straßenschluchten mit umliegender Bebauung) begründet.

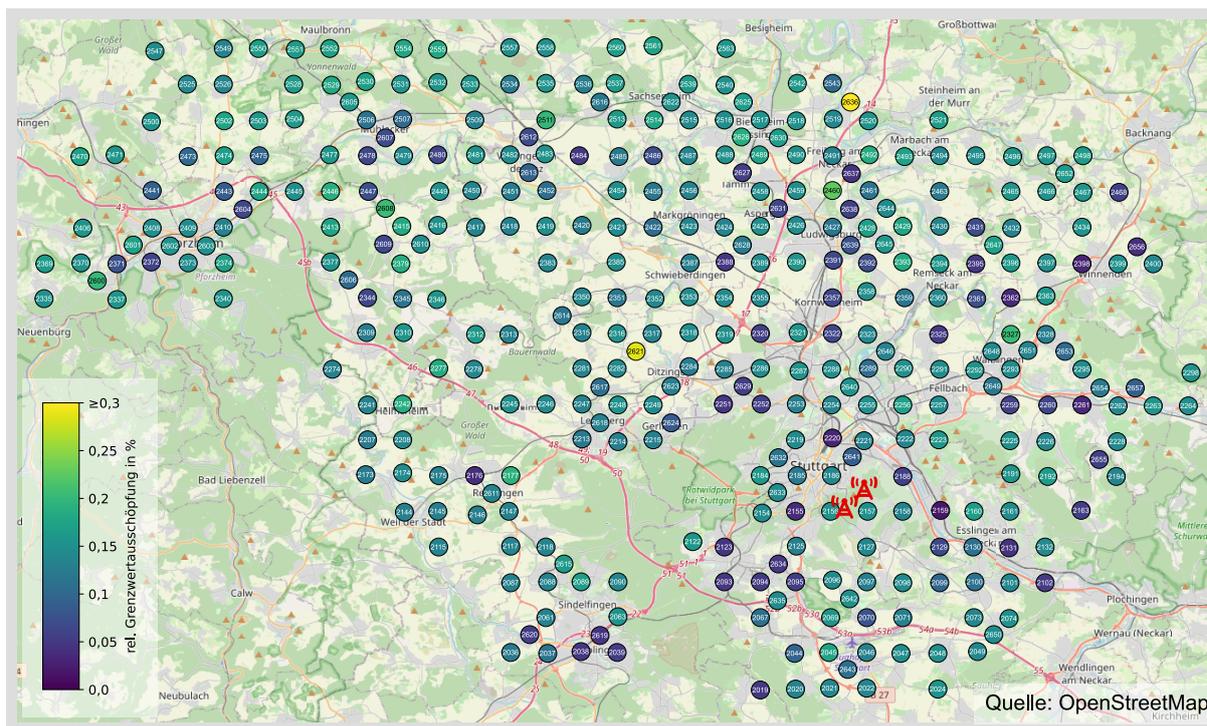


Abb. 5.20: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Summe der Körperstromwirkung.

Bei der Summenimmission bezüglich der thermischen Wirkung (Abbildung 5.21) fallen einige wenige Punkte mit höherer Grenzwertausschöpfung auf, deren Verteilung zufällig erscheint. Diese liegen zum Teil in der Nähe großer Sendeanlagen, wie beispielsweise im Rundfunk um die Funktürme in Stuttgart (Abbildungen 5.22, 5.23 und 5.24). Der andere Teil dieser Messpunkte befand sich überwiegend in unmittelbarer Nähe zu Mobilfunk-Senderstandorten, wie eine genauere Betrachtung der Messergebnisse ergab.

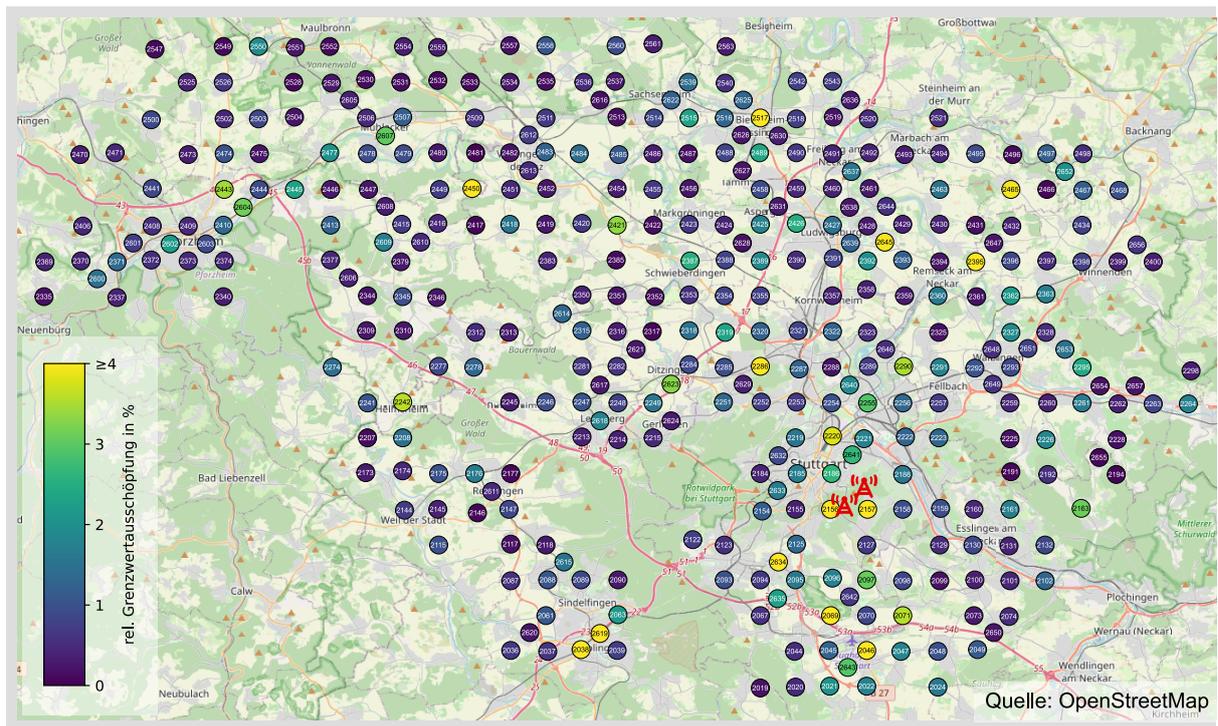


Abb. 5.21: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Summe der thermischen Wirkung.

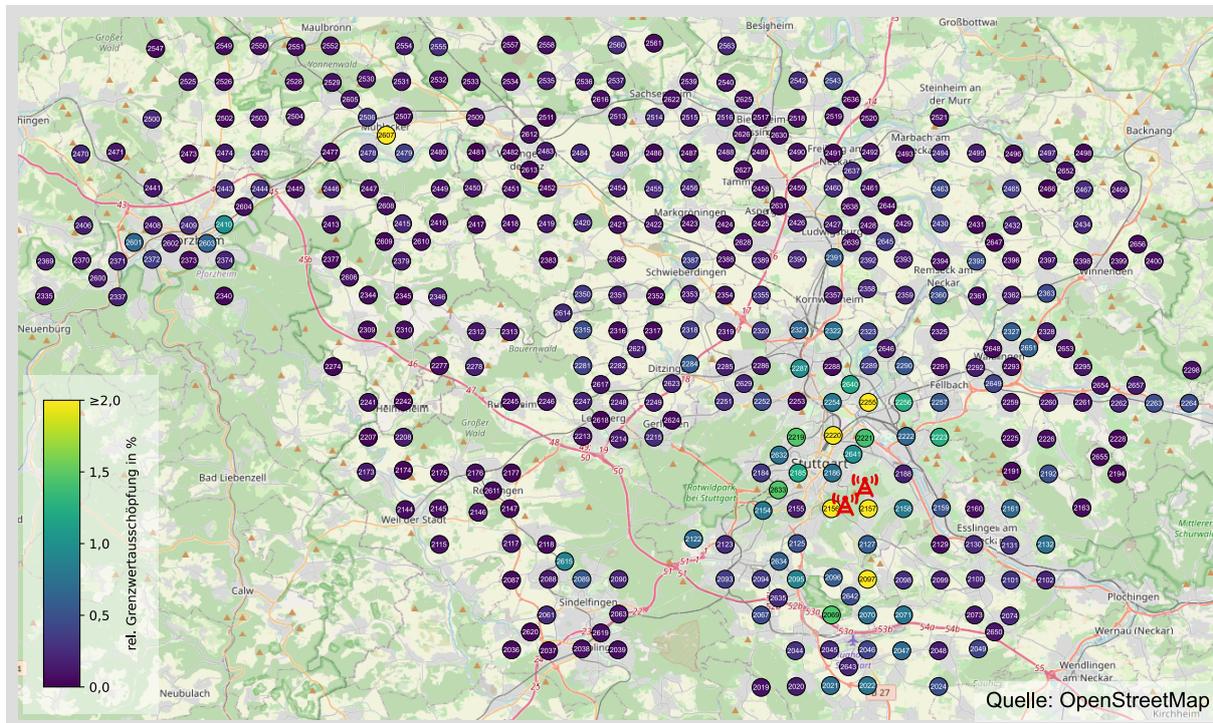


Abb. 5.22: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch UKW-Rundfunksender.

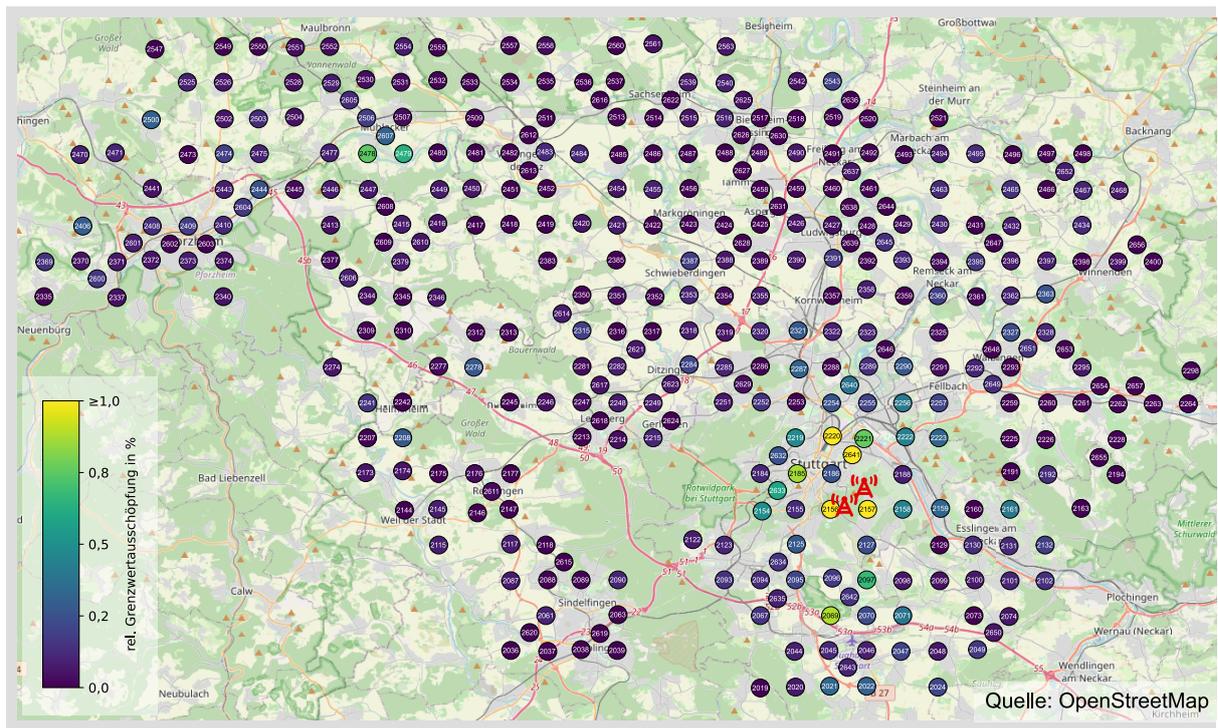


Abb. 5.23: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch DAB-Rundfunksender.

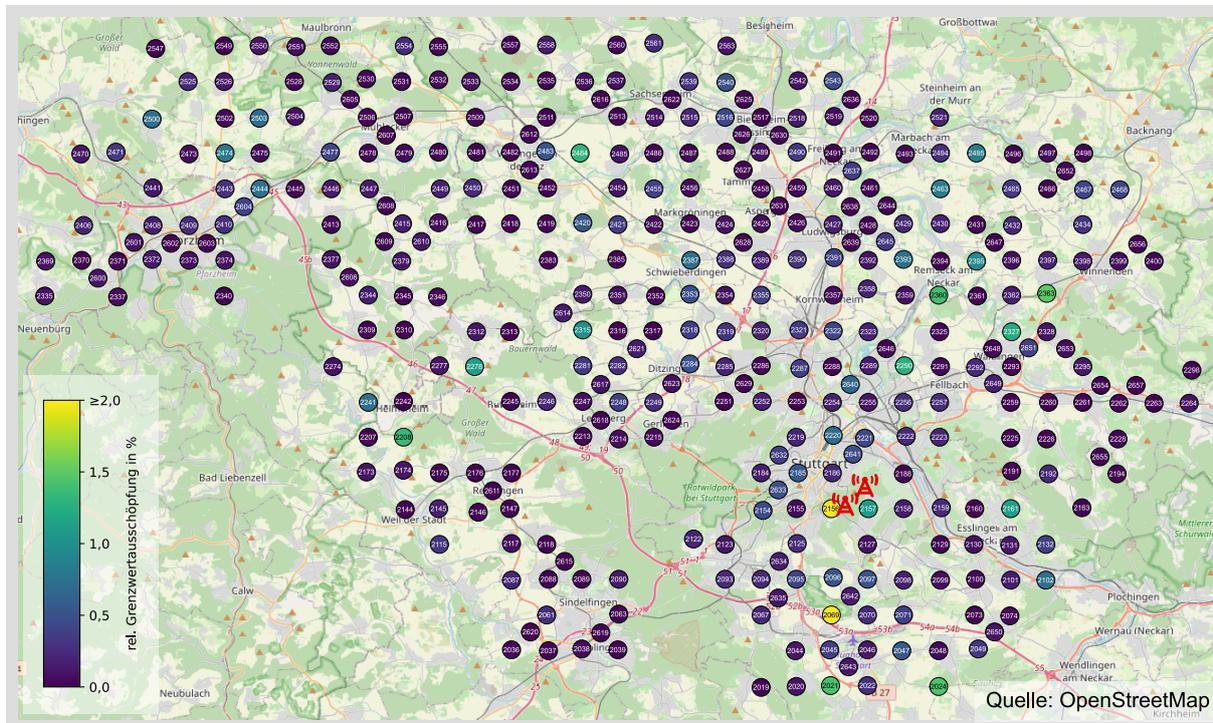


Abb. 5.24: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch DVB-T-Sender.

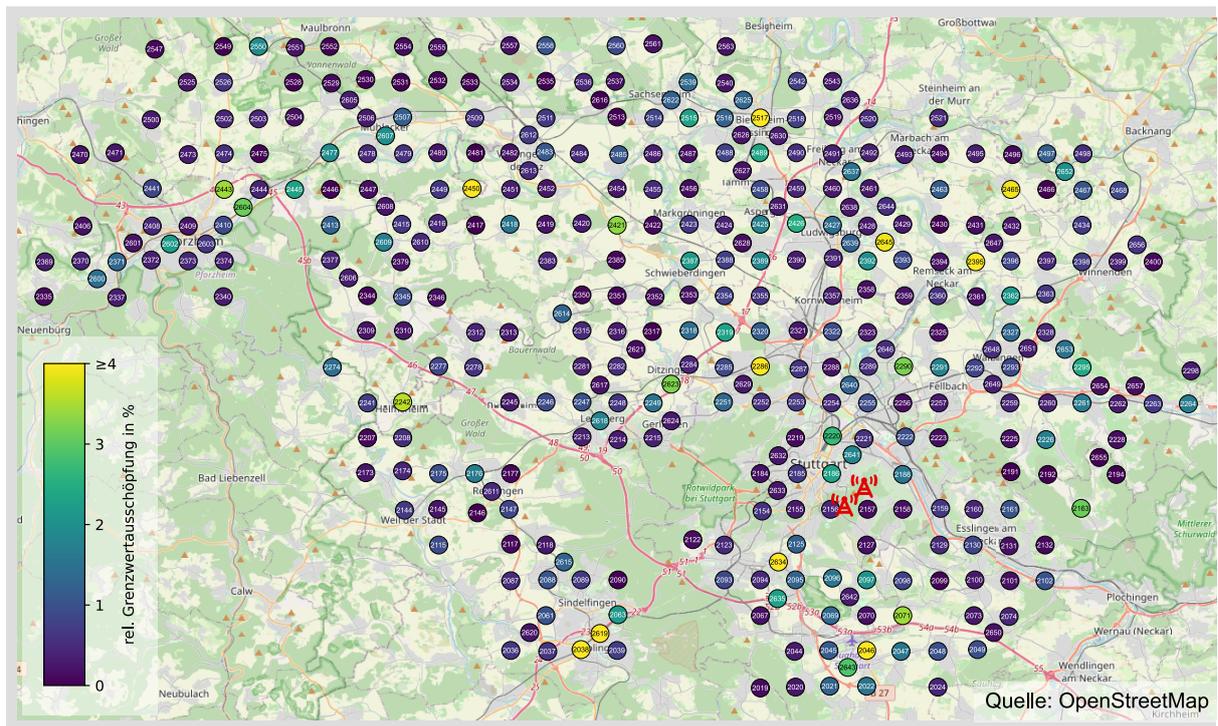


Abb. 5.25: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch Mobilfunksender.

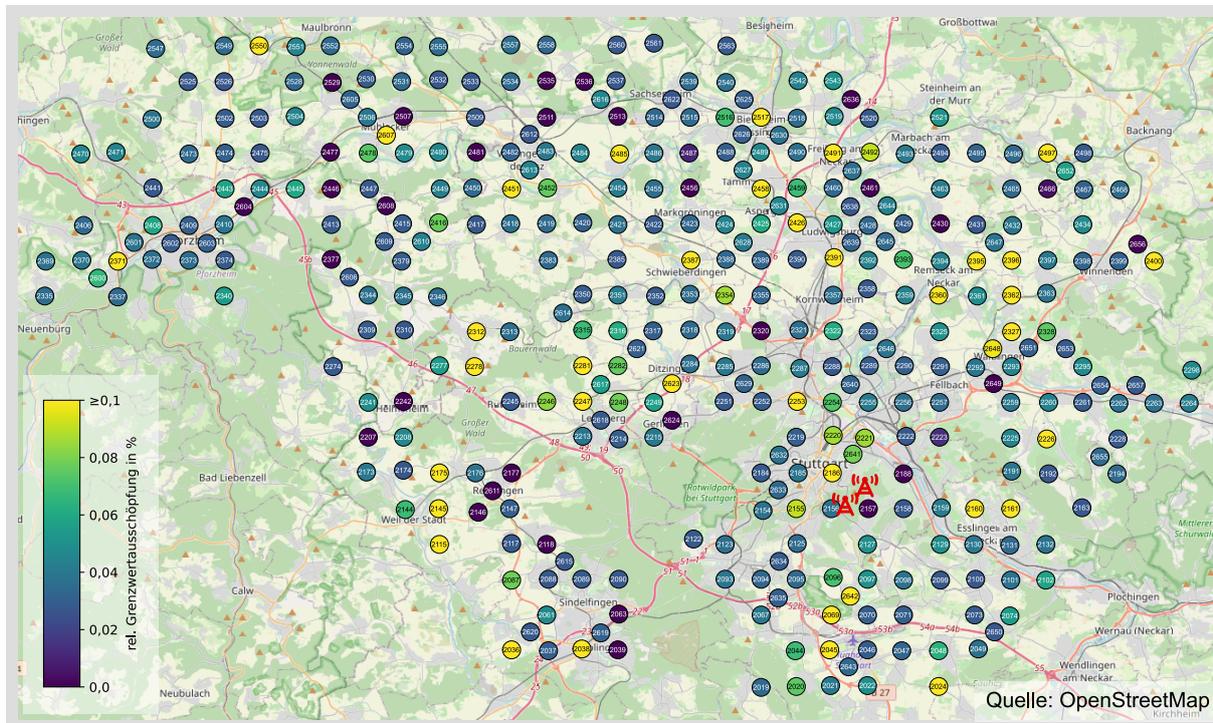


Abb. 5.26: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).

5.2.2.3 Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009

Die folgenden Differenzdarstellungen geben die Änderung bezüglich der Messkampagne des Jahres 2009 in Prozentpunkten an. Wurde im Jahr 2009 beispielsweise an einem Messpunkt eine Grenzwertausschöpfung von 2% ermittelt, die auf 3% im Jahr 2024 angestiegen ist, so ergibt sich eine positive Änderung von einem Prozentpunkt.

In der Differenzdarstellung bezüglich der Messkampagne 2009 ist beim Körperstrom vor allem die Abschaltung des Mittelwellensenders Mühlacker deutlich ersichtlic (Abbildung 5.27). Der Wegfall eines Mittelwellensenders bei Ditzingen ist ebenfalls erkennbar.

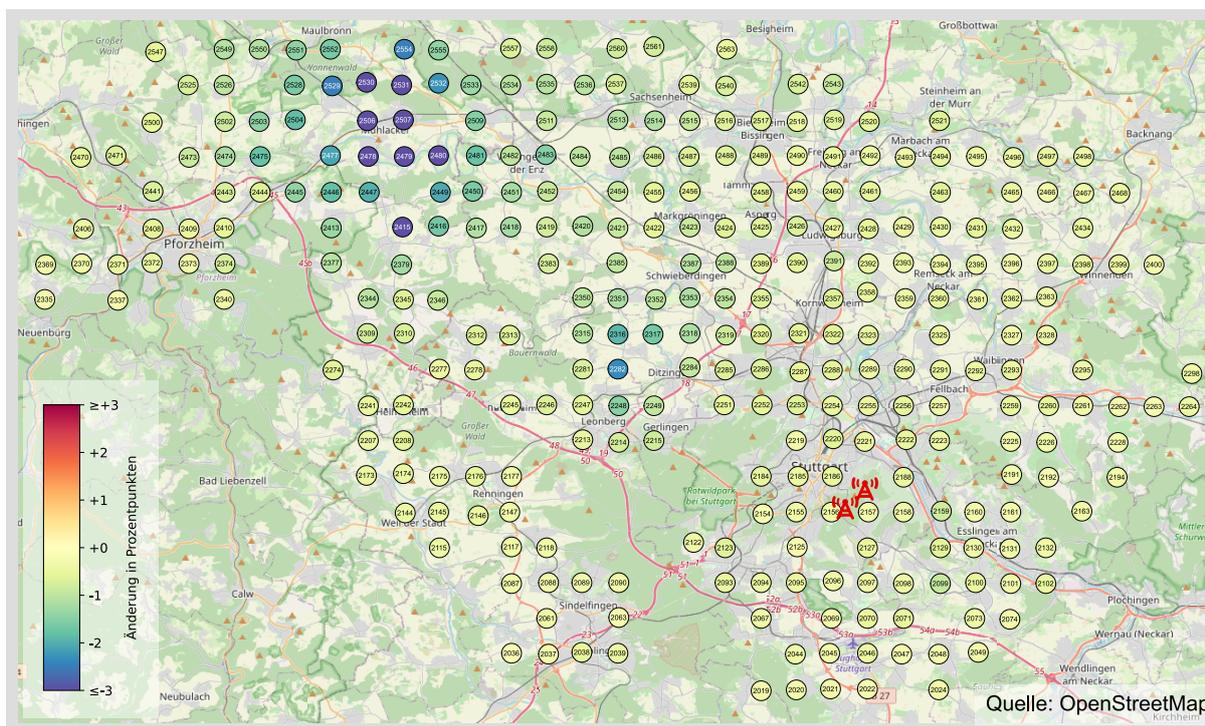


Abb. 5.27: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Körperstromwirkung.

Im Bereich der thermischen Wirkung (Abbildung 5.28) fallen – zusätzlich zur auch hier auftretenden Immissionsverringerung im Bereich Mühlacker – einige unregelmäßig verteilte Messpunkte mit gestiegenen Immissionen auf, die sich über das gesamte Messgebiet verteilen. Diese sind auf den Ausbau mancher Funknetze (z.B. DAB) und den Bau neuer Mobilfunksendemasten zurückzuführen.

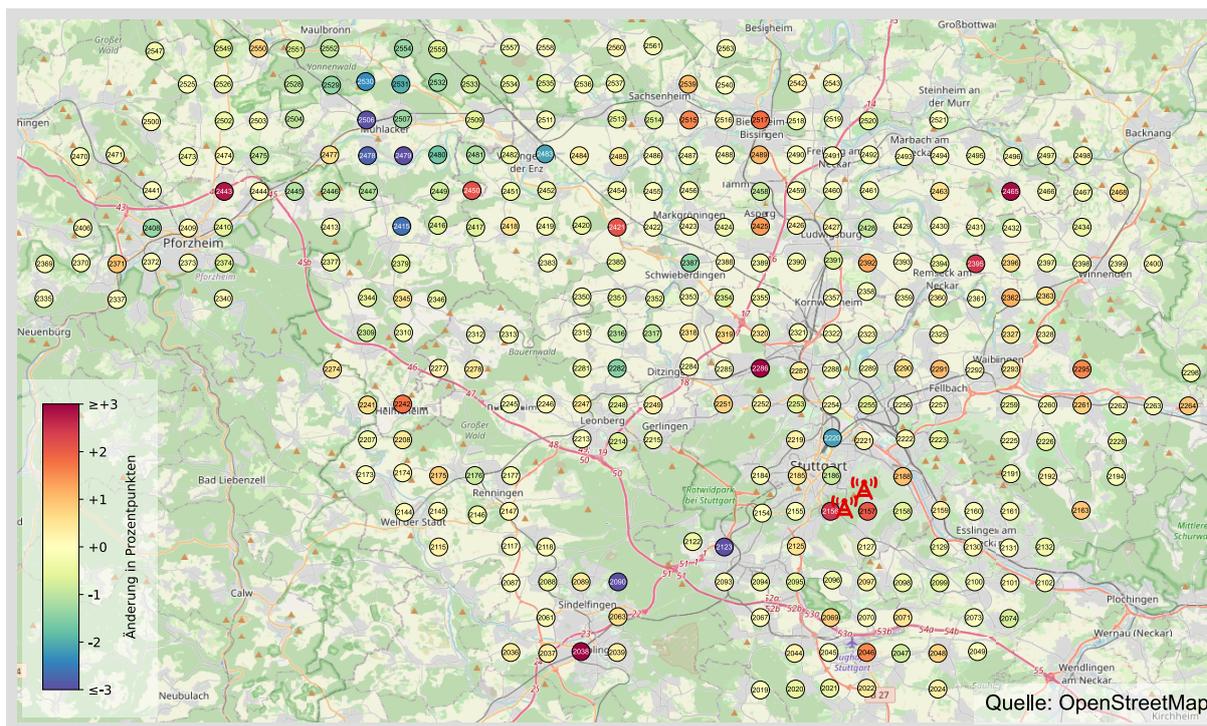


Abb. 5.28: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die thermische Wirkung.

5.2.3 Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim

In Abbildung 5.29 ist die Verteilung der Messpunkte im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim dargestellt. Es beinhaltet neben den beiden Stadtgebieten von Mannheim und Heidelberg zahlreiche angrenzende Gemeinden. Das Messgebiet besteht aus insgesamt 119 Messpunkten, von denen 78 Punkte (66%) innerhalb geschlossener Ortschaften liegen. Südöstlich der Stadt Heidelberg auf dem Königstuhl befindet sich der Funkturm Heidelberg (UKW, DAB, DVB-T). Ein weiterer leistungsstarker Senderstandort ist der Fernmeldeturm Mannheim (UKW, DVB-T), der sich im Mannheimer Stadtgebiet befindet.

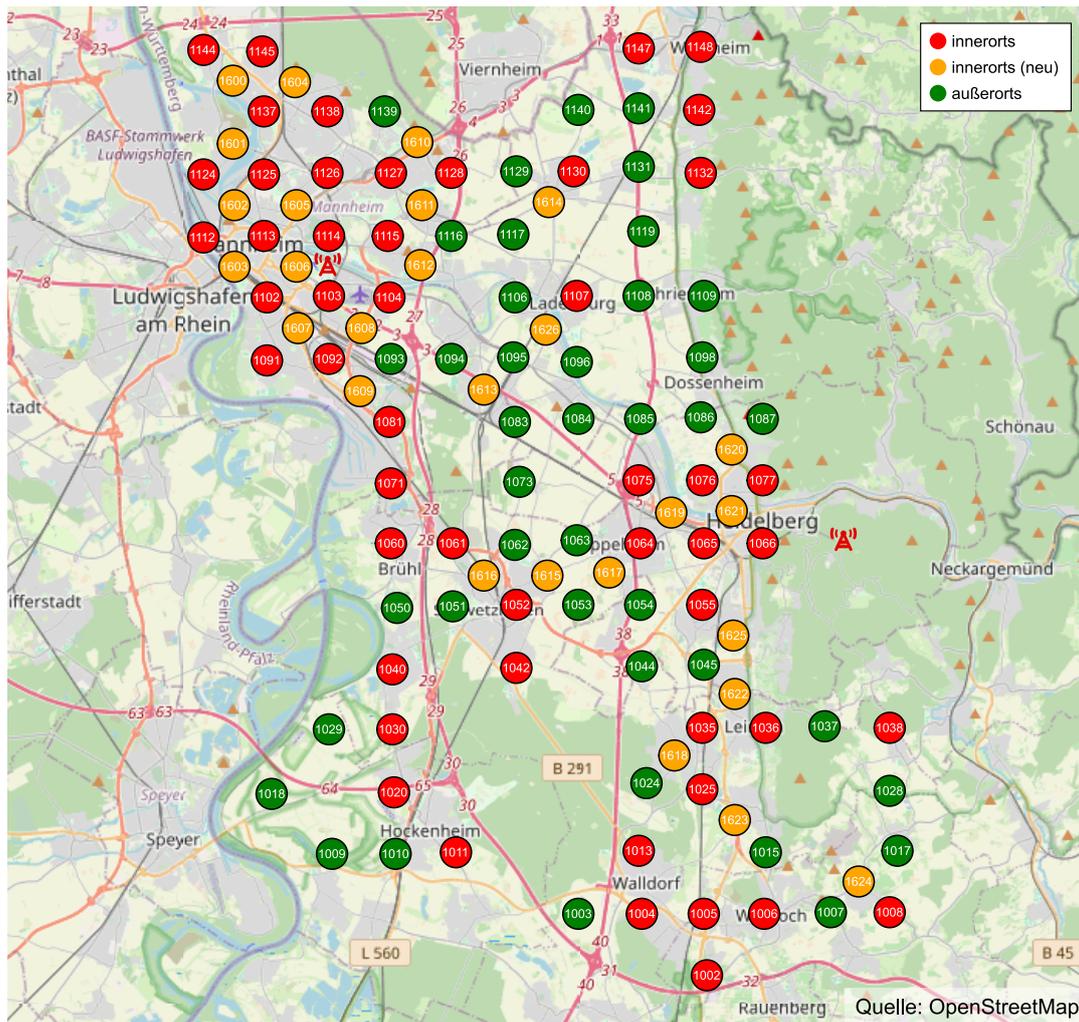


Abb. 5.29: Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim einschließlich Lage leistungsstarker Sendeanlagen.

5.2.3.1 Statistische Kenndaten

Die Übersicht der Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte im Gebiet Heidelberg/Mannheim in Abbildung 5.30 und Tabelle 5.4 zeigt eine geringe mittlere thermische Grenzwertausschöpfung von 1,24%. An einzelnen Punkten, deren Verteilung keine erkennbare Systematik zugrunde liegt, werden höhere Ausschöpfungen bis maximal 8,07% erreicht.

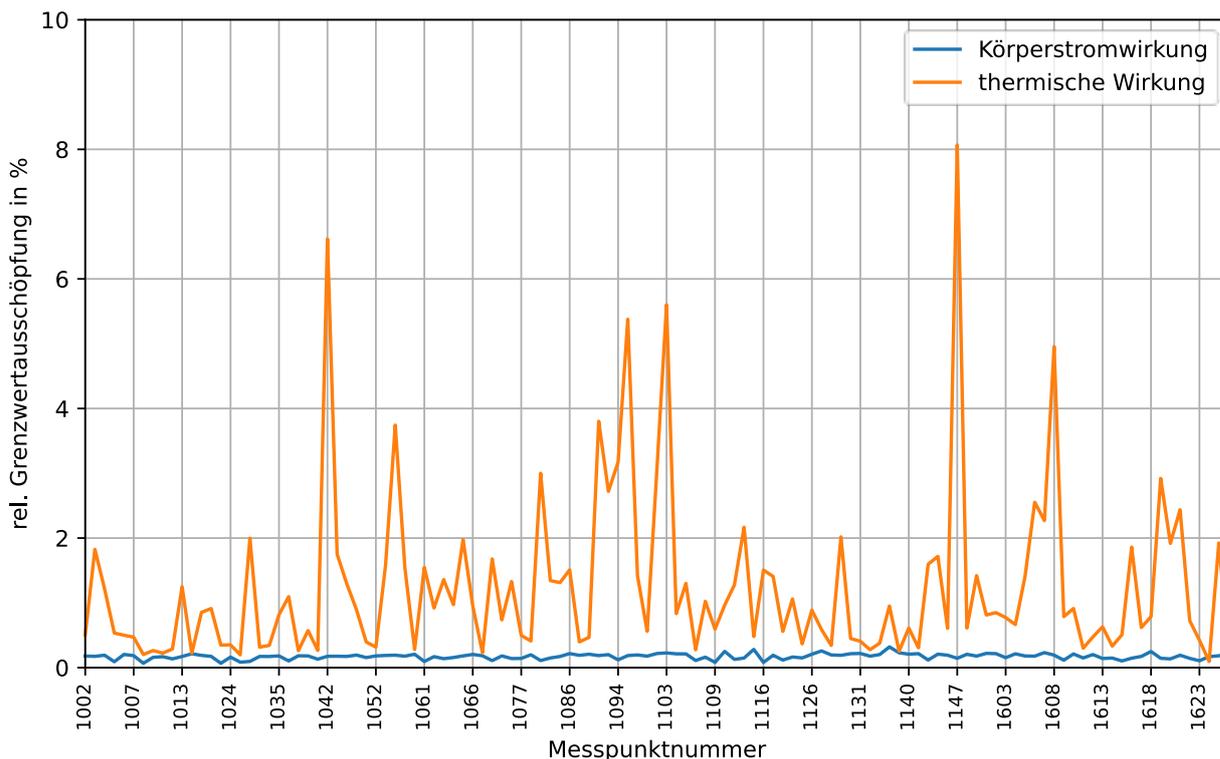


Abb. 5.30: Übersicht für das Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).

Tab. 5.4: Statistische Kenndaten für die 119 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Mannheim/Heidelberg.

Kategorie	Mittelwert	Perzentile			Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		25%	50%	75%			
Summe Körperstrom	0,17	0,15	0,18	0,20	0,32	0,04	0,25
Summe thermisch	1,24	0,42	0,83	1,52	8,07	1,31	1,05
Rundfunk LMK	0,06	0,05	0,06	0,07	0,10	0,02	0,29
Rundfunk UKW	0,32	0,12	0,18	0,35	2,01	0,34	1,07
Rundfunk DAB	0,15	0,05	0,08	0,18	0,98	0,17	1,16
Fernsehen DVB-T	0,35	0,12	0,19	0,43	2,37	0,41	1,15
Mobilfunk	0,98	0,24	0,56	1,09	8,06	1,31	1,34
BOS	0,05	0,03	0,03	0,04	0,30	0,04	0,97
Sonstige Sender	0,04	0,01	0,02	0,03	1,40	0,13	3,17

Im Vergleich mit der Messkampagne des Jahres 2009, dargestellt in Abbildung 5.31, wird deutlich, dass der Anteil der Messpunkte mit hoher Grenzwertausschöpfung (>5%)

von 0% auf 4% angestiegen, aber dennoch sehr gering ist. Der Anteil der Messpunkte mit geringen Immissionen (<1% des Grenzwerts) ist leicht gesunken (von 65% auf 59%). Der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 1-2% ist ebenfalls leicht gefallen (von 30% auf 28%). Angewachsen ist der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 2-5% (von 5% auf 9%).

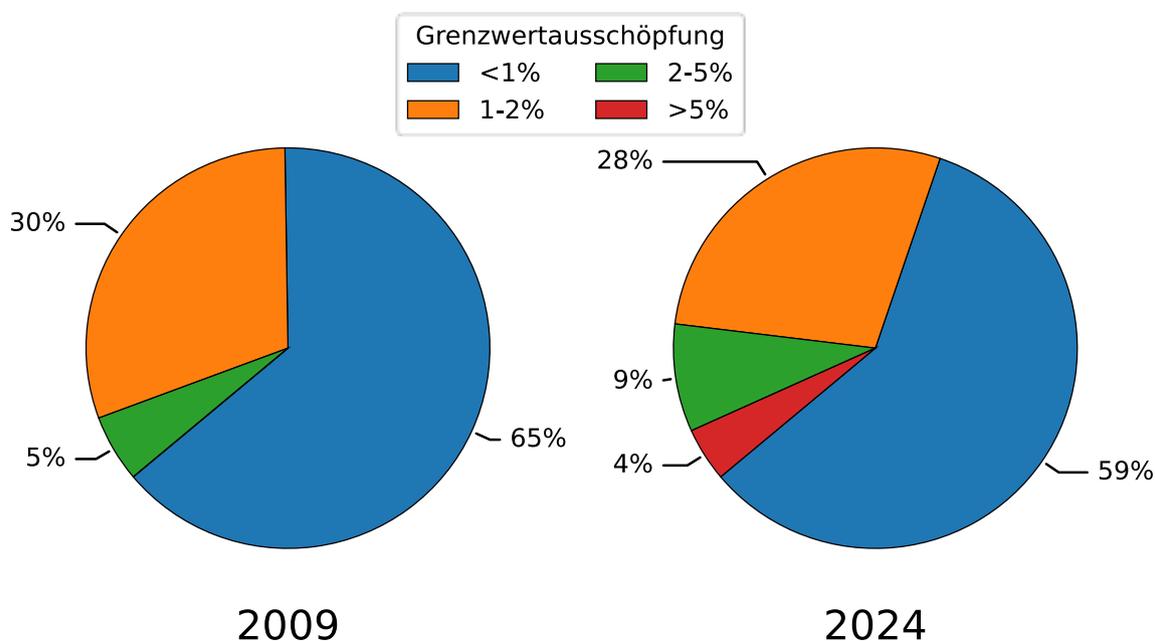


Abb. 5.31: Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim.

Der Vergleich mit früheren Messkampagnen (Abbildung 5.32) zeigt einen leichten Anstieg der thermischen Grenzwertausschöpfung (von 1,00% in 2003 auf 1,24% in 2024), der hauptsächlich aus den im Mobilfunk und im digitalen Ton- und Fernsehrundfunk (DAB, DVB-T) gestiegenen Immissionen resultiert.

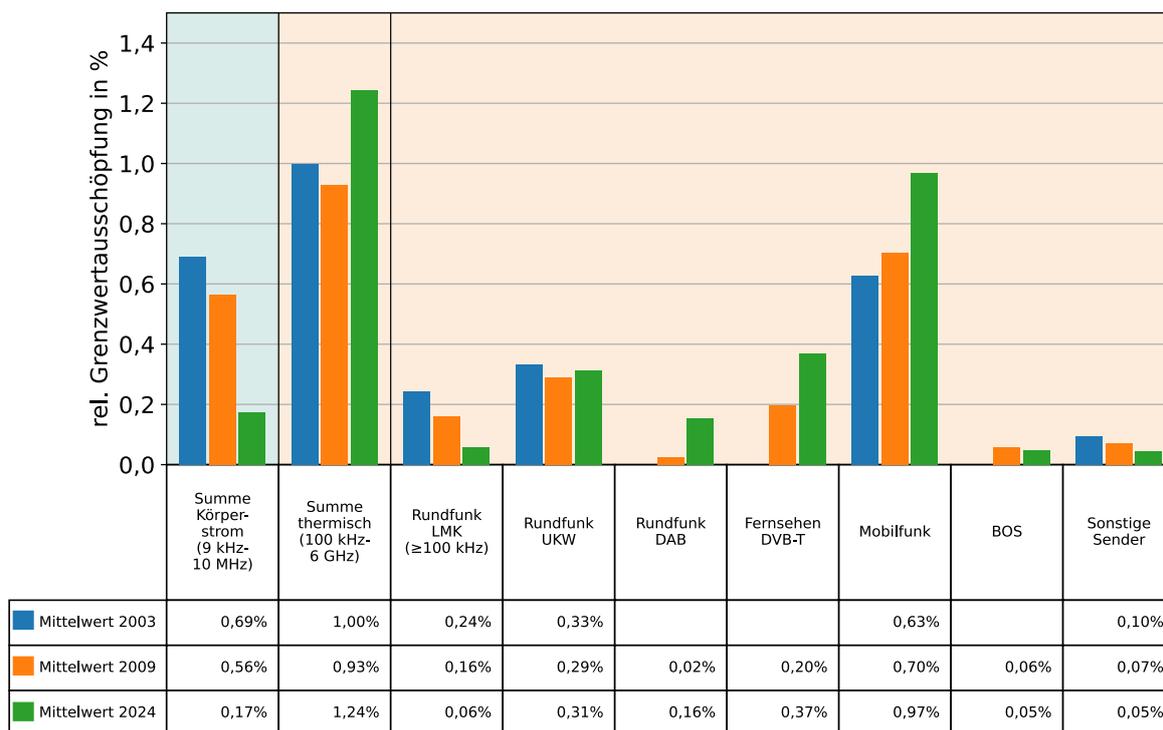


Abb. 5.32: Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim.

5.2.3.2 Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim

Die folgenden Kartendarstellungen zeigen die räumliche Verteilung der Immissionen. Für die Körperstromwirkung (Abbildung 5.33) ergibt sich eine relativ homogene Verteilung von Ausschöpfungen zwischen 0,1% und 0,2% im Untersuchungsgebiet, die sich aus weiter entfernten Sendern und der großen Wellenlängen ergibt. Wenige Ausreißer nach oben entstehen durch lokale Immissionsquellen, Ausreißer nach unten sind durch Abschattung begründet. Bei der Summe der thermischen Wirkung (Abbildung 5.34) fallen wenige Punkte mit höherer Grenzwertausschöpfung auf. Diese liegen zum Teil in der Nähe der großen Rundfunk-Sendetürme in Mannheim und Heidelberg (Abbildungen 5.35, 5.36 und 5.37). Der andere Teil dieser Messpunkte befand sich in unmittelbarer Nähe zu Mobilfunk-Basisstationen, wie in den Abbildungen 5.38 zu erkennen ist.

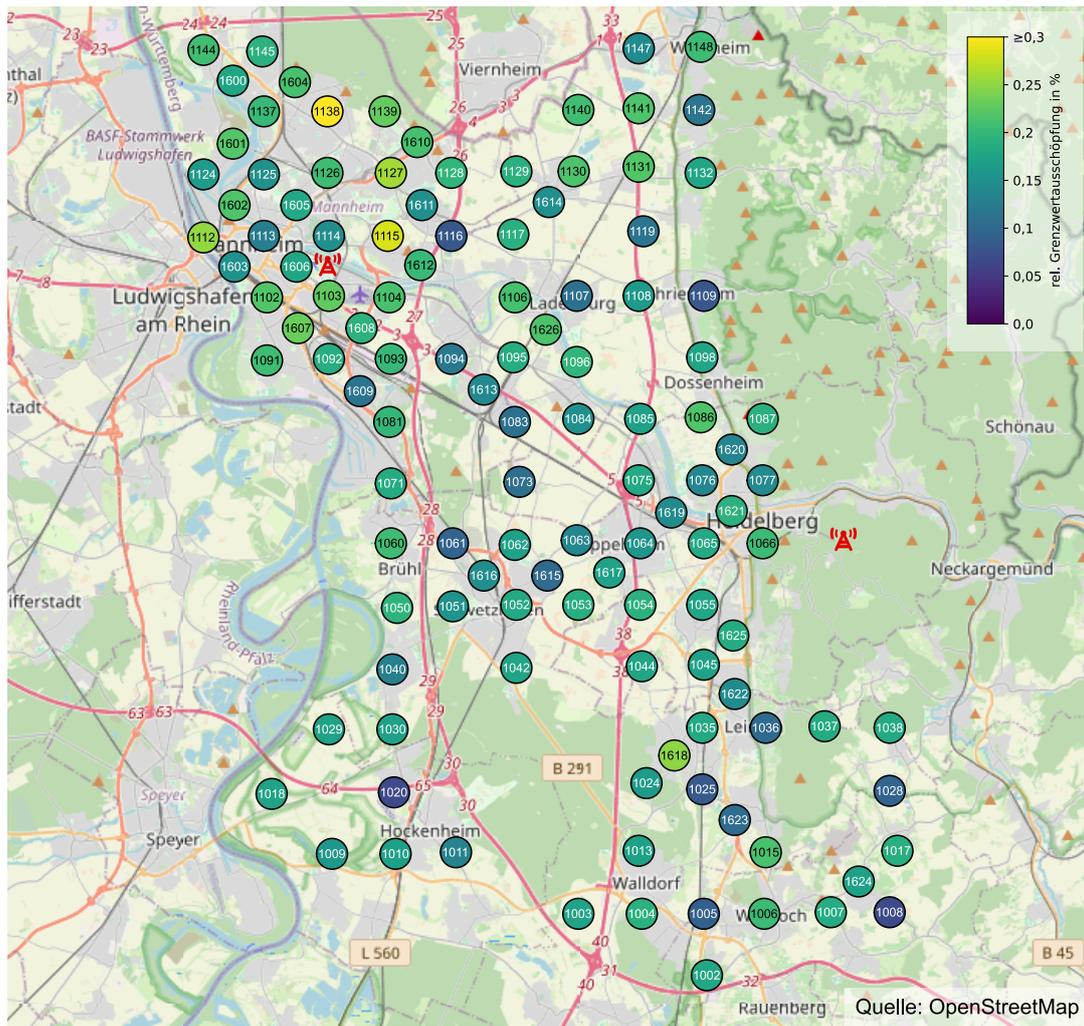


Abb. 5.33: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Summe der Körperstromwirkung.

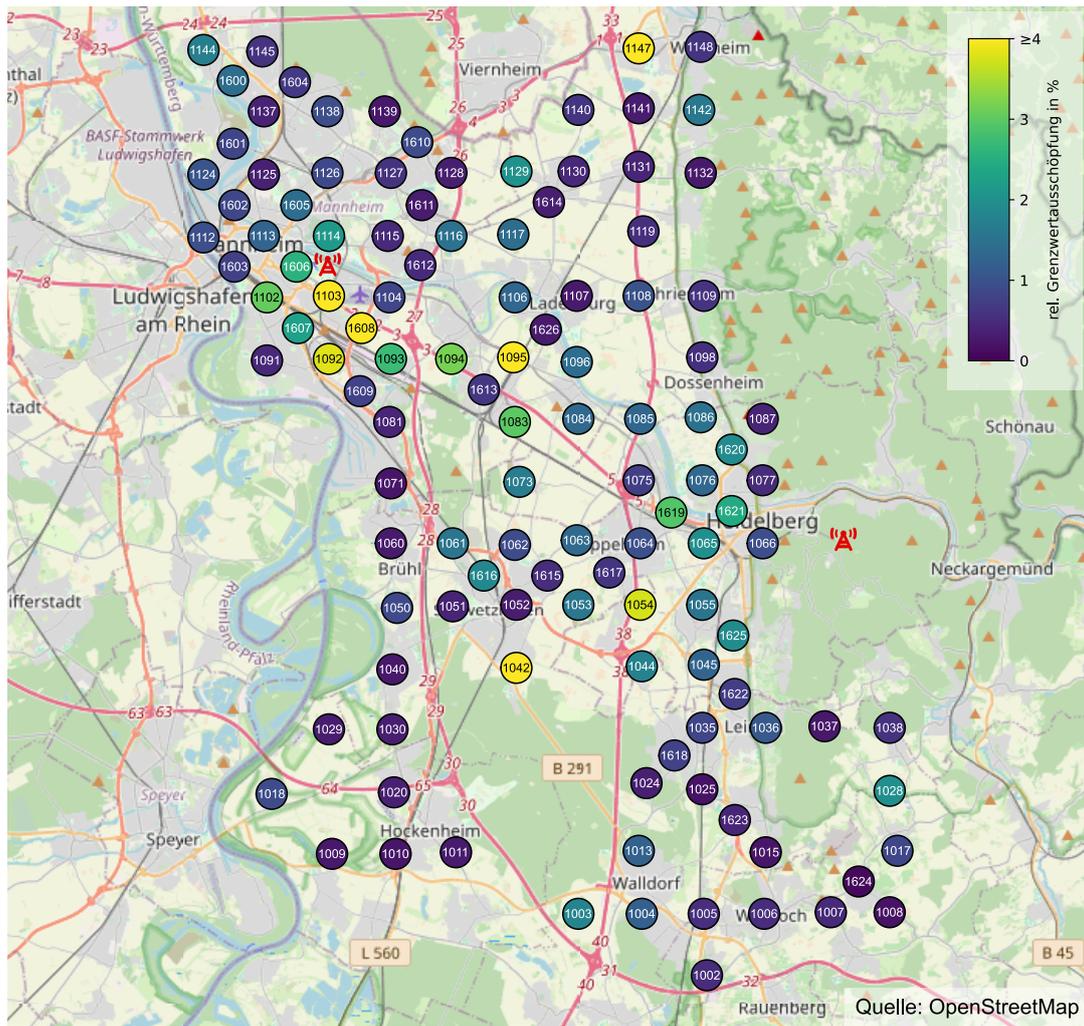


Abb. 5.34: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Summe der thermischen Wirkung.

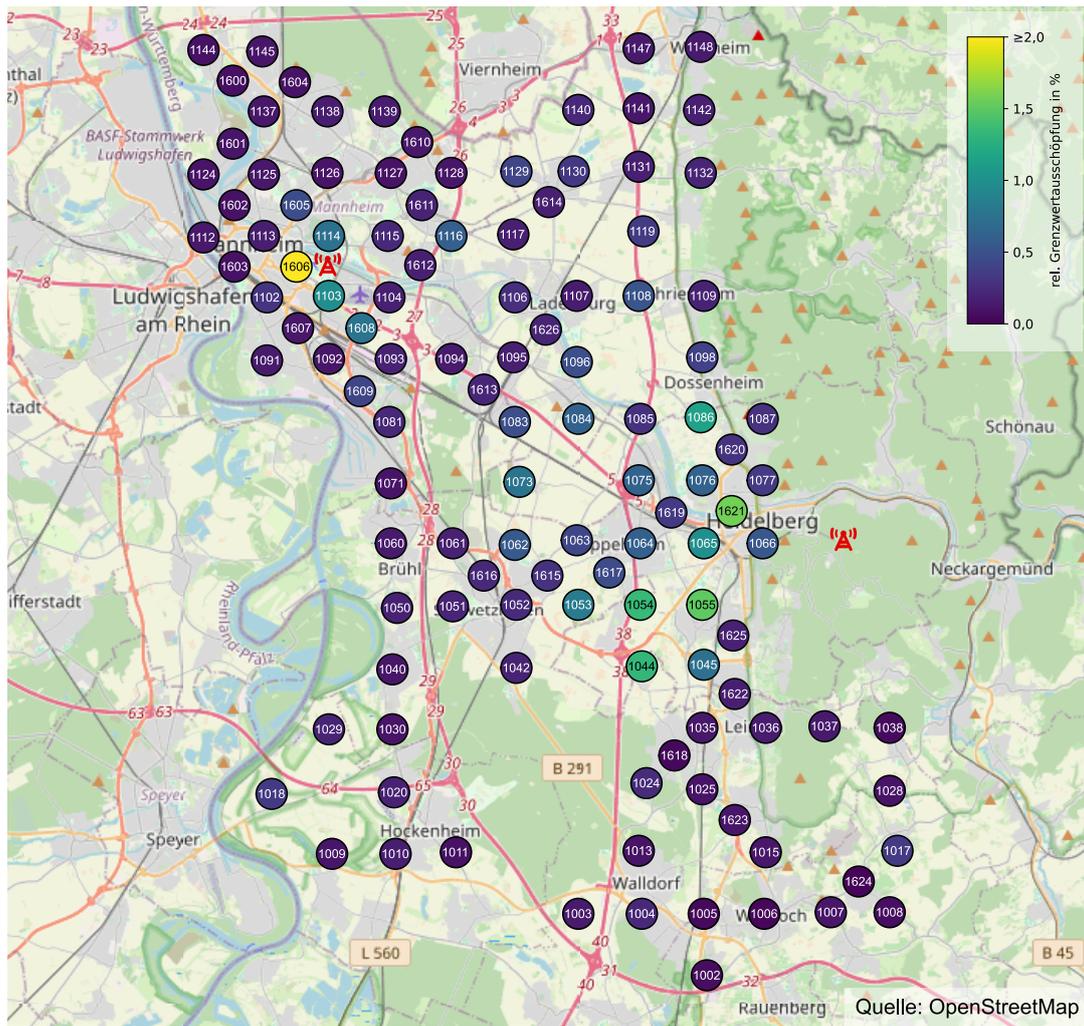


Abb. 5.35: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch UKW-Rundfunksender.

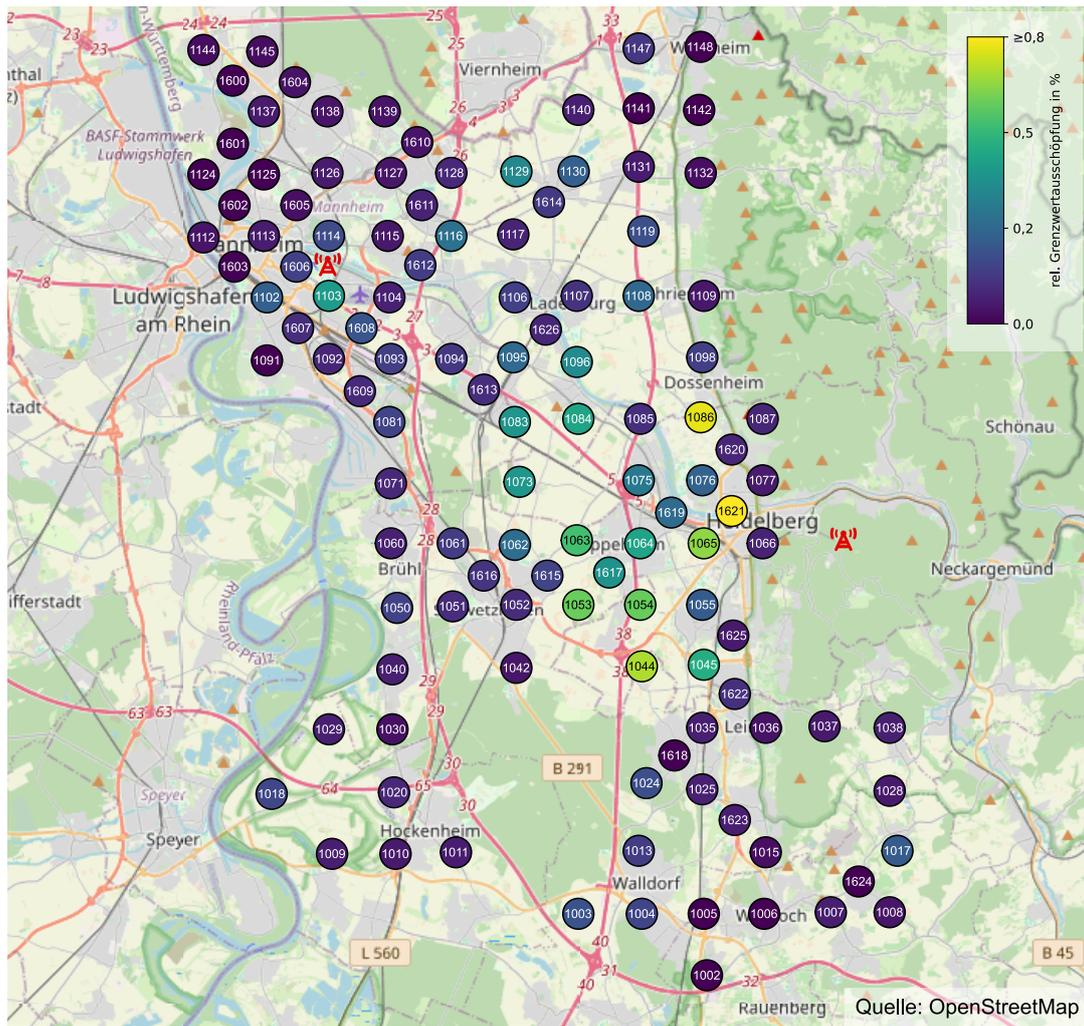


Abb. 5.36: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch DAB-Rundfunksender.

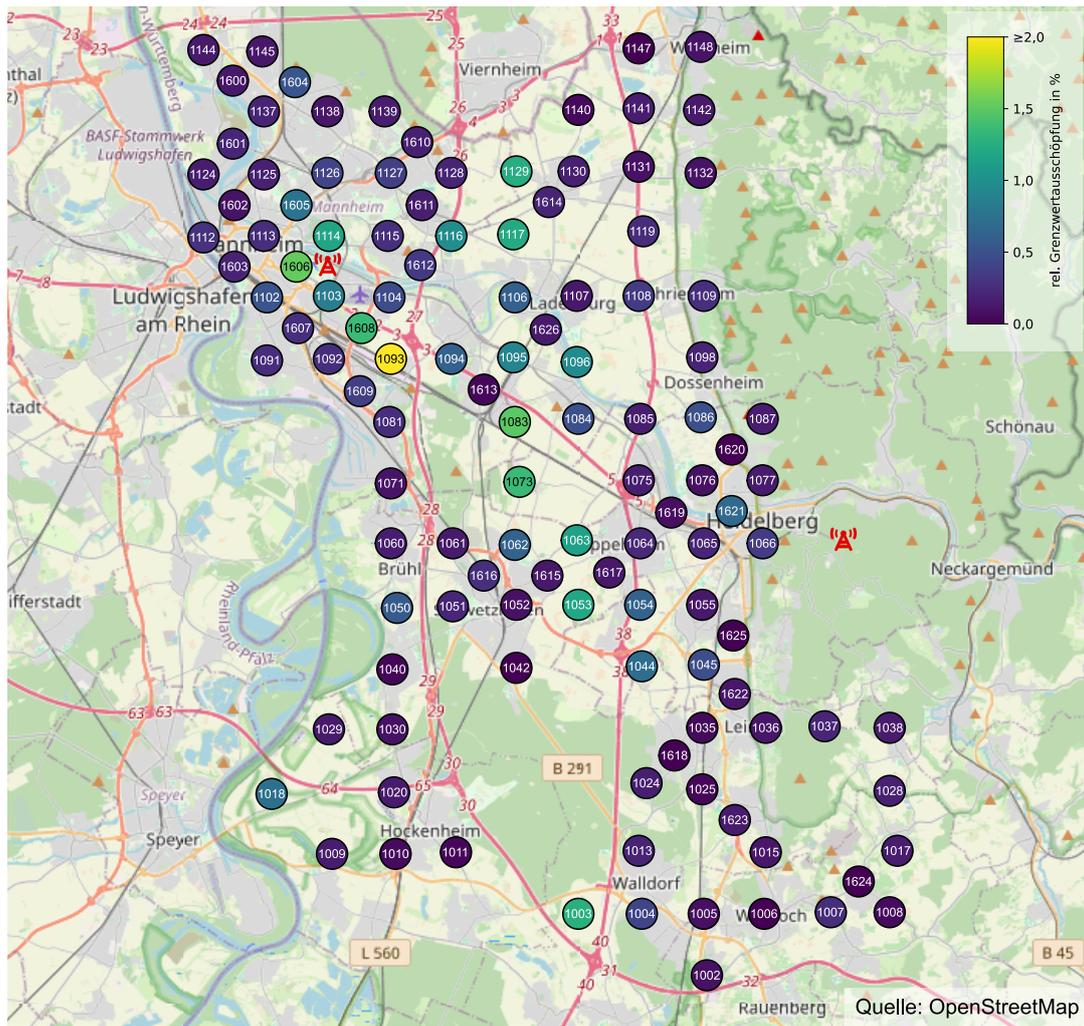


Abb. 5.37: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch DVB-T-Sender.

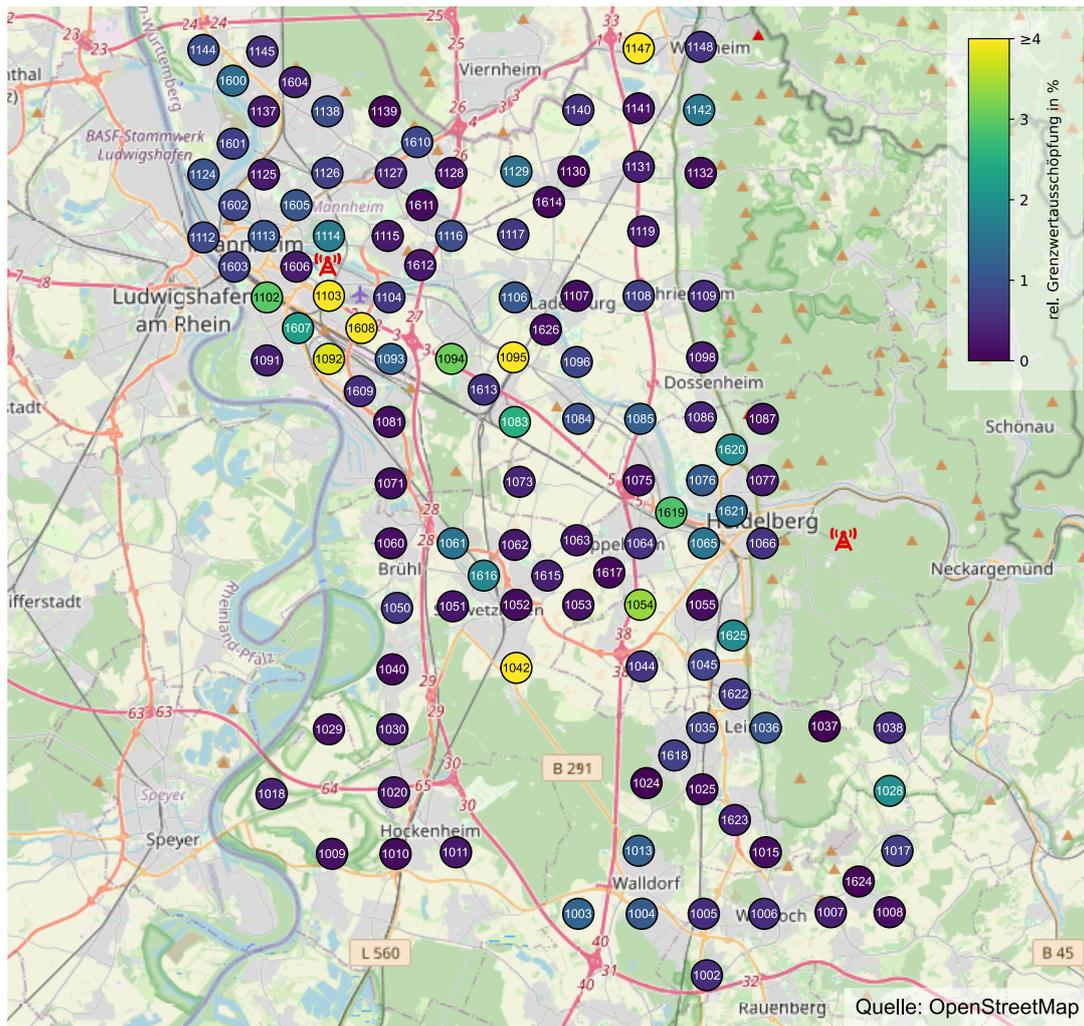


Abb. 5.38: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch Mobilfunksender.

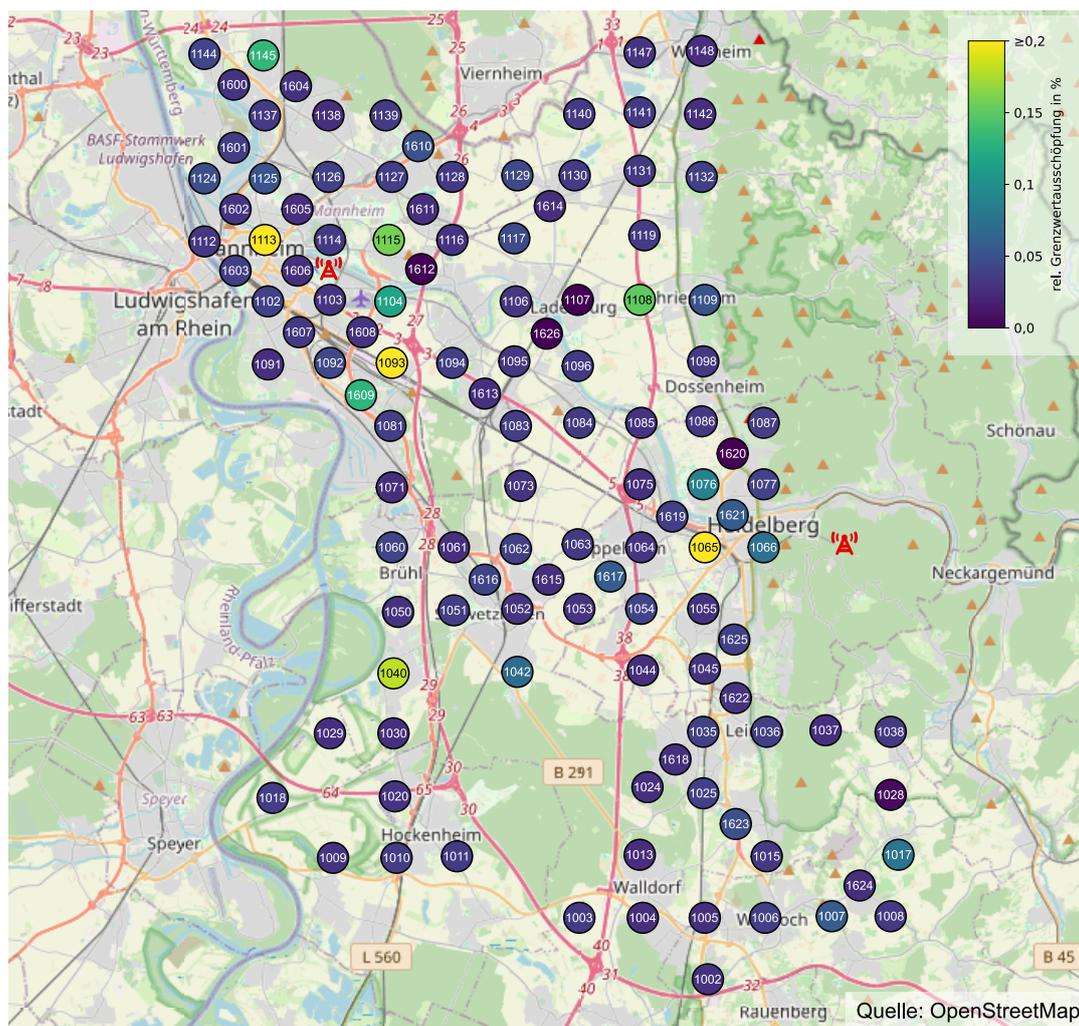


Abb. 5.39: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).

5.2.3.3 Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009

In der Differenzdarstellung bezüglich der Messkampagne 2009 ist beim Körperstrom vor allem die Abschaltung des Mittelwellensenders Heidelberg-Wieblingen ersichtlich (Abbildung 5.40). Im Bereich der thermischen Wirkung (Abbildung 5.41) fallen einige Messpunkte mit gestiegenen Immissionen auf, die sich über das gesamte Messgebiet verteilen. Diese sind auf den Ausbau der einzelnen Funkdienste und den Bau neuer Funkmasten zurückzuführen.

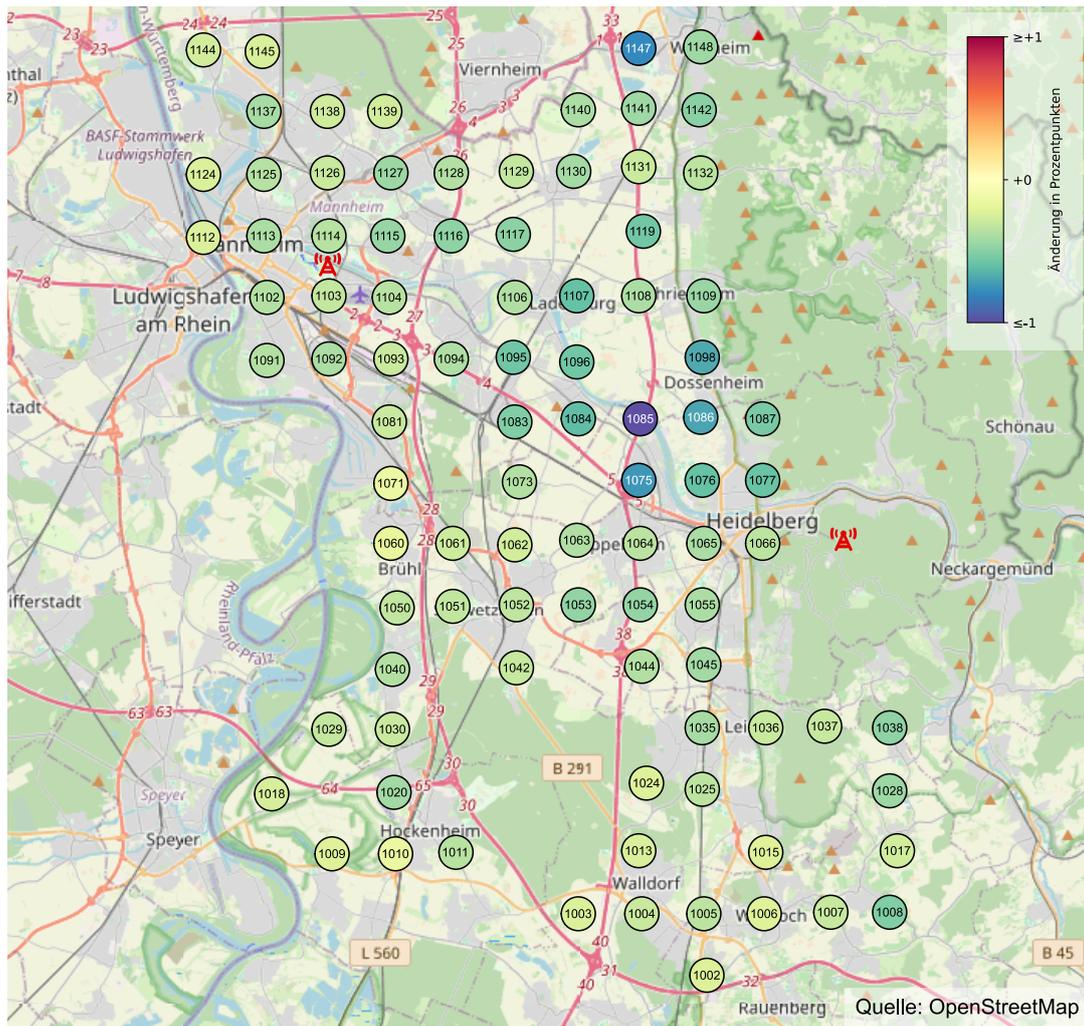


Abb. 5.40: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Körperstromwirkung.

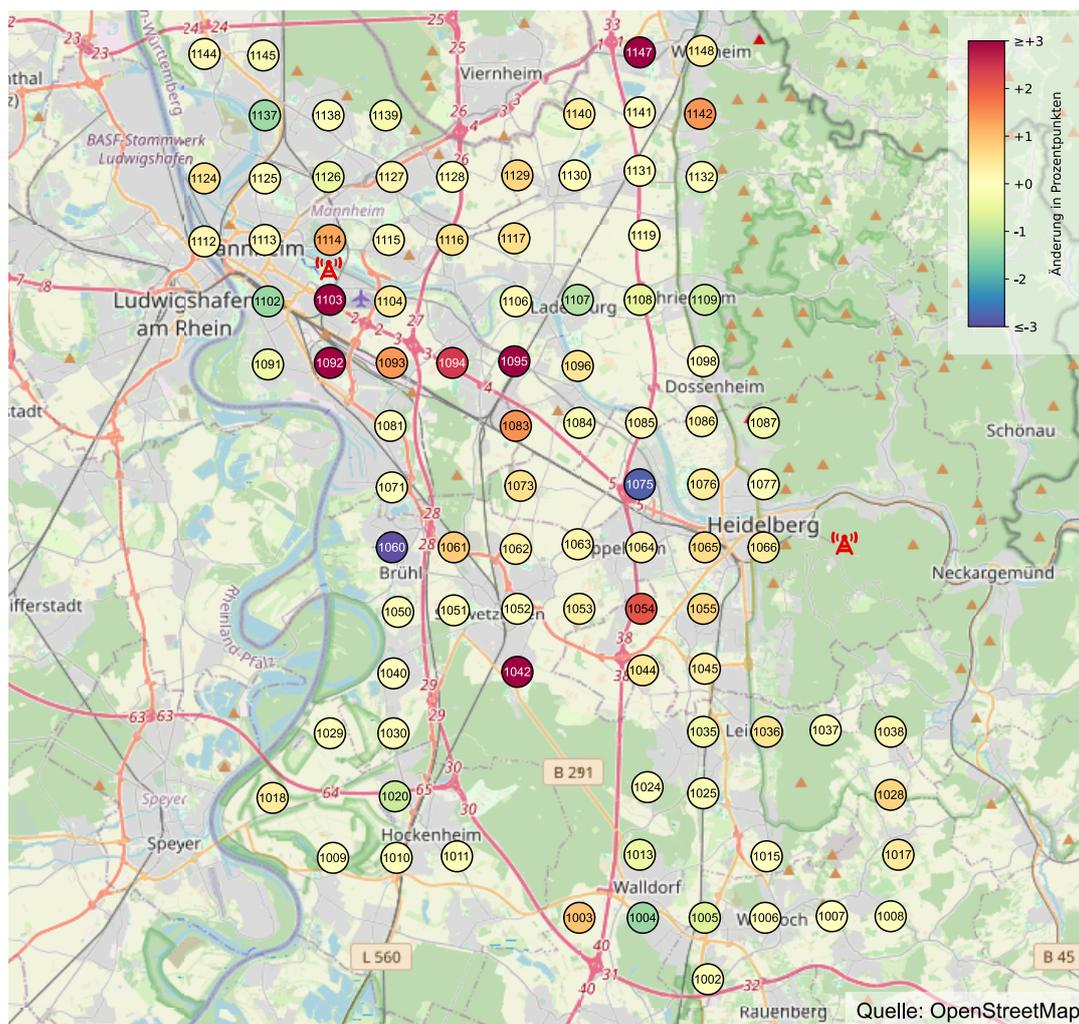


Abb. 5.41: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die thermische Wirkung.

5.2.4 Untersuchungsgebiet Freiburg

In Abbildung 5.42 ist die Verteilung der Messpunkte im Untersuchungsgebiet Freiburg dargestellt. Es beinhaltet neben dem Stadtgebiet von Freiburg das ländlich geprägte Umland. Das Messgebiet besteht aus insgesamt 54 Messpunkten, von denen 24 Punkte (44%) innerhalb geschlossener Ortschaften liegen. Südöstlich der Stadt Heidelberg auf dem Königstuhl befindet sich der Fernsehturm Heidelberg (UKW, DAB, DVB-T). Innerhalb dieser Messregion befinden sich aktuell keine leistungsstarken Sendeanlagen.

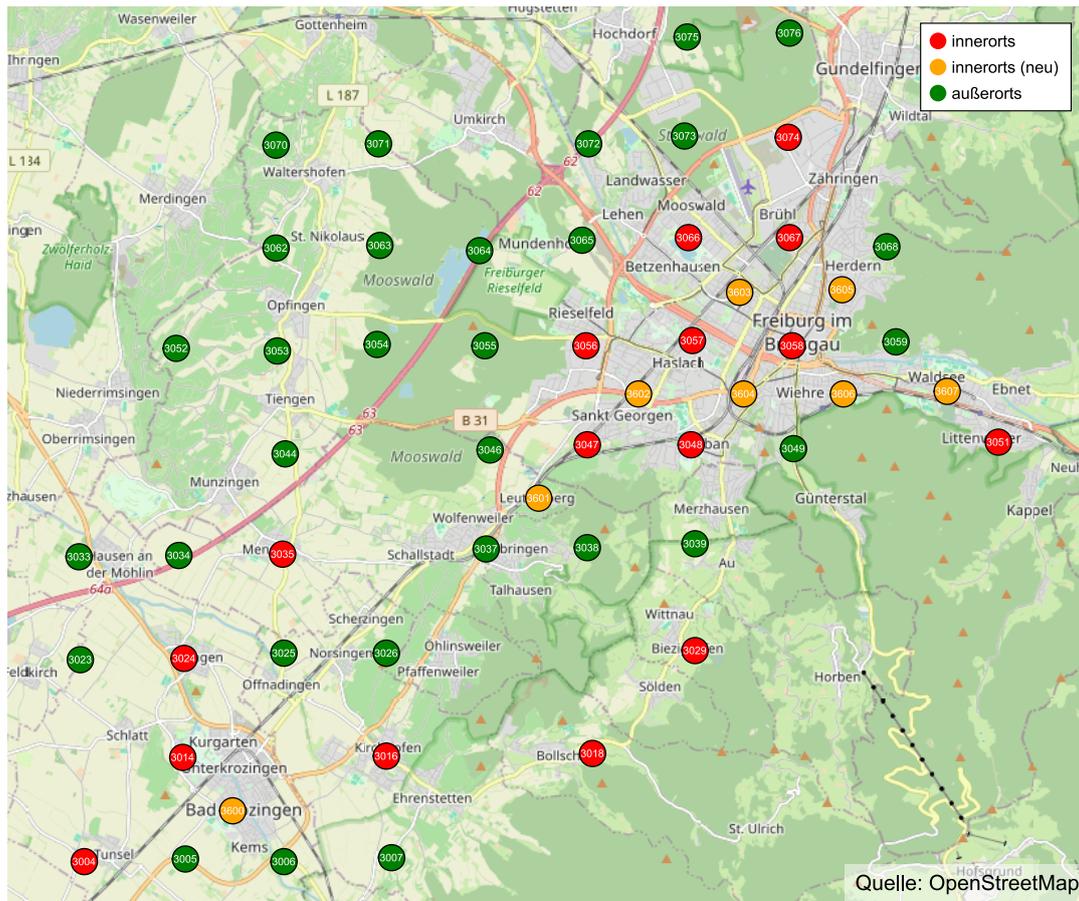


Abb. 5.42: Untersuchungsgebiet Freiburg.

5.2.4.1 Statistische Kenndaten

Die Übersicht der Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte im Gebiet Freiburg in Abbildung 5.43 und Tabelle 5.5 zeigt eine geringe mittlere thermische Grenzwertausschöpfung von 0,85%. An einzelnen Punkten, deren Verteilung keine erkennbare Systematik zugrunde liegt, werden etwas höhere Ausschöpfungen bis maximal 3,55% erreicht.

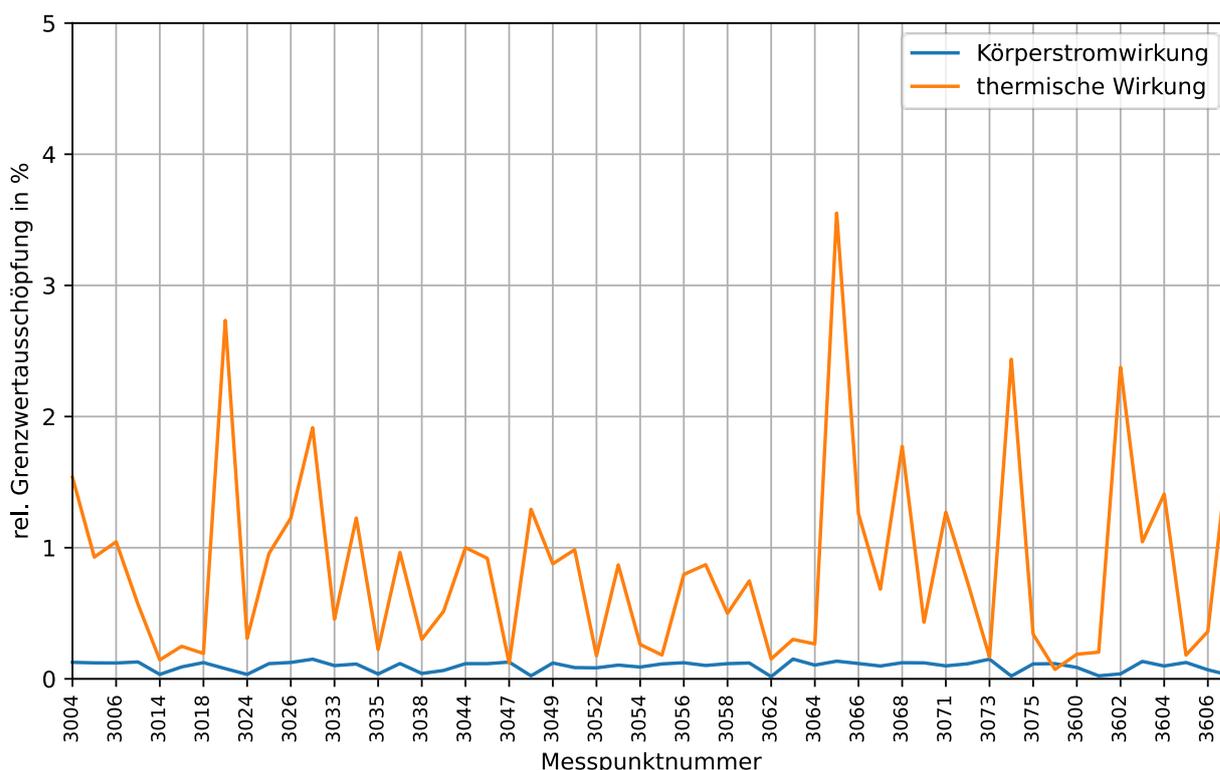


Abb. 5.43: Übersicht für das Untersuchungsgebiet Freiburg hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).

Tab. 5.5: Statistische Kenndaten für die 54 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Freiburg.

Kategorie	Mittelwert	Perzentile			Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		25%	50%	75%			
Summe Körperstrom	0,10	0,08	0,11	0,12	0,15	0,04	0,38
Summe thermisch	0,85	0,26	0,74	1,18	3,55	0,73	0,86
Rundfunk LMK	0,02	0,01	0,02	0,03	0,11	0,02	0,87
Rundfunk UKW	0,19	0,07	0,09	0,15	3,41	0,46	2,44
Rundfunk DAB	0,27	0,10	0,19	0,34	1,58	0,27	1,01
Fernsehen DVB-T	0,35	0,11	0,22	0,53	1,53	0,34	0,97
Mobilfunk	0,52	0,11	0,30	0,82	2,43	0,60	1,16
BOS	0,04	0,03	0,04	0,04	0,13	0,03	0,61
Sonstige Sender	0,03	0,01	0,01	0,02	0,38	0,06	2,27

Im Vergleich mit der Messkampagne des Jahres 2009, dargestellt in Abbildung 5.44, wird deutlich, dass der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von

mehr als 5% komplett verschwand (von 4% auf 0%). Der Anteil der Messpunkte mit geringen Immissionen (<1% des Grenzwertes) ist ebenfalls gesunken (von 85% auf 71%). Der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 1-2% ist dafür angestiegen (von 9% auf 22%), ebenso der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 2-5% (von 4% auf 7%).

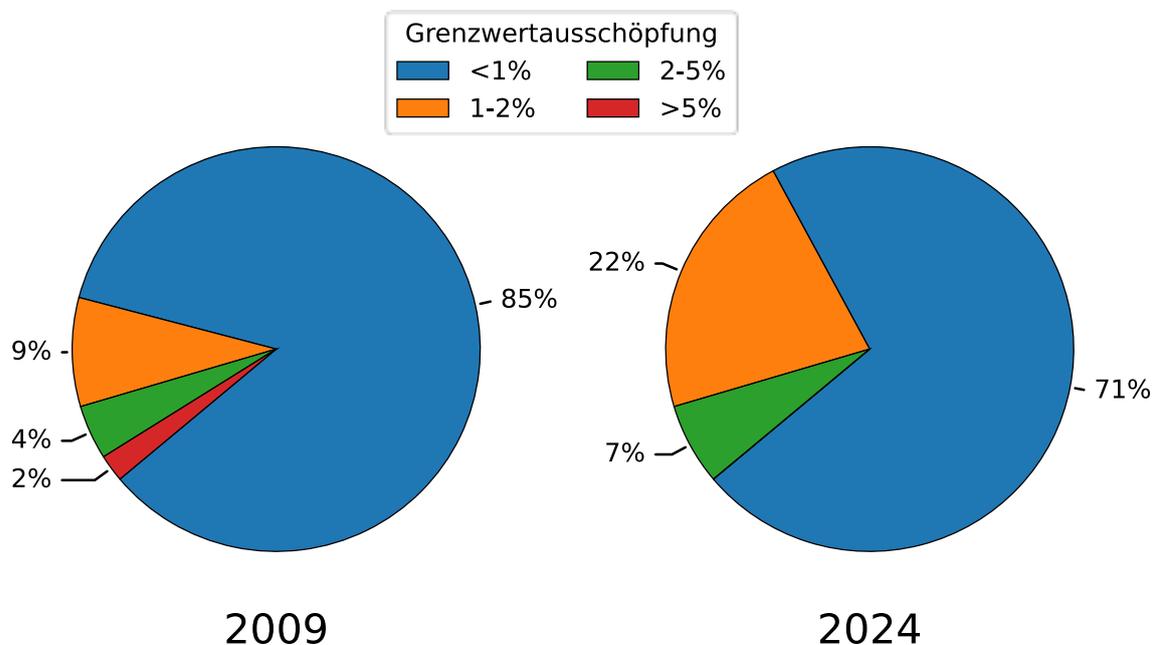


Abb. 5.44: Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Freiburg.

Der Vergleich mit früheren Messkampagnen (Abbildung 5.45) zeigt einen leichten Abfall der thermischen Grenzwertausschöpfung (von 0,95% in 2003 auf 0,84% in 2024), der hauptsächlich aus der im Jahr 2012 erfolgten Abschaltung des sich innerhalb des Untersuchungsgebietes befindlichen Mittelwellensenders Freiburg-Lehen resultiert.

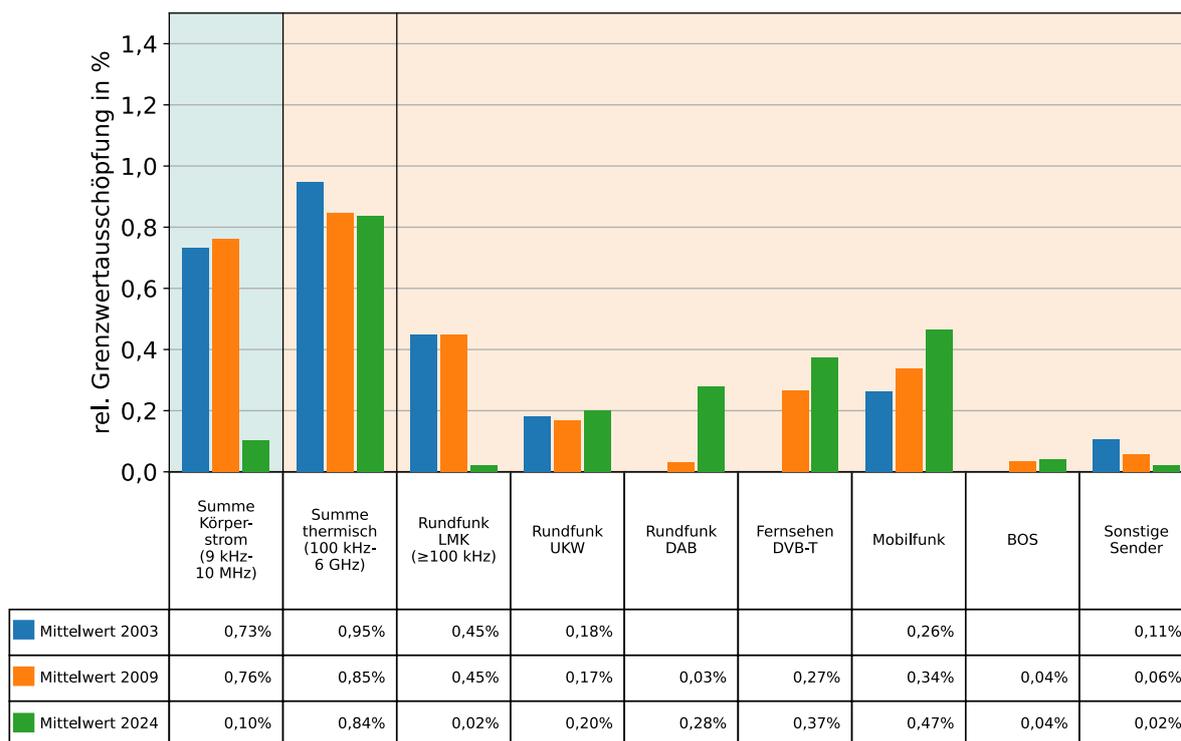


Abb. 5.45: Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Freiburg.

5.2.4.2 Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Freiburg

Die folgenden Kartendarstellungen zeigen die räumliche Verteilung der Immissionen. Für die Körperstromwirkung (Abbildung 5.46) ergibt sich eine relativ homogene Verteilung von Ausschöpfungen im Bereich von 0,1%, die sich aus weiter entfernten Sendern und der großen Wellenlängen ergibt. Wenige Ausreißer nach oben entstehen durch lokale Immissionsquellen, Ausreißer nach unten sind durch Abschattung begründet. Bei der Summe der thermischen Wirkung (Abbildung 5.47) fällt lediglich ein Punkt mit höherer Grenzwertausschöpfung auf (3065). Dieser befand sich in unmittelbarer Nähe zum UKW-Sender Freiburg-Lehen (siehe auch Abbildung 5.48). Alle weiteren Funkdienste zeigen sehr geringe Grenzwertausschöpfungen mit kleinräumigen Schwankungen.

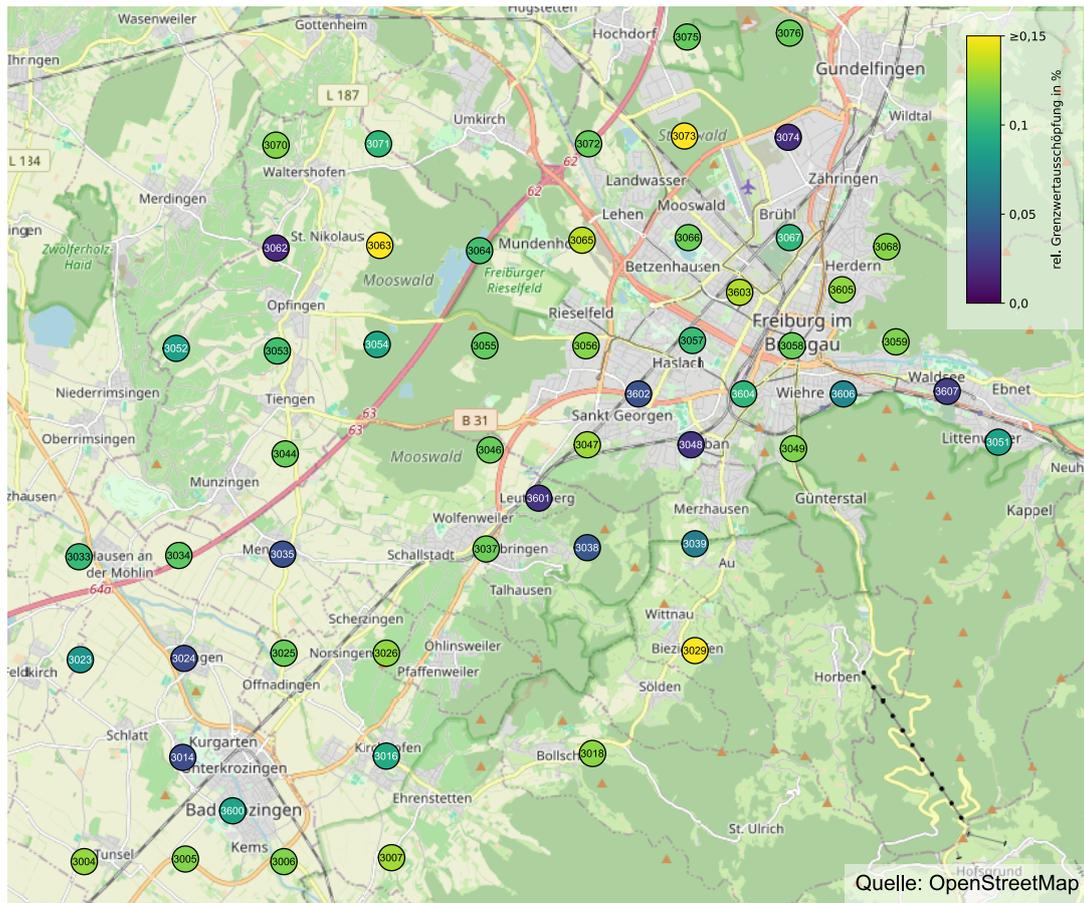


Abb. 5.46: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Summe der Körperstromwirkung.

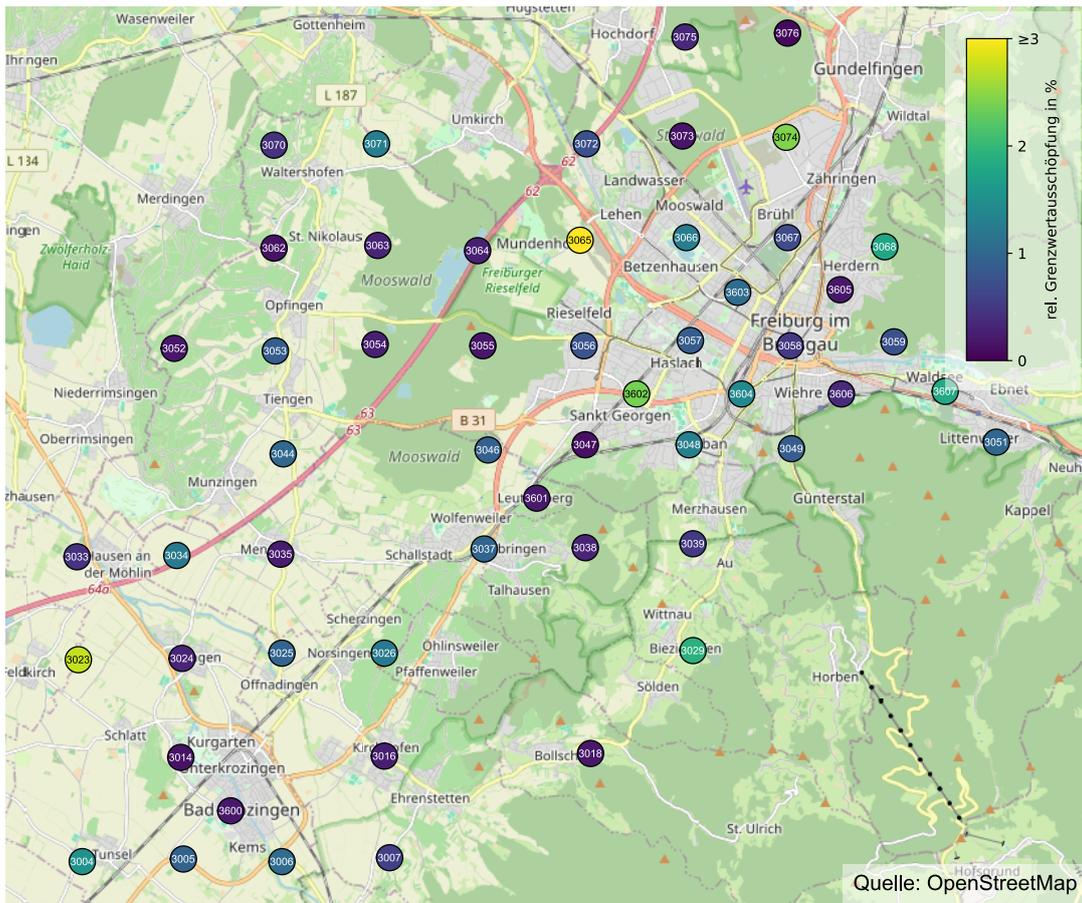


Abb. 5.47: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Summe der thermischen Wirkung.

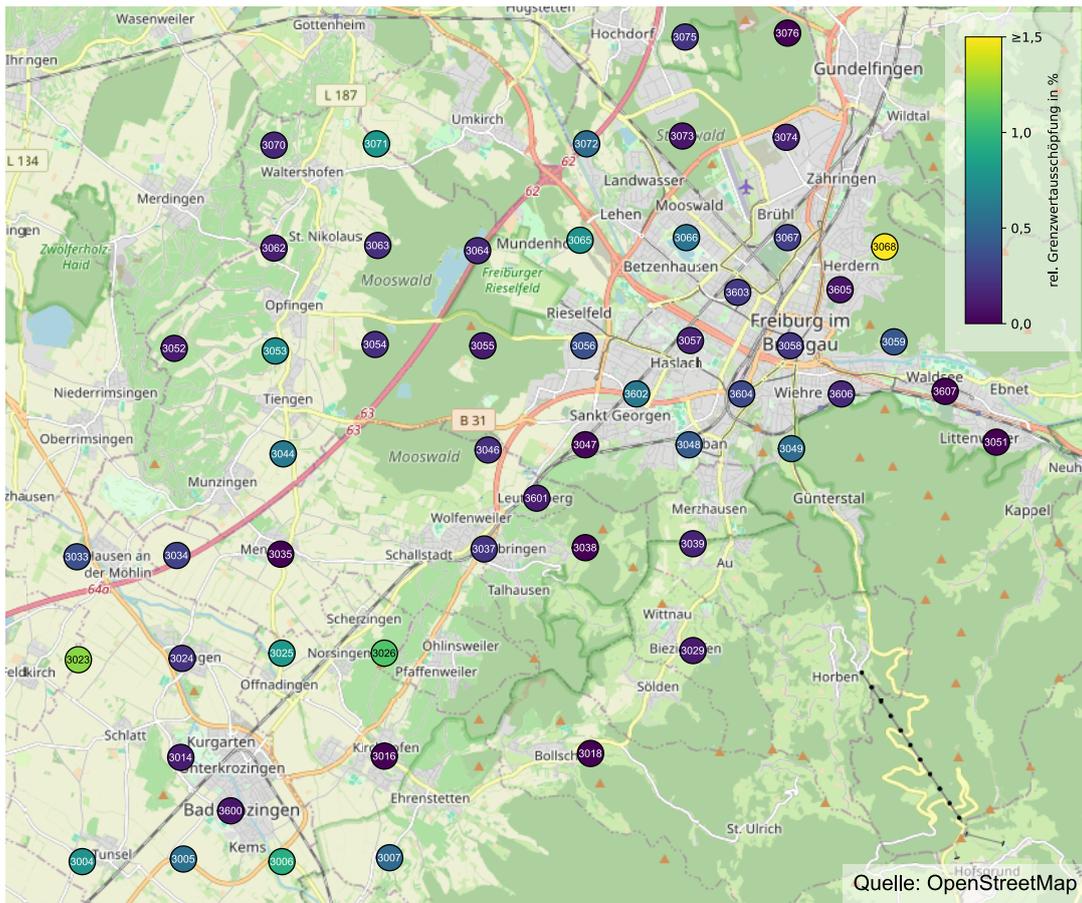


Abb. 5.50: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch DVB-T-Sender.

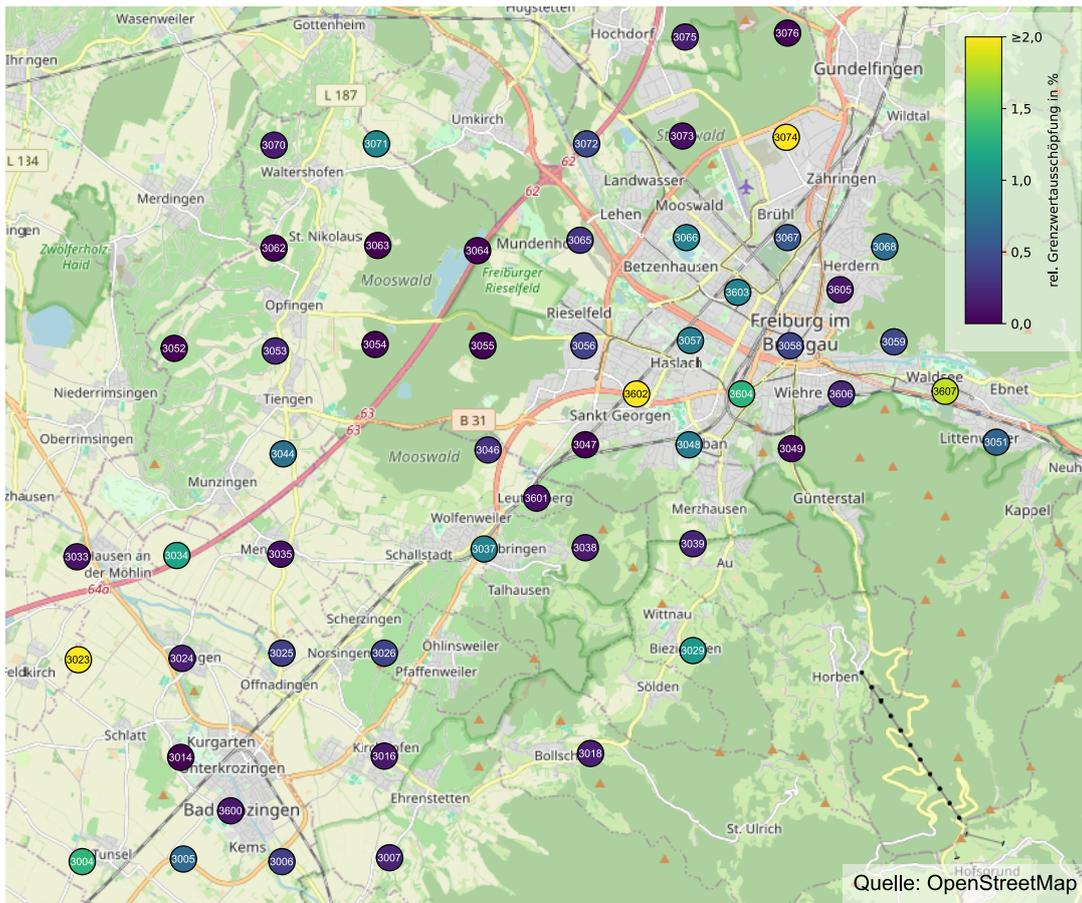


Abb. 5.51: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch Mobilfunksender.

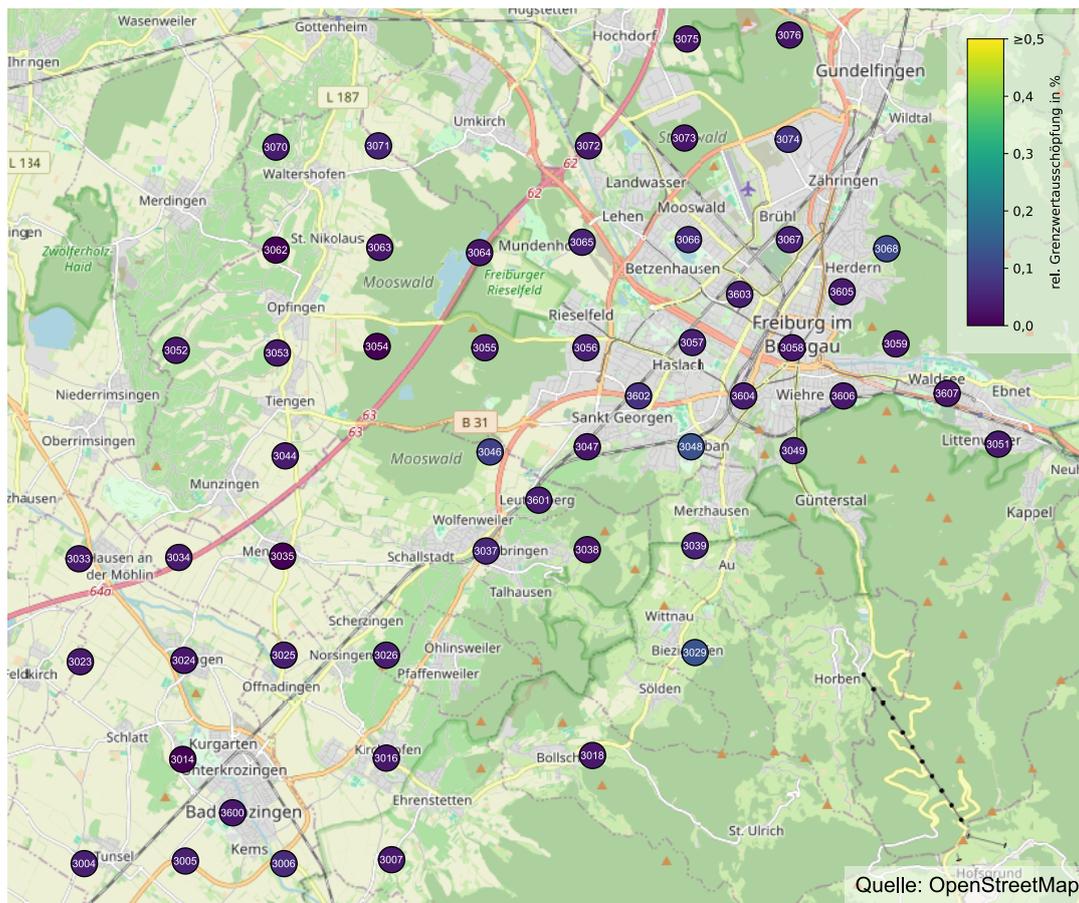


Abb. 5.52: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).

5.2.4.3 Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009

In der Differenzdarstellung bezüglich der Messkampagne 2009 ist beim Körperstrom vor allem die Abschaltung des Mittelwellensenders Freiburg-Lehen ersichtlich (Abbildung 5.53). Im Bereich der thermischen Wirkung (Abbildung 5.54) fallen wenige Messpunkte mit gestiegenen Immissionen auf, die auf den Ausbau der einzelnen Funkdienste und den Bau neuer Funkmasten zurückzuführen sind. Am Messpunkt 3065 wirkt sich erneut die Abschaltung des Mittelwellensenders Freiburg-Lehen merklich aus.

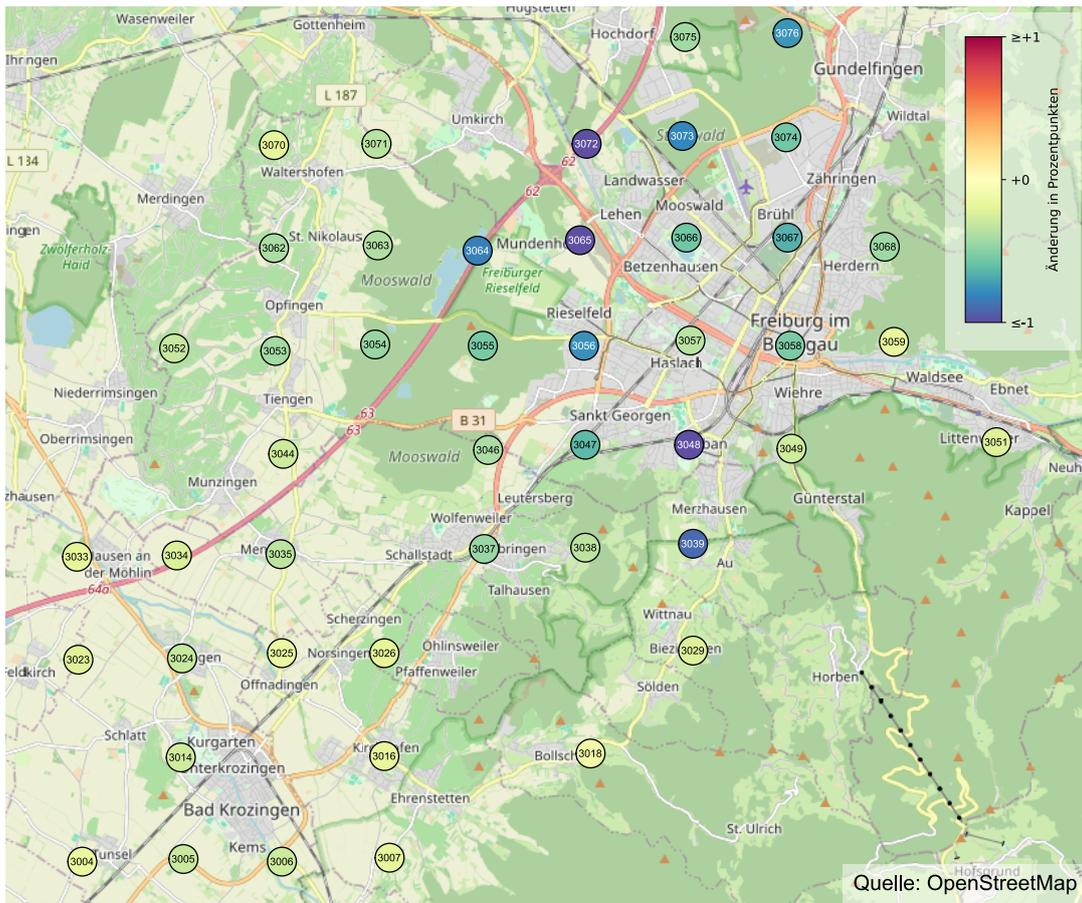


Abb. 5.53: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Körperstromwirkung.

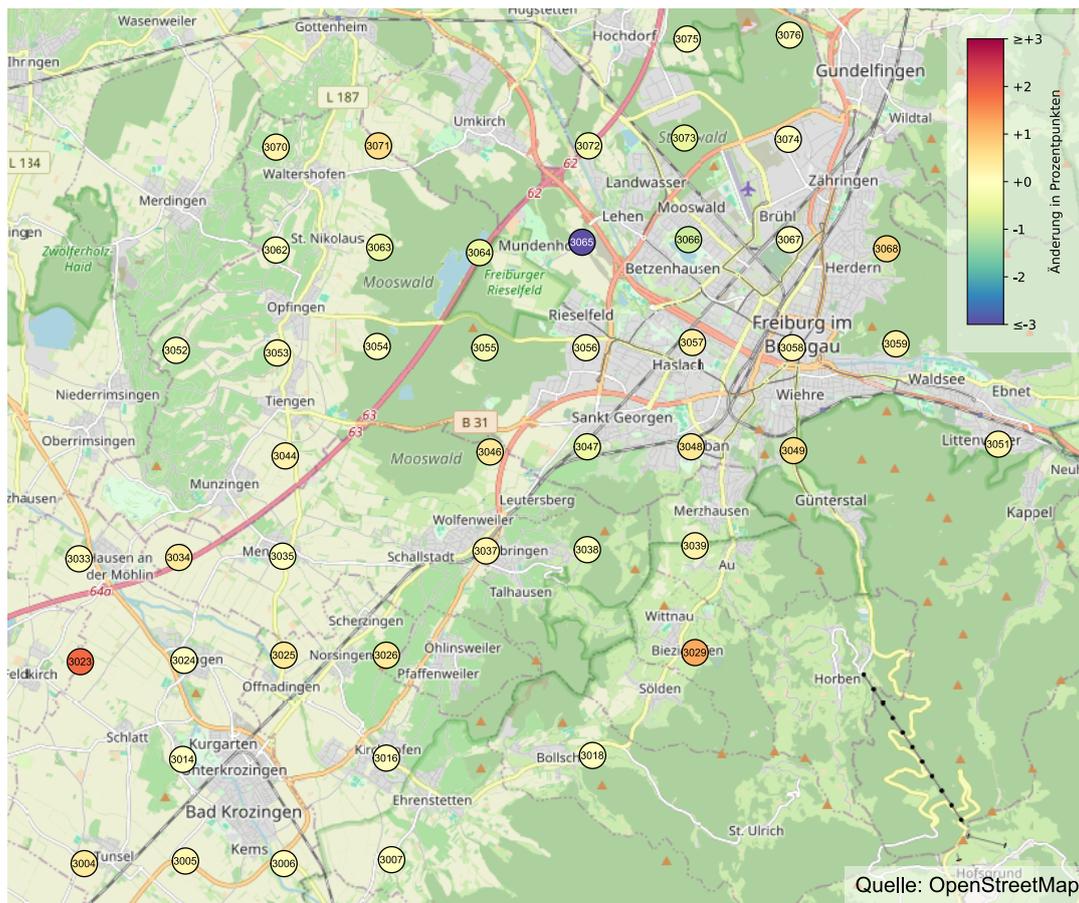


Abb. 5.54: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Freiburg für die thermische Wirkung.

5.2.5 Untersuchungsgebiet Oberschwaben

In Abbildung 5.55 ist die Verteilung der Messpunkte im Untersuchungsgebiet Oberschwaben dargestellt. Es beinhaltet die Städte Friedrichshafen und Ravensburg sowie das dazwischen liegende ländlich geprägte Umland. Das Messgebiet besteht aus insgesamt 69 Messpunkten, von denen 28 Punkte (41%) innerhalb geschlossener Ortschaften liegen. In dieser Messregion befinden sich keine leistungsstarken Sendeanlagen.

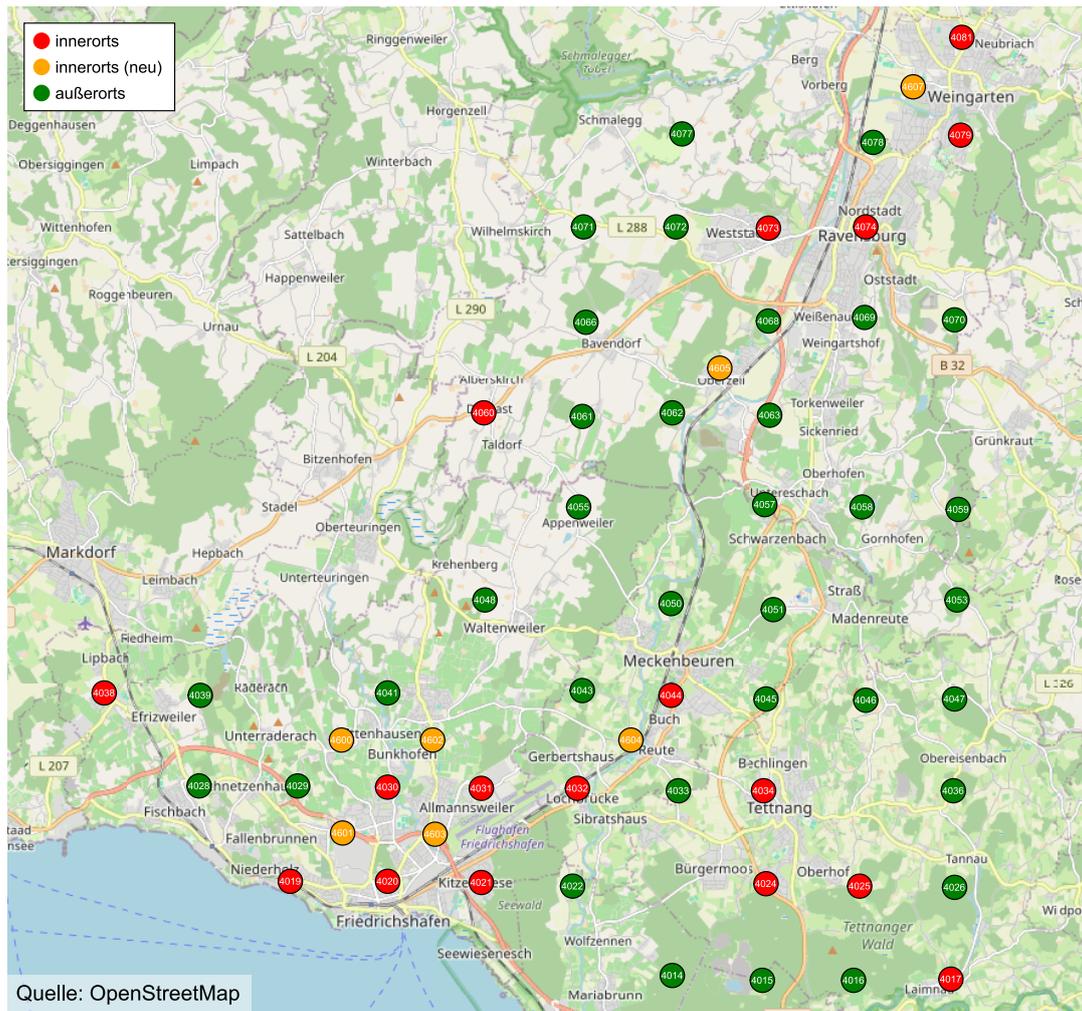


Abb. 5.55: Untersuchungsgebiet Oberschwaben.

5.2.5.1 Statistische Kenndaten

Die Übersicht der Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte im Gebiet Oberschwaben in Abbildung 5.56 und Tabelle 5.6 zeigt eine mittlere thermische Grenzwertausschöpfung von 0,50%, die die geringsten Grenzwertausschöpfung aller Messregionen darstellt. An einzelnen Punkten, deren Verteilung keine erkennbare Systematik zugrunde liegt, werden leicht höhere Ausschöpfungen bis maximal 5,63% erreicht.

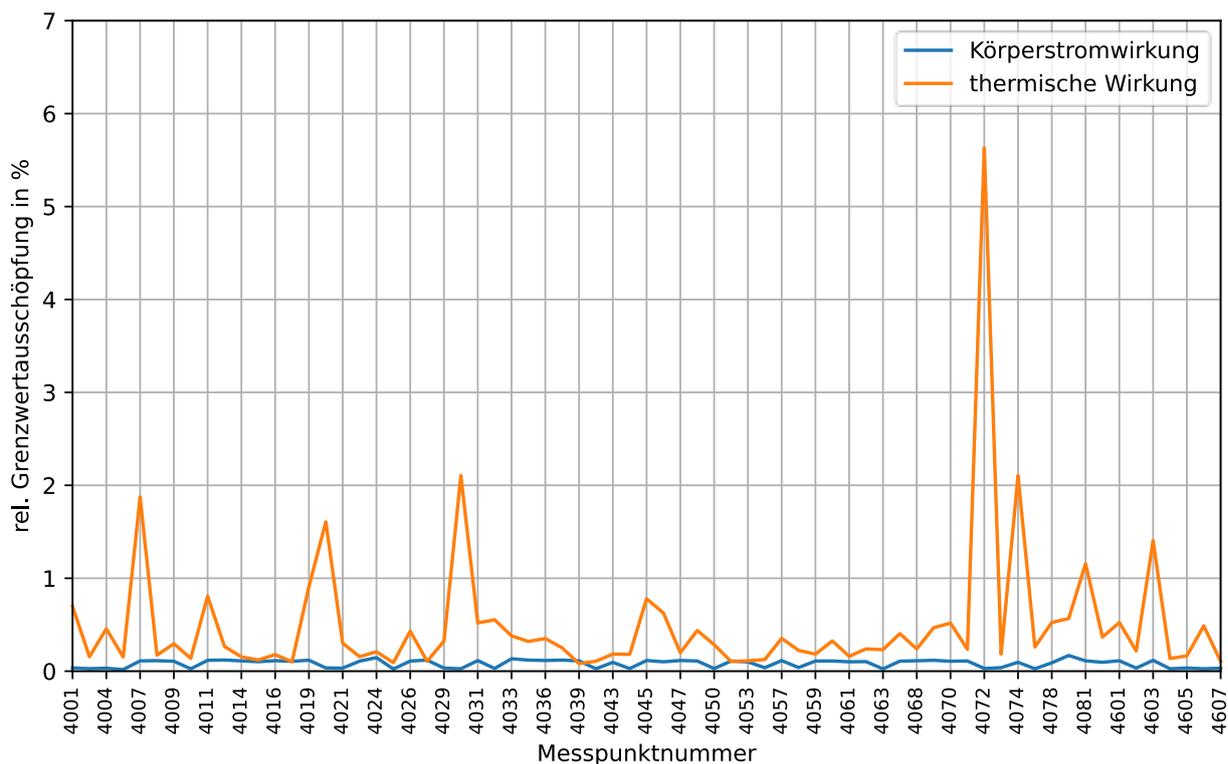


Abb. 5.56: Übersicht für das Untersuchungsgebiet Oberschwaben hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).

Tab. 5.6: Statistische Kenndaten für die 69 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Oberschwaben.

Kategorie	Mittelwert	Perzentile			Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		25%	50%	75%			
Summe Körperstrom	0,08	0,03	0,11	0,11	0,17	0,04	0,50
Summe thermisch	0,50	0,16	0,27	0,52	5,63	0,77	1,52
Rundfunk LMK	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07	0,01	0,56
Rundfunk UKW	0,16	0,08	0,12	0,17	1,48	0,18	1,13
Rundfunk DAB	0,10	0,04	0,08	0,12	0,51	0,09	0,90
Fernsehen DVB-T	0,08	0,00	0,04	0,13	0,54	0,11	1,33
Mobilfunk	0,37	0,00	0,16	0,34	5,62	0,78	2,11
BOS	0,04	0,03	0,03	0,04	0,28	0,04	1,06
Sonstige Sender	0,02	0,01	0,01	0,02	0,31	0,04	1,84

Im Vergleich mit der Messkampagne des Jahres 2009, dargestellt in Abbildung 5.57, wird deutlich, dass der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von

mehr als 5% angestiegen ist (von 0% auf 2%). Der Anteil der Messpunkte mit geringen Immissionen (<1% des Grenzwertes) ist stark angestiegen (von 68% auf 90%). Der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 1-2% hat sich hingegen deutlich verringert (von 25% auf 5%), ebenso der Anteil der Messpunkte mit einer Grenzwertausschöpfung von 2-5% (von 7% auf 3%).

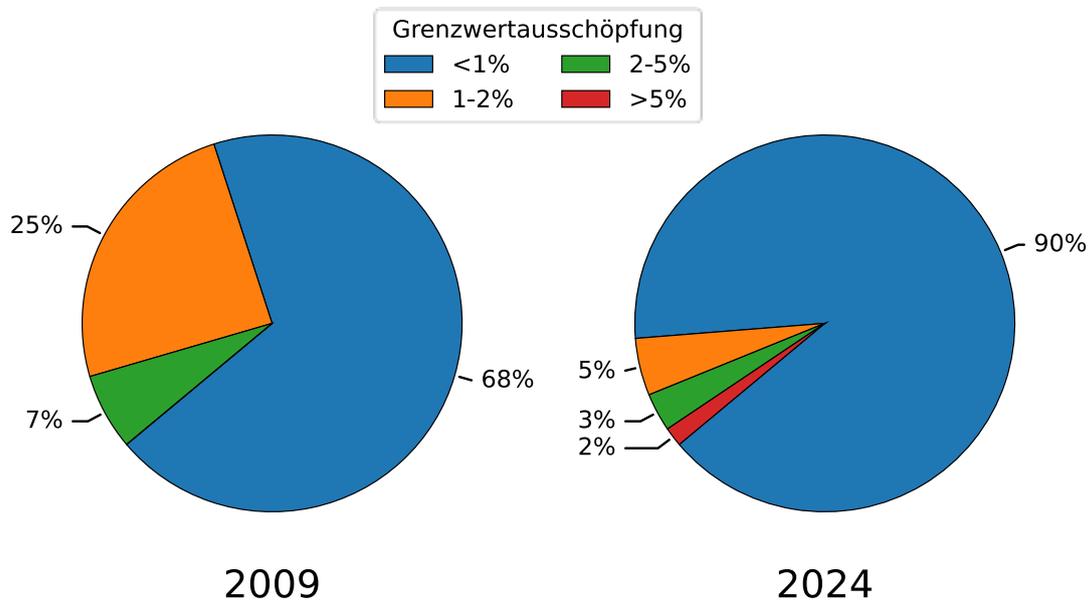


Abb. 5.57: Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben.

Der Vergleich mit früheren Messkampagnen (Abbildung 5.57) zeigt einen Abfall der thermischen Grenzwertausschöpfung (von 0,86% in 2003 auf 0,52% in 2024), der hauptsächlich durch die stark gesunkenen Immissionen im LMK-Bereich resultiert.

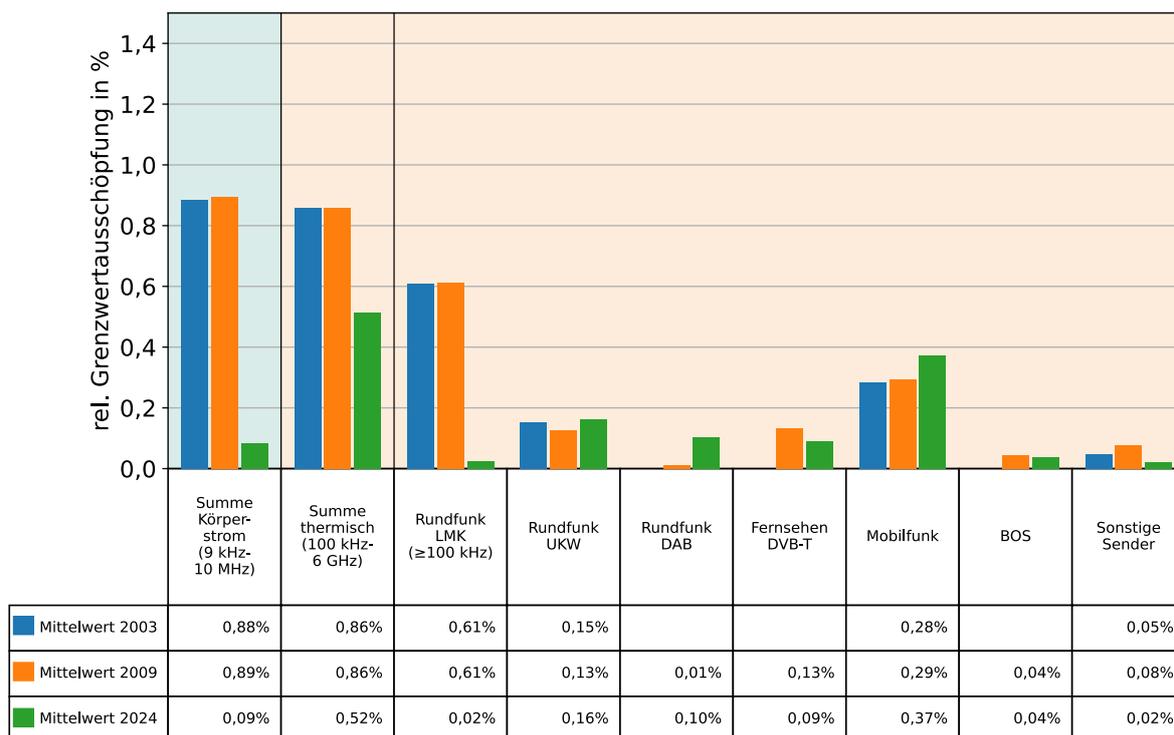


Abb. 5.58: Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben.

5.2.5.2 Kartendarstellung der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet Oberschwaben

Die folgenden Kartendarstellungen zeigen die räumliche Verteilung der Immissionen. Für die Körperstromwirkung (Abbildung 5.59) ergibt sich eine relativ homogene Verteilung von Ausschöpfungen im Bereich von 0,1%, die sich aus weiter entfernten Sendern und der großen Wellenlängen ergibt. Wenige Ausreißer nach oben entstehen durch lokale Immissionsquellen, Ausreißer nach unten sind durch Abschattung begründet. Bei der Summe der thermischen Wirkung (Abbildung 5.60) fällt lediglich ein Punkt mit höherer Grenzwertausschöpfung auf (4072). Dieser befand sich in unmittelbarer Nähe zu einem Mobilfunkmast (siehe Abbildung 5.64). Alle weiteren Funkdienste zeigen im Vergleich deutlich geringere Grenzwertausschöpfungen mit kleinräumigen Schwankungen.

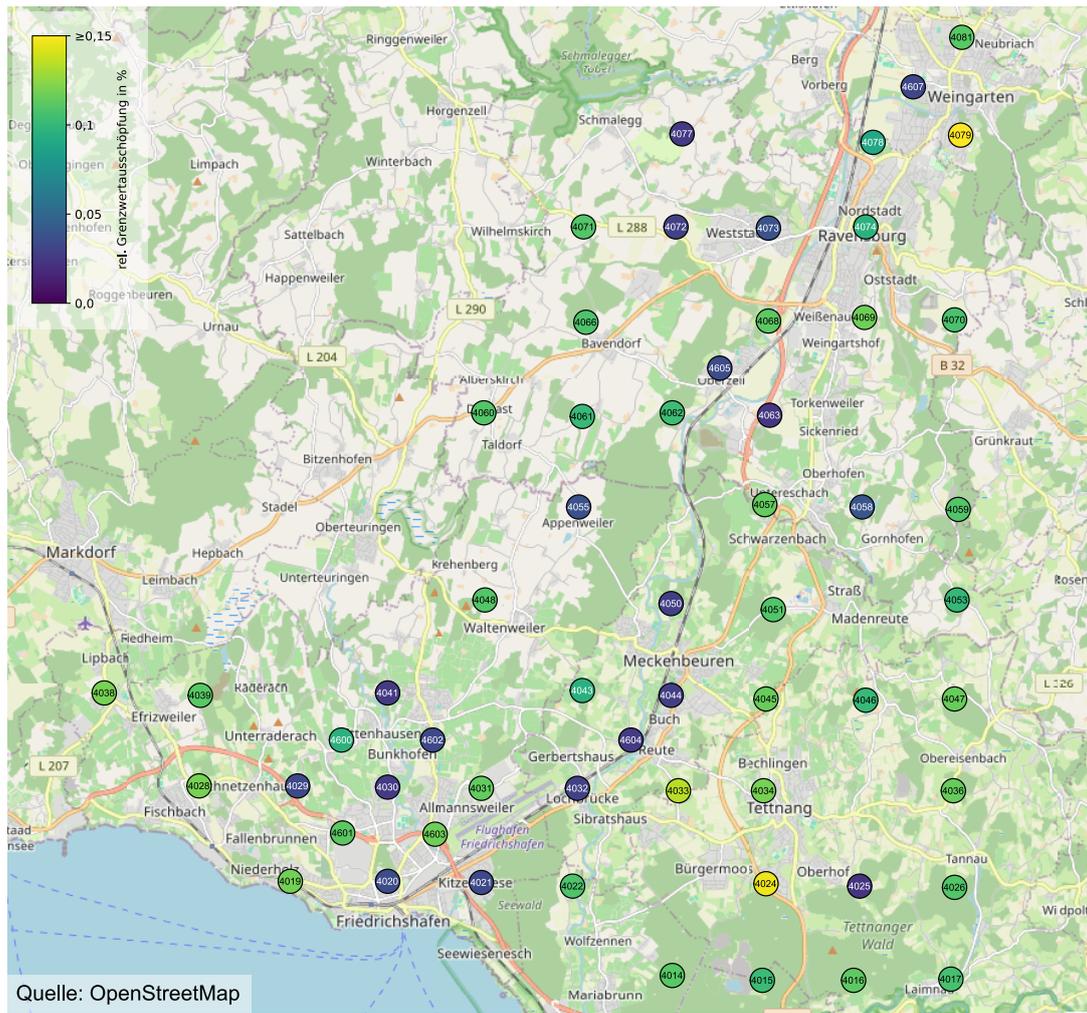


Abb. 5.59: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die Summe der Körperstromwirkung.

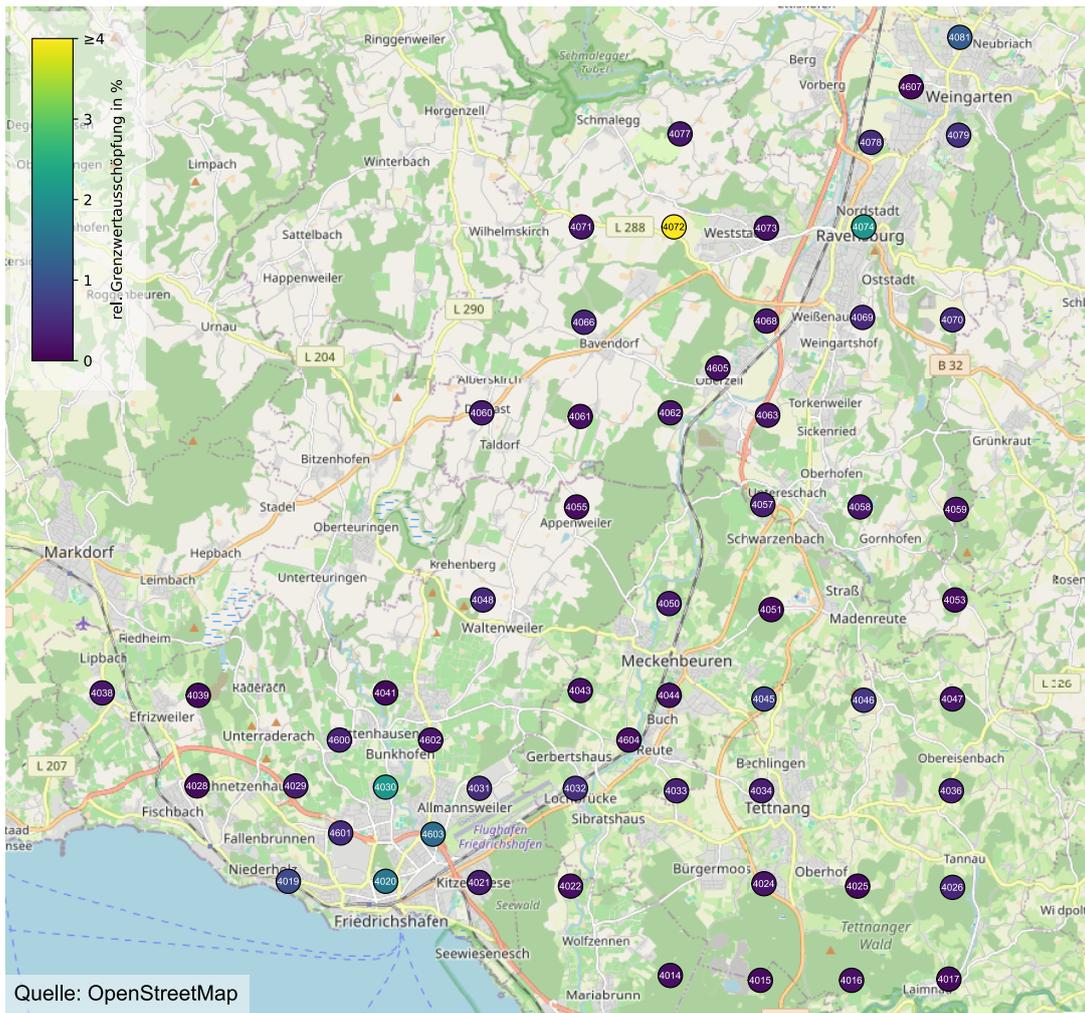


Abb. 5.60: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die Summe der thermischen Wirkung.

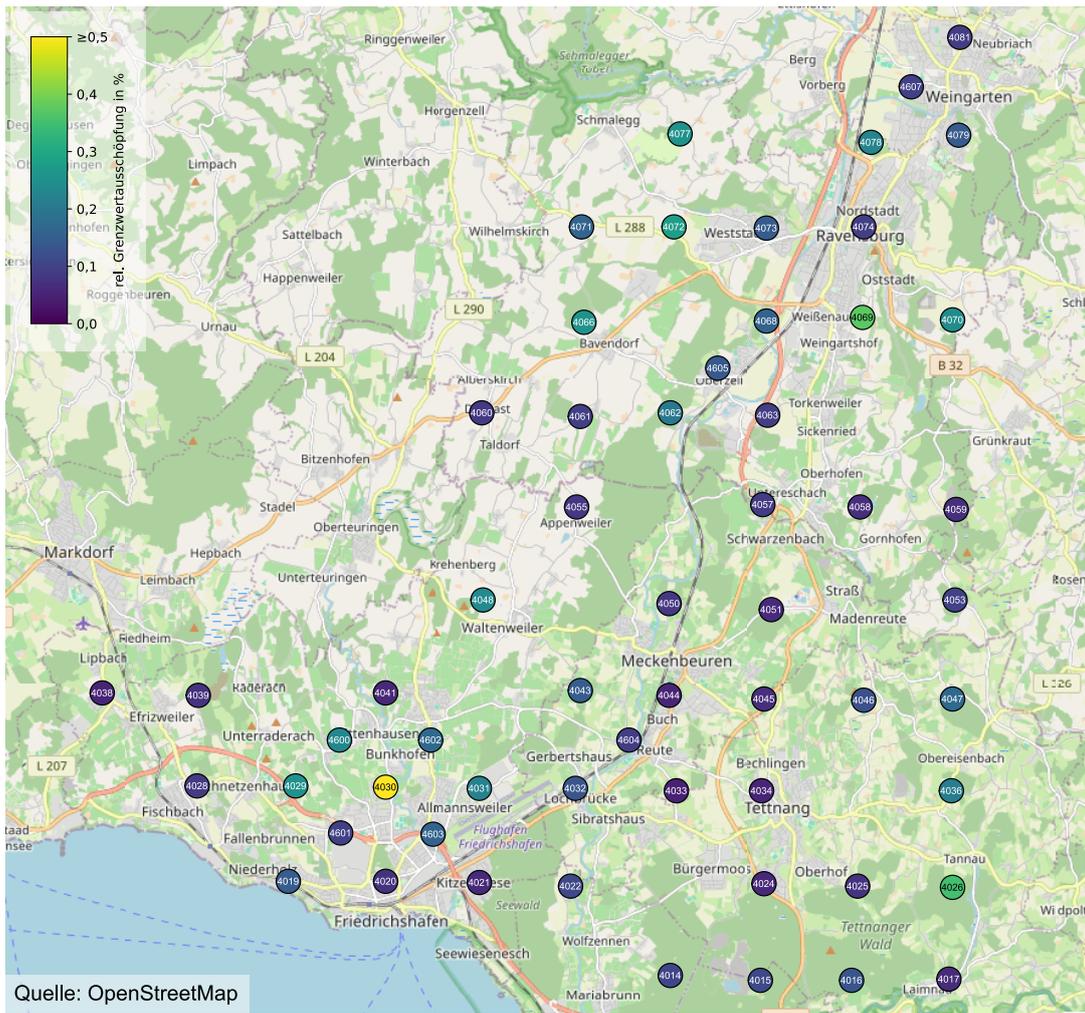


Abb. 5.61: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch UKW-Rundfunksender.

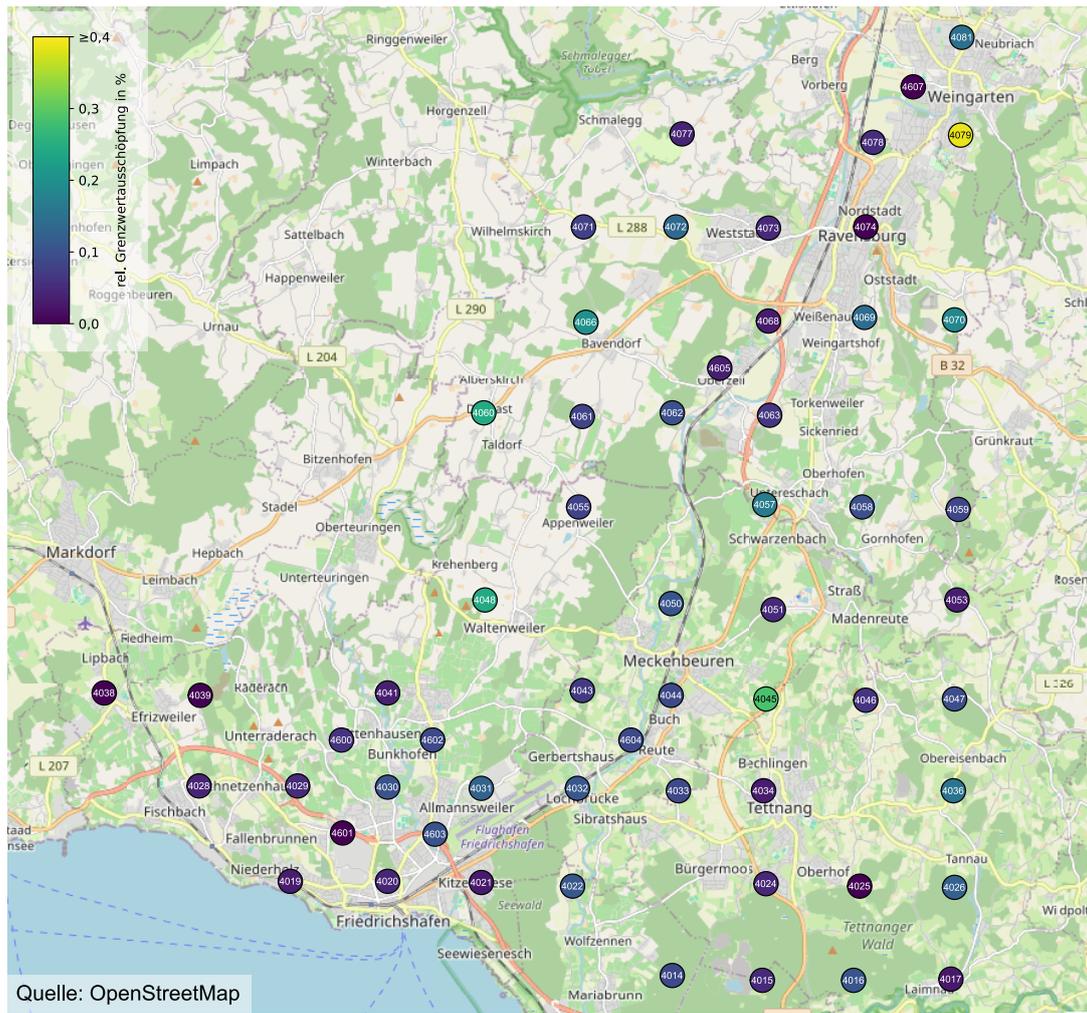


Abb. 5.62: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch DAB-Rundfunksender.

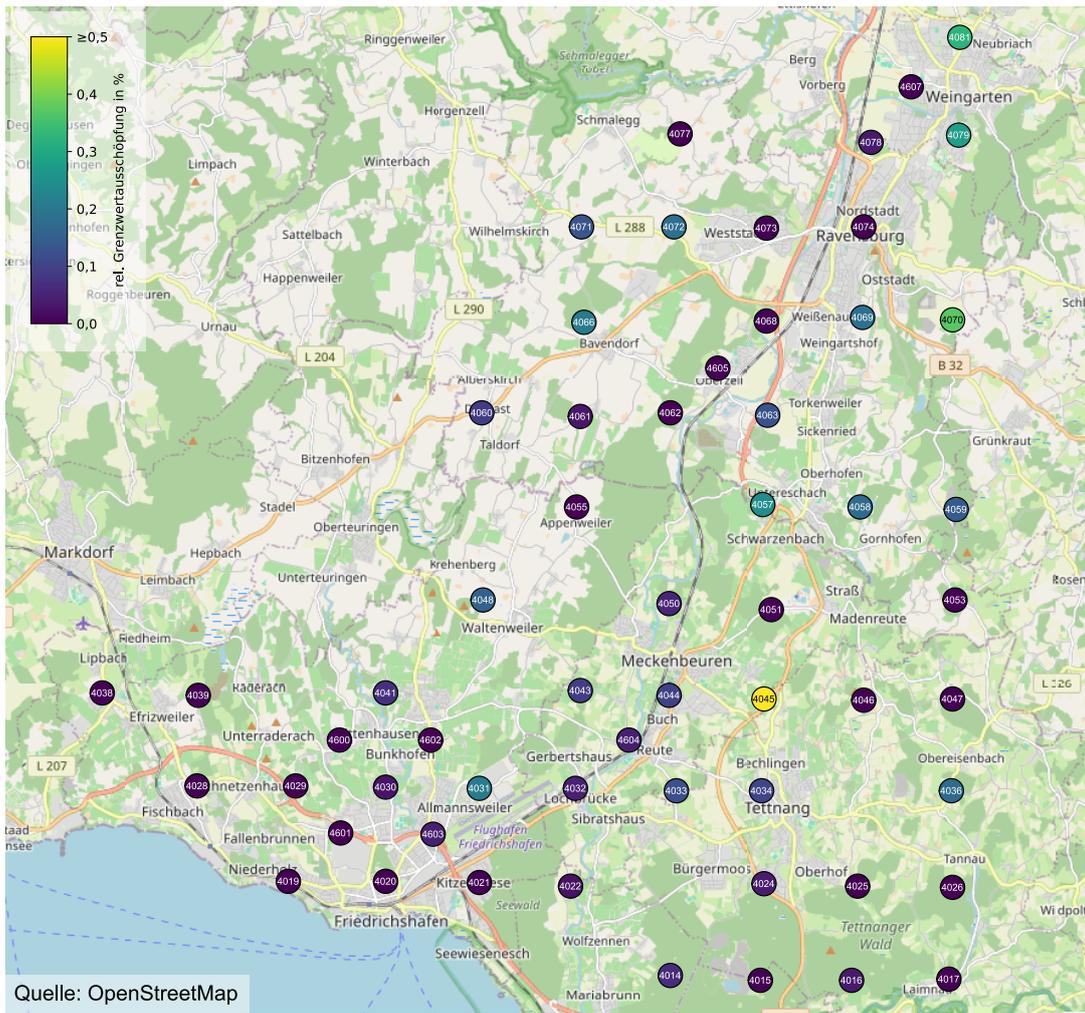


Abb. 5.63: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch DVB-T-Sender.

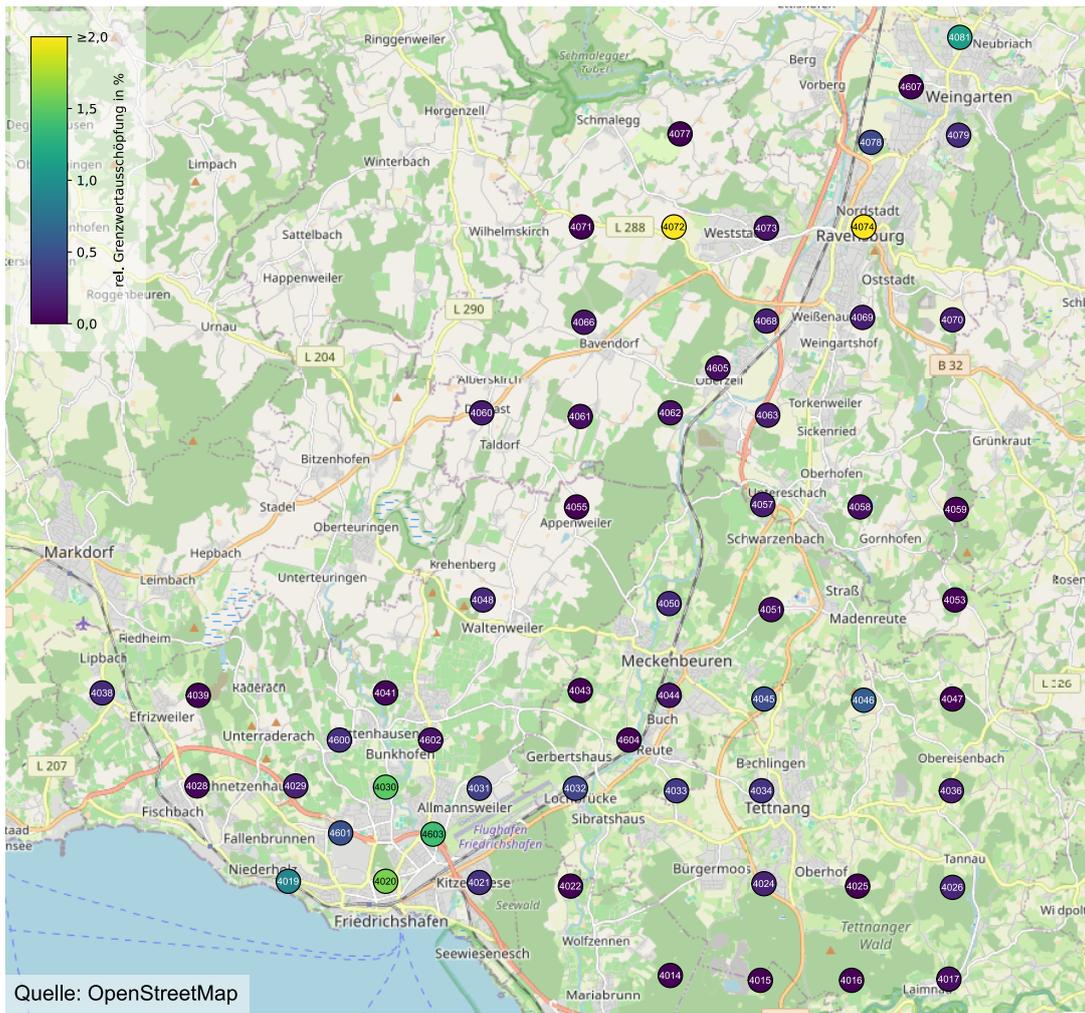


Abb. 5.64: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch Mobilfunksender.

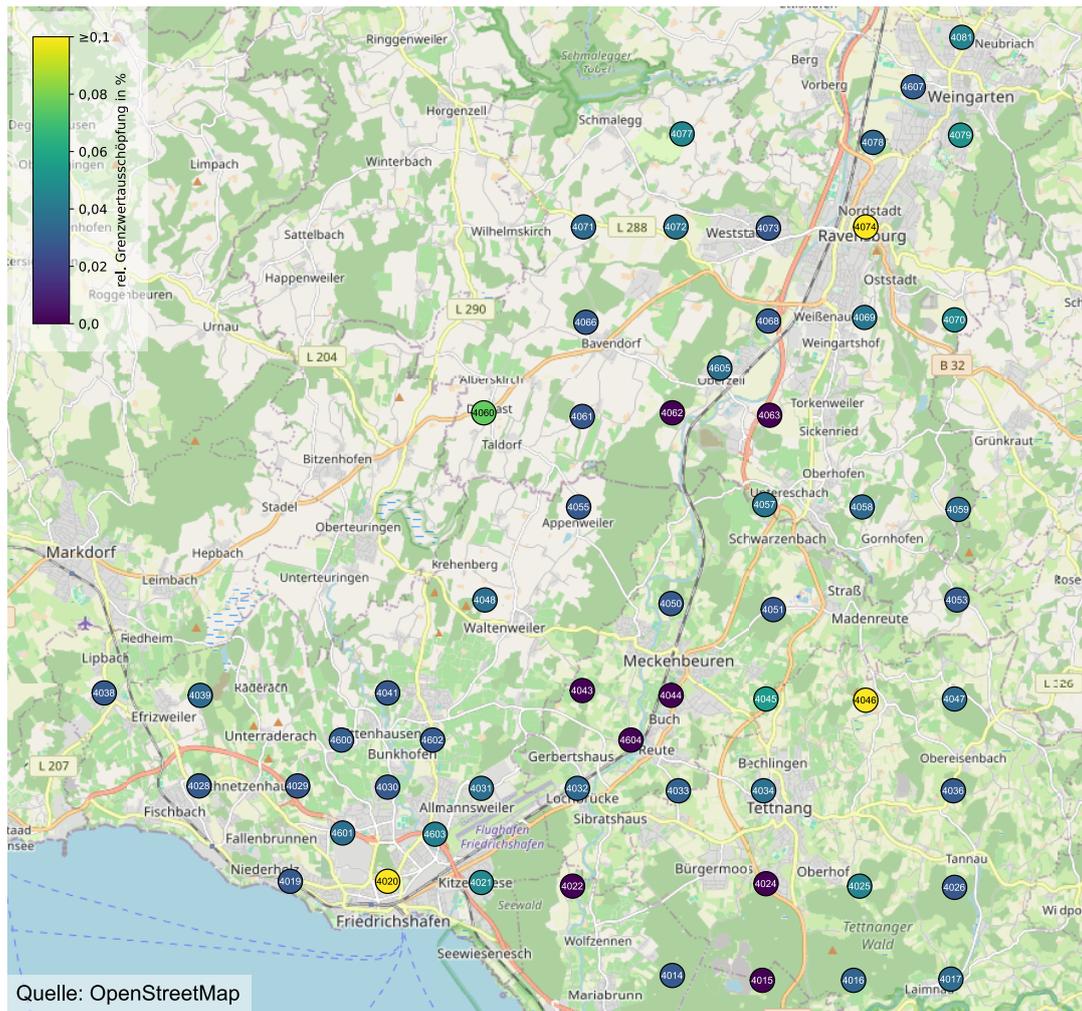


Abb. 5.65: Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).

5.2.5.3 Kartendarstellung der Veränderungen im Vergleich zu 2009

In der Differenzdarstellung bezüglich der Messkampagne 2009 ist beim Körperstrom vor allem die Abschaltung des Mittelwellensenders Sender Ravensburg (Wilhelmskirch) ersichtlich, insbesondere an den Messpunkten 4071 und 4072 (Abbildung 5.66).

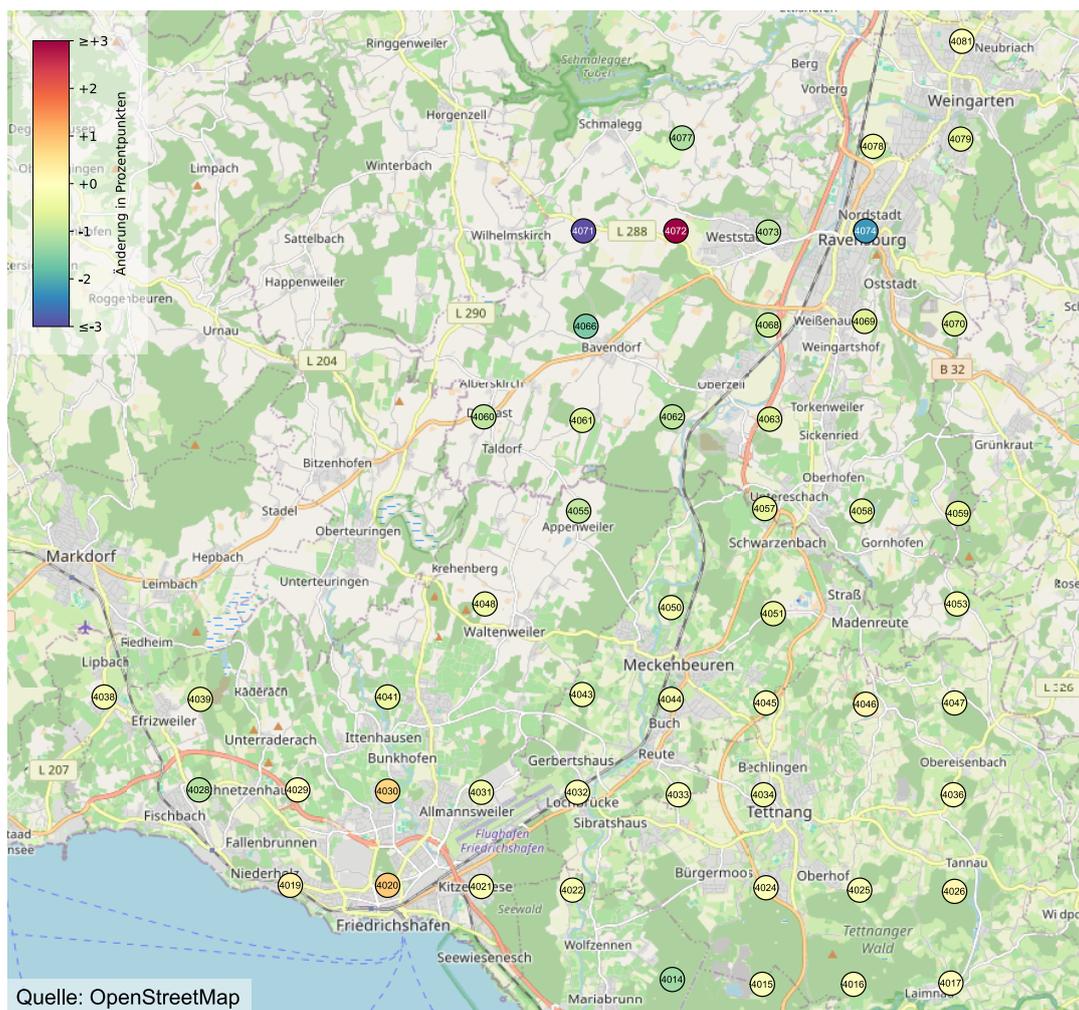


Abb. 5.67: Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die thermische Wirkung.

5.3 Ergebnisse der Zusatzuntersuchung: Typische Auslastung bei 4G (LTE)/5G (NR)

Die im Rahmen des Funkwellenmessprojektes vorgesehenen Messungen an einer großen Zahl von Punkten (600) eröffnen die Möglichkeit, mittels spezieller an jedem Punkt vorgenommener Zusatzmessungen einen Eindruck über die zum Zeitpunkt der Messung herrschende Auslastung der 4G (LTE)- beziehungsweise 5G (NR)-Anlagen zu erhalten. Damit kann aufgrund der großen Zahl von Messpunkten genauer quantifiziert werden, um welchen Faktor die typisch am Messpunkt vorhandene aktuelle Immission, verursacht durch die beiden derzeit wichtigsten Mobilfunkstandards von deren theoretischem Maximalimmissionswert entfernt ist. Der theoretische Maximalwert wird nach 26. BImSchV ja als Beurteilungsgröße für den Grenzwertvergleich herangezogen.

Somit stellt dieses Verhältnis (Maximalimmission/aktuelle Immission) faktisch einen zusätzlichen mittleren Sicherheitsfaktor bei der Immissionsbewertung des Mobilfunks da.

In Tabelle 5.7 sind zunächst die 15 Frequenzbänder aufgelistet, für die diese zusätzliche Untersuchung vorgenommen wurde. Die aktuellen Immissionswerte werden durch individuelle Kanalleistungsmessungen für die in der Tabelle spezifizierten Bänder ermittelt. Als Basis zur Bestimmung der maximal möglichen Immission dienen spezielle, permanent mit konstanter Leistung von den 4G (LTE)- und 5G (NR)-Anlagen abgestrahlte Signalisierungssignale (RS bzw. SSS), die mit der "codeselektiven" Messmethode [WUS 23] für jedes untersuchte Band separat ermittelt werden. Basierend auf diesen Messwerten kann auf die bei Vollauslastung maximal am Messpunkt erzeugbare Immission hochgerechnet werden. Die dafür notwendigen Hochrechnungsfaktoren ergeben sich aus der Bandbreite des jeweiligen Signals und einer zusätzlich möglicherweise vorgenommenen Leistungserhöhung (+3 dB) der Referenzsignale ("Boost"), die der Betreiber individuell für jede Sendeanlage einstellen kann. Diese für die Auswertung der Messungen sehr hilfreiche Angabe konnte nicht von allen Netzbetreibern geliefert werden, da die Leistungserhöhung der Signalisierungssignale zum Teil standortindividuell festgelegt wird. Die individuelle Auskunft über die Leistung der Signalisierungssignale für die jeweils in der Umgebung der 600 Messpunkte vorhandenen Anlagen würde bei den Netzbetreibern einen unzumutbar hohen Arbeitsaufwand verursachen. Für die Netzbetreiber und Standorte, für die keine Information über den Boost vorlag, wurde in der folgenden Auswertung angenommen, dass die Signalisierungssignale nicht geboostet sind, was allerdings zu einer gewissen Überschätzung der maximal möglichen Immission von maximal 3 dB führen kann [WUS 23].

Tab. 5.7: Untersuchte 4G (LTE)/5G (NR)-Bänder und ihre Frequenzbereiche (TEF: Telefónica, TK: Telekom, VF: Vodafone).

Band (Betreiber)	Frequenzbereich	Funkstandard
MB07 (TEF)	758 - 768 MHz	5G (NR)
MB07 (TK)	768 - 778 MHz	5G (NR)
MB07 (VF)	778 - 788 MHz	4G (LTE)
MB08 (TEF)	791 - 801 MHz	4G (LTE)
MB08 (VF)	801 - 811 MHz	4G (LTE)
MB08 (TK)	811 - 821 MHz	4G (LTE)
MB15 (TK)	1.452 - 1.472 MHz	4G (LTE)
MB18 (TK 1)	1.805 - 1.825 MHz	4G (LTE)
MB18 (TK 2)	1.825 - 1.835 MHz	4G (LTE)
MB21 (VF)	2.110 - 2.130 MHz	4G (LTE)
MB21 (TEF)	2.130 - 2.150 MHz	4G (LTE)
MB21 (TK)	2.150 - 2.137 MHz	4G (LTE)
MB26 (VF)	2.620 - 2.640 MHz	4G (LTE)
MB26 (TK)	2.640 - 2.650 MHz	4G (LTE)
MB26 (TEF)	2.660 - 2.680 MHz	4G (LTE)

Einige 4G (LTE)-Frequenzbänder wurden bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, wenn dort aktuell nicht ausgeschlossen werden kann, dass an manchen Anlagenstandorten in der Umgebung der Messpunkte neben 4G (LTE)- auch noch GSM-Signale im betrachteten Frequenzband abgestrahlt werden (MB09, MB18 (TEF), MB18 (VF)), oder das Band vom Betreiber noch nicht genutzt wird (MB15 (VF)). Auch die 5G (NR)-Bänder MB36 wurden nicht in die Untersuchungen einbezogen, da die dort verwendeten Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung einen zusätzlichen Einfluss ausüben würden, sodass die Hochrechnung auf Maximalimmission nicht mehr in dieser einfachen Weise möglich ist. In den Frequenzbändern, in denen gleichzeitig 4G (LTE)- und 5G (NR)-Referenzsignale ausgesendet wurden (sog. Dynamic Spectrum Sharing, DSS), wurden die 4G (LTE)-Referenzsignale zur Hochrechnung verwendet (z.B. MB21 (TK)). Die Hochrechnung der 5G (NR)-Referenzsignale würde zum selben Ergebnis führen.

Für diese Zusatzmessung wurde ein separater Messaufbau mit einem zweiten Feldanalysator und einer zusätzlichen auf einem Stativ montierten Messantenne eingesetzt. Der Analysator wurde mit einer eigenen Messroutine (Routine Nr. 4, siehe Abschnitt 8.3.3) gesteuert, sodass die Signalerfassung vollständig automatisch erfolgen konnte.

Die sich ergebende statistische Verteilung der relativen Auslastungsfaktoren über alle gemessenen Frequenzbänder ist in Abbildung 5.68 in einem Histogramm zu sehen. Der relative Auslastungsfaktor, also der Unterschiedsfaktor zwischen maximaler und aktueller Auslastung ist dort im logarithmischen Maß (d.h. in Dezibel) angegeben.

Ein positiver Wert von beispielsweise 3 dB bedeutet hierbei, dass die maximale Immission leistungsbezogen um den Faktor 2 größer ist als der aktuelle Immissionswert. Aufgrund der logarithmischen Darstellung erscheint der im Linearen gebildete Mittelwert im Gegensatz zum Median nicht in im Schwerpunkt des Histogramms.

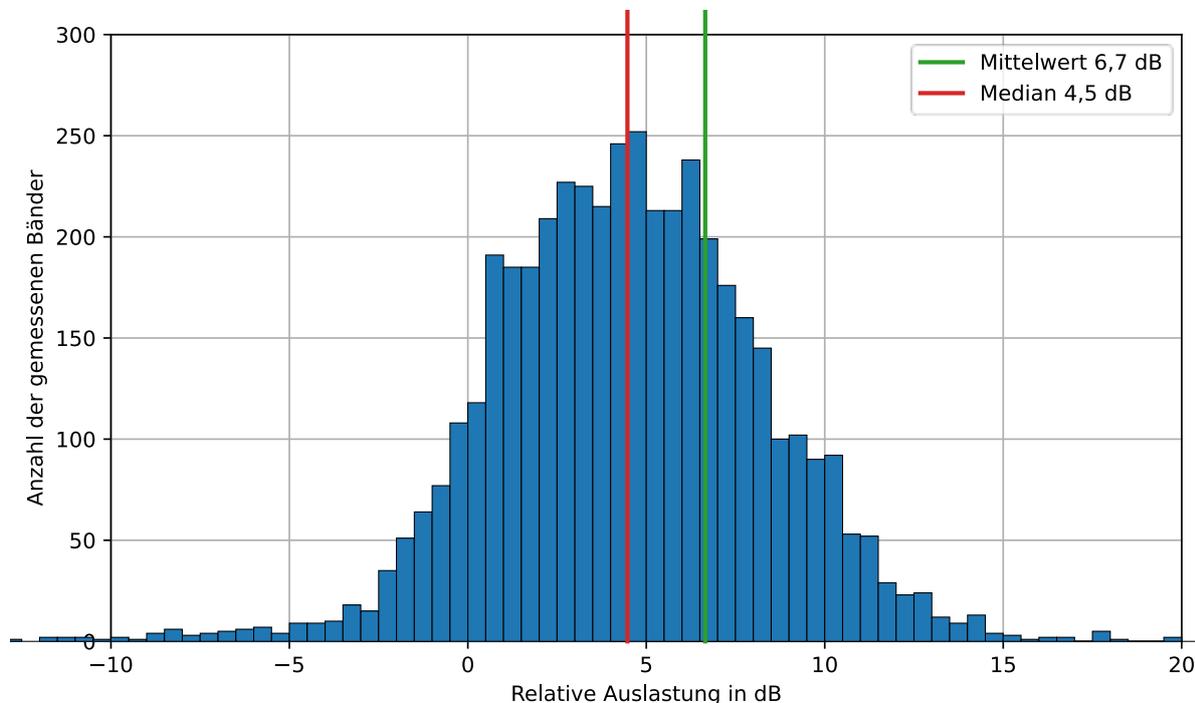


Abb. 5.68: Statistische Verteilung der für die einzelnen untersuchten Frequenzbänder an den 600 Messpunkten ermittelten relativen Auslastungsfaktoren in Dezibel. Jede Säule des Diagramms ist 0,5 dB breit. Ein positiver Wert von beispielsweise 3 dB bedeutet hierbei, dass die maximale Immission leistungsbezogen um den Faktor 2 größer ist als der aktuelle Immissionswert.

Bei einigen Messungen ergaben sich negative dB-Werte (451 von insgesamt 4474 Erfassungen). Diese stellen auf den ersten Blick ein Paradoxon dar, denn dies impliziert, dass die aktuelle Immission größer ist, als der theoretisch maximale Wert. Verursacht werden diese Artefakte zum einen durch die Tatsache, dass die Messungen mit einer auf einem Stativ fest montierten Antenne an einem fixen Punkt vorgenommen werden, die einzelnen Erfassungen aber nicht gleichzeitig erfolgen, sondern einen Zeitraum von etwa zehn Minuten benötigen. Der von der Antenne ermittelte Feldstärkewert kann insbesondere innerorts aufgrund von Mehrwegeausbreitung als Überlagerung einzelner Teilsignale zustande kommen, welche von der Quelle über unterschiedliche Ausbreitungswege zum Messpunkt gelangen. Durch Änderungen der Umgebungsbedingungen während der Messungen (verursacht beispielsweise durch Hin- und Herlaufen des Messpersonals in der Nähe des Messaufbaus, vorbeifahrende Fahrzeuge), können sich die Ausbreitungsbedingungen für die einzelnen Teilsignale deutlich verändern, sodass sich der ermittelte Feldstärkewert am Messort vergrößern oder verkleinern kann. Diese Variabilität kann stärker ausgeprägt sein,

als der Unterschied zwischen aktueller und maximaler Immission und daher durchaus zu den gelegentlich zu beobachtenden paradoxen Messwerten führen.

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen mittelt sich jedoch aufgrund der großen Zahl an untersuchten Punkten in gewissen Grenzen heraus, sodass sein Einfluss auf die aus der Gesamtheit der Ergebnisse gebildeten statistischen Parameter (Mittelwert, Median, Standardabweichung) einen geringen Einfluss hat. Im Gesamtbild ergeben die Messungen einen mittleren Auslastungsfaktor von 6,7 dB. Der Median beträgt 4,5 dB und die Standardabweichung 4,0 dB.

In Abbildung 5.69 sind die resultierenden mittleren Auslastungsfaktoren für alle 15 untersuchten 4G (LTE)-/5G (NR)-Bänder einzeln aufgeschlüsselt. Anstatt einzelner Histogramme sind hier zusammenfassend die sich ergebenden mittleren Auslastungsfaktoren für jedes Band dokumentiert. Der mittlere Unterschied zwischen aktueller und maximal möglicher Immission liegt für die einzelnen untersuchten Bänder zwischen 2,8 und 10,6 dB.

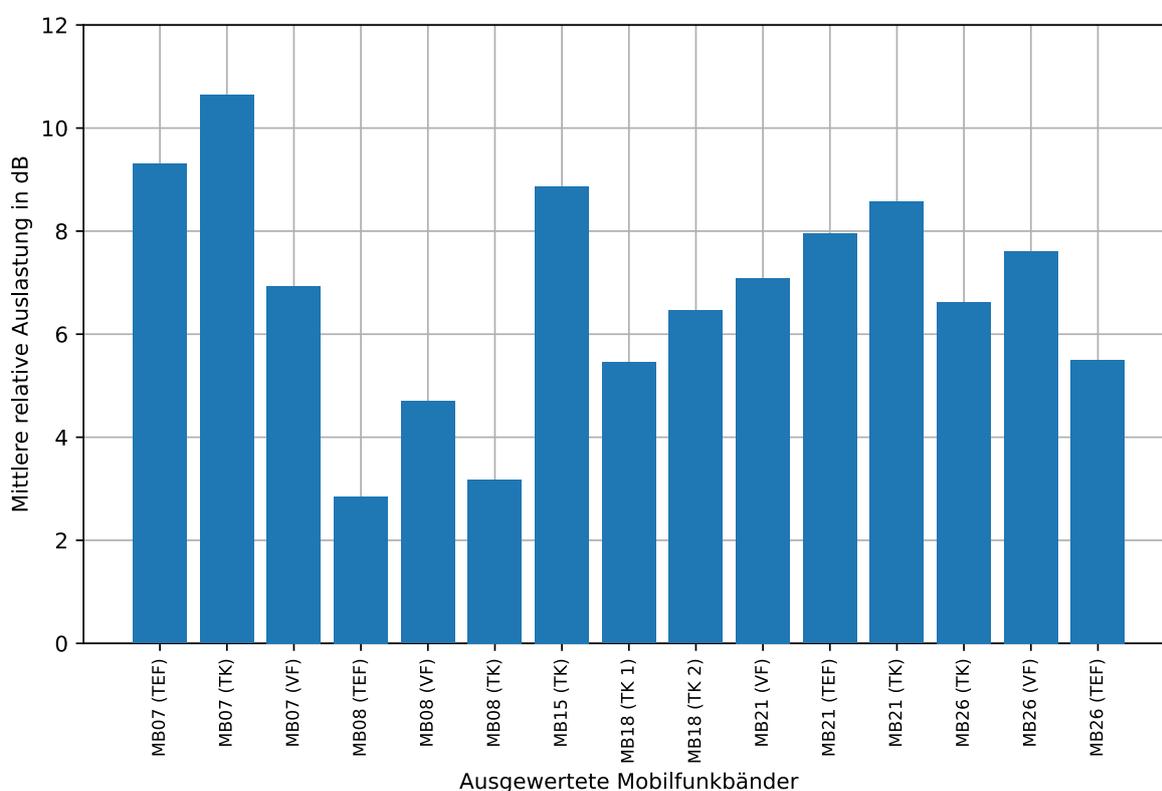


Abb. 5.69: Mittlere Auslastungsfaktoren für die 15 untersuchten 4G (LTE)-/5G (NR)-Bänder in Dezibel.

In Abbildung 5.70 sind jeweils die mittleren Auslastungsfaktoren aller Messpunkte dargestellt. Während die Mobilfunkimmissionen an acht Messpunkten innerorts unterhalb der Nachweisschwelle (analog, codeselektiv oder in beiden Messungen) lagen, war dies an 30 Messpunkten außerorts der Fall. An acht Messpunkten war der mittlere

Auslastungsfaktor negativ. Der Mittelwert aller Messpunkte beträgt 6,5 dB, der Median 5,5 dB.

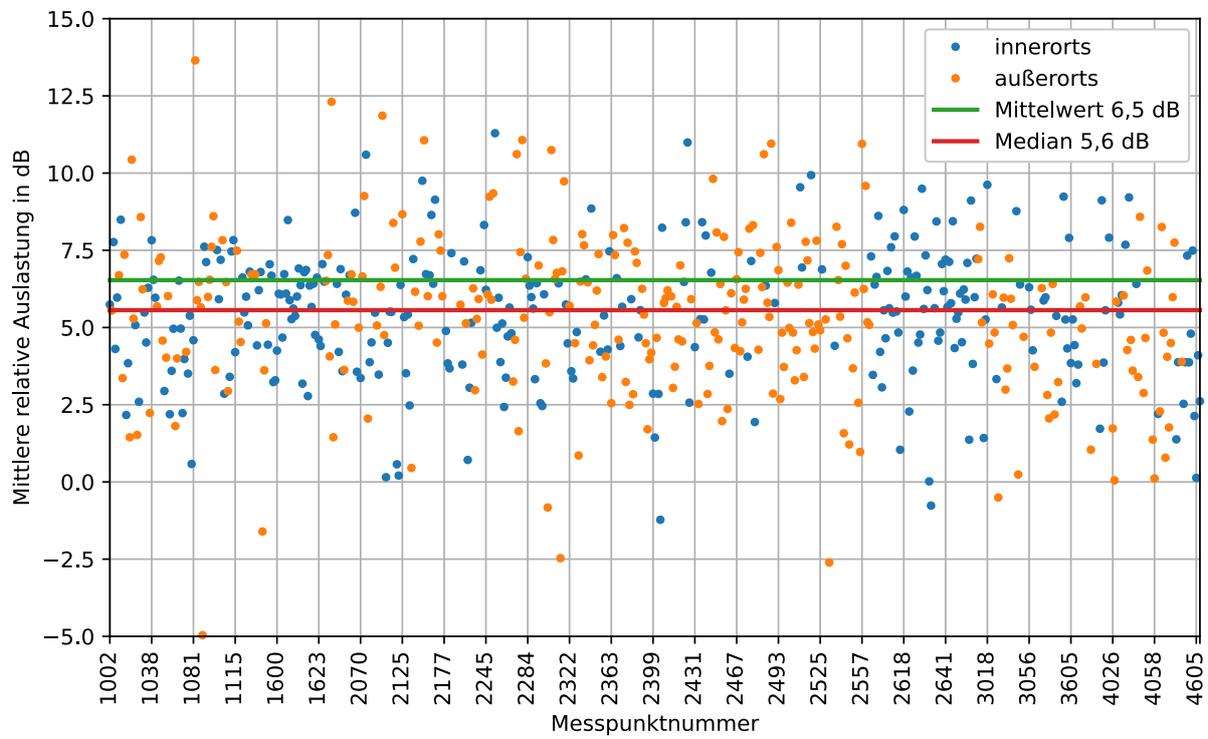


Abb. 5.70: Mittlere Auslastungsfaktoren aller Messpunkte.

6 Diskussion der Ergebnisse

Im Funkwellen-Messprojekt 2024 wurden in Baden-Württemberg an insgesamt 600 Messpunkten, verteilt auf vier Regionen, die dort aktuell vorhandenen hochfrequenten Immissionen, verursacht durch Funksendeanlagen für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 6 GHz messtechnisch ermittelt. Dabei wurde bezüglich der Wahl der Messpunkte an zwei frühere Messkampagnen aus den Jahren 2003 und 2009 angeknüpft.

Insgesamt 499 der 600 Messpunkte wurden aus den früheren beiden Kampagnen übernommen, während 101 Punkte neu definiert wurden, um den Anteil der Messpunkte innerhalb geschlossener Ortschaften zu erhöhen.

Die Auswertung und Präsentation der Ergebnisse orientierte sich ebenfalls an den vorherigen Messkampagnen, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Dennoch ergeben sich Unterschiede im erfassten Frequenzbereich, der Messmethodik und der Auswertung, da sich die Funkstandards im Lauf der Zeit weiterentwickelten, sowie die in Deutschland geltenden gesetzlichen Regelungen bezüglich des Schutzes vor hochfrequenten Feldern (26. BImSchV) im Jahr 2013 novelliert wurden.

Aus der Funkwellen-Messkampagne 2024 können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- An allen 600 Messpunkten lagen die Momentanimmissionen klar unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte. Die höchste ermittelte Grenzwertausschöpfung betrug 10,28%. An allen anderen Messpunkten lag die Grenzwertausschöpfung unter 10%.
- Die Bewertung der Immissionen nach Reizwirkung (Körperstrom) verlor klar an Bedeutung, bedingt durch die Abschaltung zahlreicher leistungsstarker Mittelwellensender in den Untersuchungsgebieten. Die mittlere Grenzwertausschöpfung nach dieser Bewertung lag an den 600 Messpunkten bei lediglich 0,13% und ist daher kaum noch relevant. Im Vergleich dazu betrug die mittlere Grenzwertausschöpfung bezüglich der thermischen Wirkung 1,00%.
- Die nach thermischer Wirkung bewerteten Immissionen erreichen aktuell für das gleiche Messpunktekollektiv (d.h. für die 499 Punkte, an denen 2003, 2009 und 2024 gemessen wurde) einen Mittelwert von 0,97% und weichen damit nicht signifikant von den Resultaten der früheren Messkampagnen ab (1,05% in 2003, 1,01% in 2009). Tendenziell ist also eher eine leichte Abnahme als eine Zunahme der Immissionen zu beobachten.

- Beim Vergleich der Ortslagen der Messpunkte zeigt sich eine höhere mittlere Immission innerhalb geschlossener Ortschaften (1,14% bei Messpunkten innerorts, 0,87% außerorts). Dies ist bei näherer Betrachtung auf das innerorts dichter ausgebaute Mobilfunknetz zurückzuführen.
- Der Ausbau digitaler Funkdienste und die Abschaltung analoger LMK-Sender zeigt sich auch in den Messergebnissen. Während ein Anstieg der Immissionen in den Kategorien digitaler Tonrundfunk (DAB), digitaler Fernsehrundfunk (DVB-T) und Mobilfunk zu verzeichnen ist, sanken die Immissionen beim LMK-Funk deutlich.
- Der analoge UKW-Tonrundfunk, dessen Ausbaustatus sich in den vergangenen Jahrzehnten kaum verändert hat, weist mit einem Mittelwert von 0,26% einen ähnlichen Wert wie in den vorherigen Messkampagnen (0,30% in 2003, 0,24% in 2009) für dasselbe Messpunktekollektiv auf. Dies bestätigt zudem die Vergleichbarkeit der Messungen mit früheren Kampagnen.
- In der erstmalig durchgeführten Zusatzmessung wurde die mittlere Auslastung der gemessenen Mobilfunkbänder, soweit sinnvoll möglich, bestimmt. Im Mittel lag die Auslastung 6,5 dB (d.h. leistungsbezogen um einen Faktor 4,5) unter der rechnerischen Volllast bzw. der maximalen Immission.
- Regelmäßige Referenzmessungen und eine systematische Qualitätskontrolle während der Messkampagne stellten die Verlässlichkeit der Messungen sicher.

Neben der beschriebenen Auswertung über alle Messpunkte wurden auch die einzelnen Messregionen näher betrachtet:

- Die **Messregion Stuttgart** stellte mit 358 Messpunkten die größte Messregion dar. Die höchsten nach thermischer Bewertung ermittelten Immissionen traten in unmittelbarer Nähe zu den großen Rundfunksendern (Fernsehturm Stuttgart, Fernmeldeturm Stuttgart) sowie lokal im unmittelbaren Umfeld von Sendern weiterer Dienste wie dem Mobilfunk oder dem Behördenfunk (BOS) auf. Der in dieser Region beobachtete Maximalwert lag bei 10,28%, der Mittelwert bei 1,04%. Deutliche Veränderungen der Immissionen ergaben sich bezüglich der früheren Messkampagnen vor allem in der Umgebung des inzwischen abgeschalteten Mittelwellensenders Mühlacker (Reduktion der Immissionen) sowie an den Punkten, in deren Nähe neue Senderstandorte (z.B. Mobilfunk, BOS) errichtet wurden (Anstieg der Immissionen).
- In der **Messregion Heidelberg/Mannheim**, die 119 Messpunkte umfasst, wurde eine maximale Immission von 8,07% ermittelt. Auch hier traten die höchsten Immissionen in unmittelbarer Nähe zu den großen Rundfunksendern (Funkturn Heidelberg, Funkturn Mannheim) sowie Sendern für den Mobilfunk oder dem BOS-Funk auf. Der in der Region beobachtete Mittelwert lag bei 1,24%. Veränderungen der Immissionen ergaben sich bezüglich der früheren Messkampagnen vor allem im Bereich des nun abgeschalteten Mittelwellensenders Heidelberg-Wieblingen (Reduktion der Immissionen) sowie an den Punkten, in deren Nähe neue Senderstandorte (z.B. Mobilfunk, BOS) errichtet wurden (Anstieg der Immissionen).

- In der **Messregion Freiburg**, die mit 54 Messpunkten das kleinste Messgebiet darstellt, wurde eine maximale Immission von 3,55% ermittelt. Da es in diesem Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Messungen keine leistungs- starken Sendeanlagen gab, traten die höchsten Immissionen in unmittelbarer Nähe zu Sendern für den Mobilfunk oder dem BOS-Funk auf. Der in der Region beobachtete Mittelwert lag bei 0,85%. Veränderungen der Immissionen ergaben sich bezüglich der früheren Messkampagnen vor allem in der Umgebung des inzwischen abgeschalteten Mittelwellensenders Freiburg-Lehen (Reduktion der Immissionen) sowie an den Punkten, in deren Nähe neue Senderstandorte (z.B. Mobilfunk, BOS) errichtet wurden (Anstieg der Immissionen).
- In der **Messregion Oberschwaben**, die 69 Messpunkte im Bereich Friedrichshafen/Ravensburg umfasst, wurde eine maximale Immission von 5,63% ermittelt. Auch in diesem Untersuchungsgebiet waren zum Zeitpunkt der Messungen keine leistungsstarken Sendeanlagen vorhanden. Die höchsten Immissionen traten in unmittelbarer Nähe zu Sendern für den Mobilfunk oder dem BOS-Funk auf. Der in der Region beobachtete Mittelwert lag bei 0,50%. Veränderungen der Immissionen ergaben sich bezüglich der früheren Messkampagnen vor allem in der Umgebung des inzwischen abgeschalteten Mittelwellensenders Ravensburg- Wilhelmskirch (Reduktion der Immissionen) sowie an den Punkten, in deren Nähe neue Senderstandorte (z.B. Mobilfunk, BOS) errichtet wurden (Anstieg der Immissionen).

7 Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] 26. BImSchV, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [99/519/EG] 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [BOC 03] U. Bochtler, R. Eidher, M. Wuschek, Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Beschreibung und wissenschaftliche Bewertung des Messvorhabens, Botronic GmbH, Stuttgart, 05/2003.
- [GRI 10] Th. Gritsch, W. Mahler, Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2009, Wissenschaftlicher Endbericht, München 04/2010.
- [LAI 14] Länderausschuss für Immissionsschutz, "Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV"; Beschluss der 128. Sitzung der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz am 17. und 18.9.2014 in Landshut"; 09/2014; Internet: www.lai-immissionsschutz.de
- [WUS 23] M. Wuschek, Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Stations and Broadcast Transmitter Sites, Narda Safety Test Solutions GmbH, Ed. 2, Pfullingen, 2023.

8 Anhang

8.1 Aktuell besonders relevante Funksysteme

Im Ergebnisbericht zum Funkwellenmessprojekt 2009 wurden in Abschnitt A1 die wichtigsten im Untersuchungsgebiet vorhandenen Funksysteme näher vorgestellt und erläutert [GRI 10]. In den letzten 15 Jahren wurden einige neue Funksysteme neu eingeführt, andererseits haben aber auch manche Systeme an Bedeutung verloren oder sind sogar komplett außer Betrieb genommen worden, was natürlich einen signifikanten Einfluss auf die an den Messpunkten vorhandenen Hochfrequenzimmissionen ausüben kann. In diesem Abschnitt soll daher ein kurzes Update bezüglich der aktuell relevanten Funksysteme im Vergleich zum Jahr 2009 erfolgen.

8.1.1 Sendeanlagen im Frequenzbereich bis 30 MHz

In diesem Frequenzbereich haben sich sehr große Veränderungen ergeben, denn zwischen 2010 und 2020 wurden deutschlandweit nahezu alle AM-Rundfunksender im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich abgeschaltet. In Baden-Württemberg betrifft dies beispielsweise den Langwellensender Donebach (Neckar-Odenwaldkreis), die Mittelwellensender Stuttgart-Mühlacker, Ravensburg-Wilhelmskirch und Freiburg-Lehen. In den vier Untersuchungsgebieten sind somit alle in diesem Frequenzbereich früher vorhandenen leistungsstarken LMK-Sendeanlagen nicht mehr existent, was Konsequenzen auf die Immissionssituation an den Messpunkten insbesondere im unmittelbaren Umfeld der Anlagenstandorte erwarten lässt. Die beiden in nicht zu großer Entfernung zu den Untersuchungsgebieten in diesem Frequenzbereich noch verbliebenen Funksender sind der Zeitzeichensender DCF77 und der Funkrundsteuersender DCF49 (Standort: Mainflingen, Hessen).

Im Rahmen der Messkampagne wurden diese Funkdienste mithilfe einer spektralen Messung erfasst. Wie im Beispiel in Abbildung 8.1 zu sehen, können einzelne Peaks im Spektrum den entsprechenden Funkdiensten zugeordnet werden, die bis auf eine Ausnahme bekannten Quellen zugeordnet werden konnten.

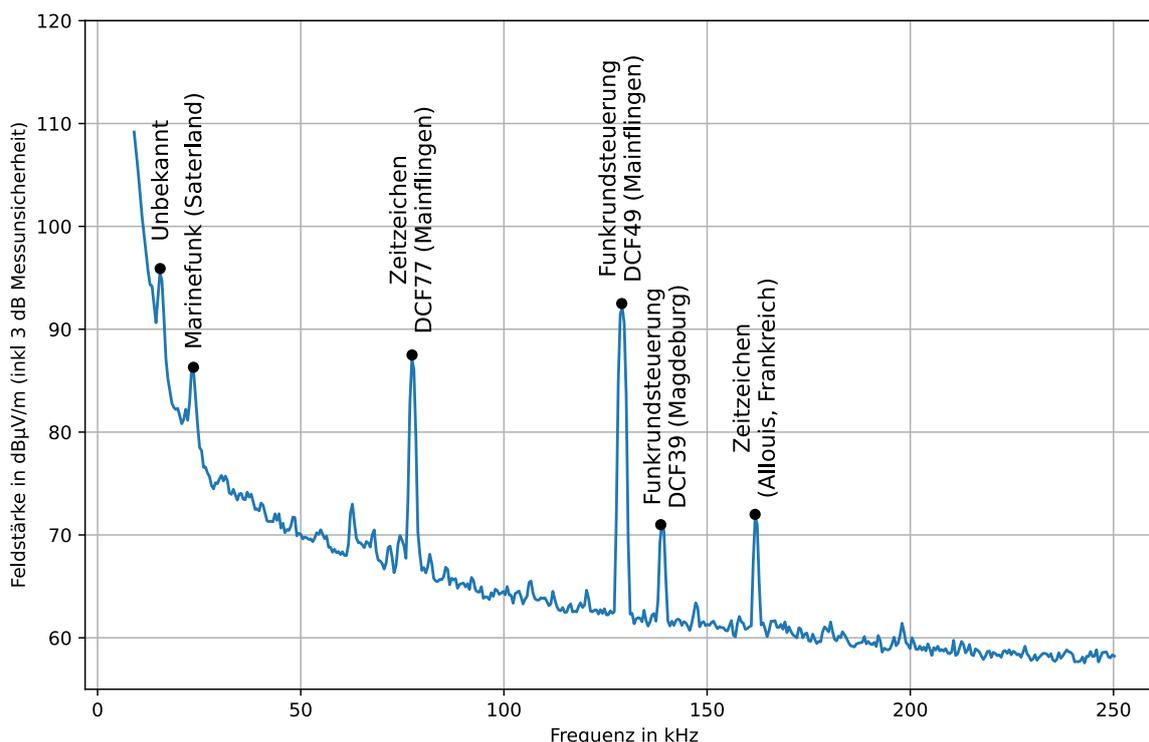


Abb. 8.1: Beispielhaftes Längst- und Langwellenspektrum. Jeder Peak entspricht einem Funkdienst.

8.1.2 Sendeanlagen für UKW und DAB

Obwohl der DAB-Rundfunk aktuell mehr und mehr an Bedeutung gewinnt, sind die Grundnetzsender des UKW-Tonrundfunks aktuell noch weitgehend unverändert in Betrieb. Hier ist also keine nennenswerte Veränderung der Immission zu erwarten.

Beim DAB-Radio haben sich hingegen seit 2010 nennenswerte Veränderungen ergeben. Zum einen wurde durch Inbetriebnahme zusätzlicher Senderstandorte das Netz verdichtet. Außerdem erfolgte bei vielen Senderstandorten eine signifikante Steigerung der abgestrahlten Leistung (von typisch ca. 1 kW ERP auf bis zu 10 kW ERP). Dies führt zu einer Zunahme der Immissionen, die durch DAB-Sender verursacht werden.

Im Rahmen der Messkampagne wurden die Immissionen des UKW-Rundfunks mithilfe einer spektralen Messung erfasst. Ein beispielhaftes Spektrum ist in Abbildung 8.2 abgebildet. Hier entspricht jeder Peak einem Radio-Kanal. Die DAB-Immissionen wurden im Gegensatz dazu als Kanalleistungen erfasst und ausgewertet.

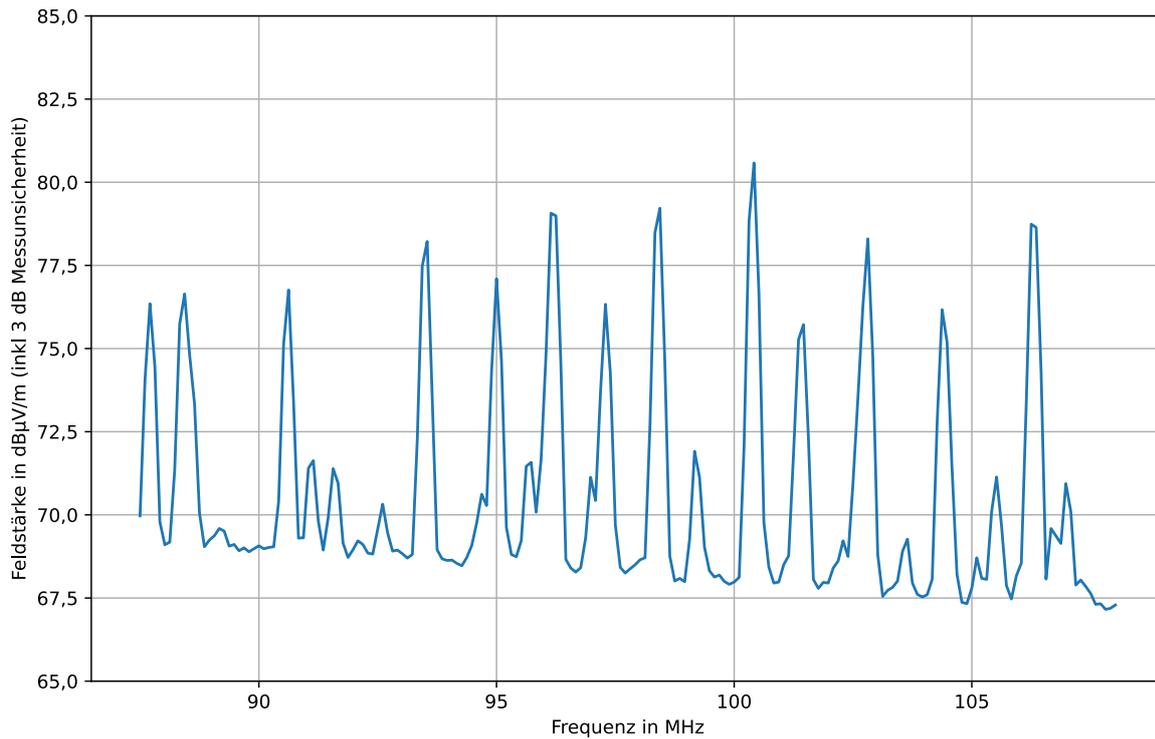


Abb. 8.2: Beispielhaftes UKW-Spektrum. Jeder Peak entspricht einem Radio-Kanal.

Die DAB-Immissionen wurden in der Messkampagne als Kanalleistungen erfasst. Ein beispielhaftes Spektrum, welches mehrere belegte Kanäle mit einer Bandbreite von je 1,536 MHz zeigt, ist in Abbildung 8.3 abgebildet.

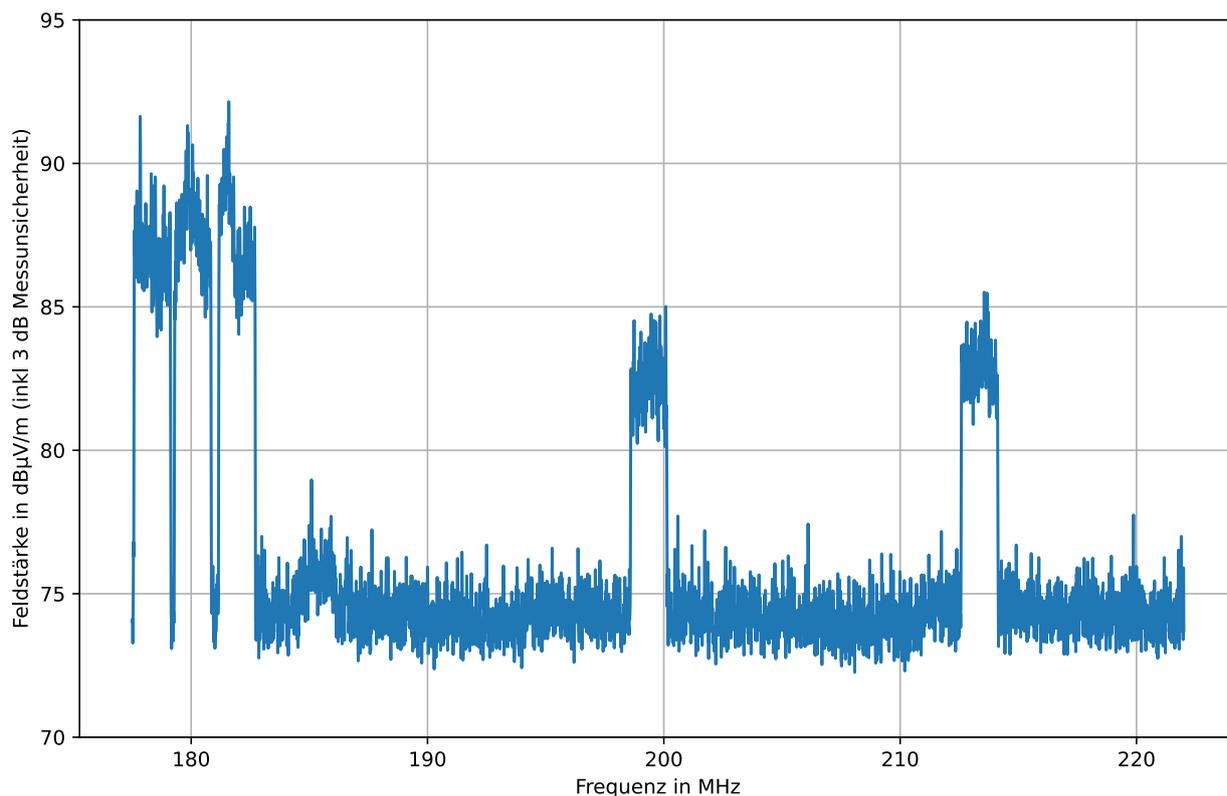


Abb. 8.3: Beispielhaftes DAB-Spektrum. Es sind insgesamt fünf belegte Kanäle zu erkennen.

8.1.3 Sendeanlagen für die terrestrische TV-Versorgung (DVB-T)

Im Jahr 2010 war der Übergang von analoger zu digitaler terrestrischer TV-Versorgung bereits nahezu abgeschlossen, sodass für diesen Frequenzbereich grundsätzlich nicht mehr mit einer nennenswerten Veränderung der Immissionssituation zu rechnen ist. Ende der 10er-Jahre wurde noch der Wechsel von DVB-T auf DVB-T2 als Übertragungsstandard vollzogen. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die entstehenden Immissionen, weil damit keine Veränderung der abgestrahlten Sendeleistungen verbunden war. Durch die Übertragung von Privatsendern und die Umstellung auf hochauflösendere Bildformate (HDTV) kann jedoch die Anzahl der ausgesendeten Träger steigen, was eine Steigerung der Immissionen bewirkt.

Anzumerken ist hier noch, dass nach und nach die Bandbreite, welche für die DVB-T-Übertragung zur Verfügung steht, von 390 MHz (470 bis 860 MHz) auf 224 MHz (470 bis 694 MHz) verringert wurde. Der frei gewordene Frequenzbereich von 694 bis 860 MHz ("Digitale Dividende") wurde dem Mobilfunk zur Verfügung gestellt.

Die DVB-T-Immissionen wurden in der Messkampagne als Kanalleistungen erfasst. Ein beispielhaftes Spektrum, welches zwei belegte Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 8 MHz aufweist, ist in Abbildung 8.4 abgebildet.

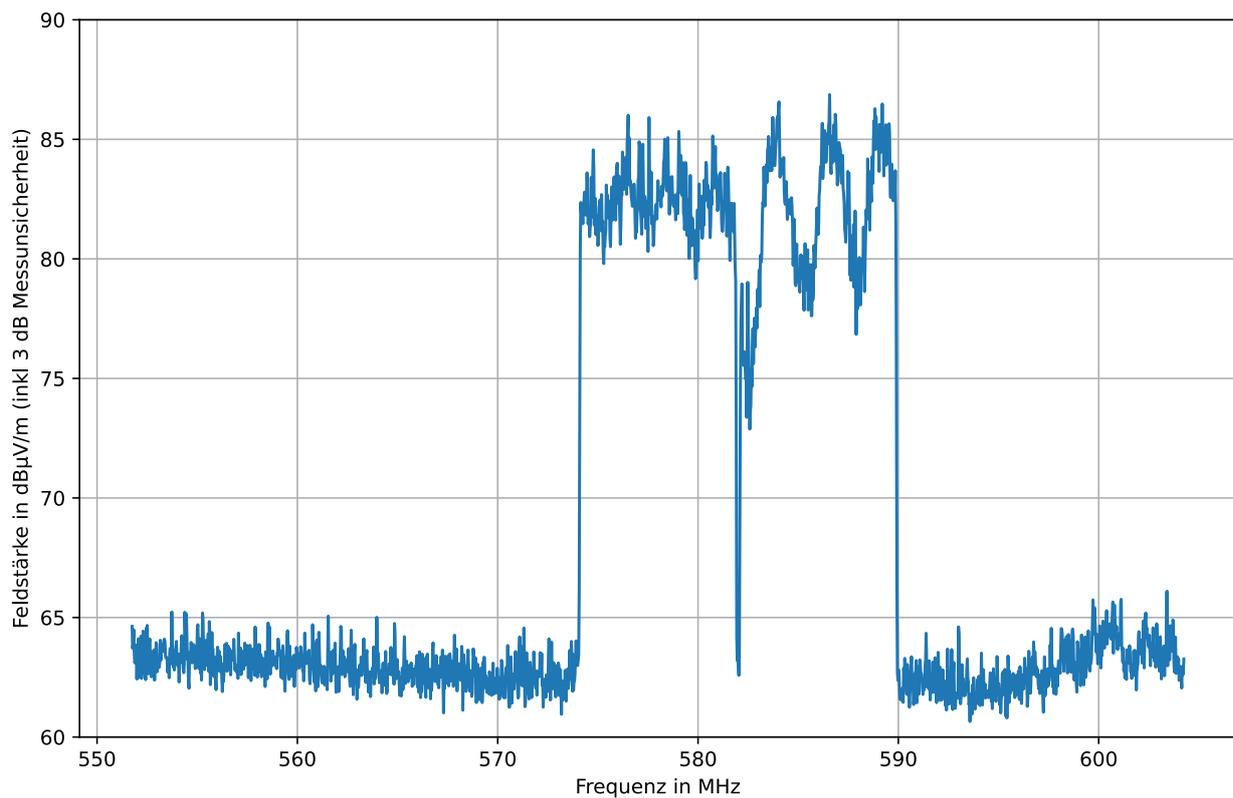


Abb. 8.4: Beispielhaftes DVB-T-Spektrum. Es sind zwei belegte Kanäle zu erkennen.

8.1.4 Sendeanlagen für analogen und den digitalen (TETRA) BOS-Funk

Beim BOS-Funk (z.B. für Polizei, Rettungsdienste, Feuerwehr) war im Jahr 2010 der Wechsel von analoger auf digitale Technologie noch nicht abgeschlossen. Im folgenden Jahrzehnt wurden noch viele TETRA-Senderstandorte in Betrieb genommen. Parallel erfolgte eine Verringerung der Nutzung oder sogar die Außerbetriebnahme analoger BOS-Senderstandorte.

Im Unterschied zu analogen BOS-Senderstandorten, bei denen nur dann ein Funksignal abgestrahlt wird, wenn eine Kommunikationsverbindung aufgebaut ist, strahlen Sendeanlagen des TETRA-Funkstandards - ähnlich wie es bei GSM-Anlagen der Fall ist - permanent gewisse Signalisierungssignale ab, was zu einer permanenten Hochfrequenz-Grundimmission bei diesen Systemen führt. Ein beispielhaftes Spektrum ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

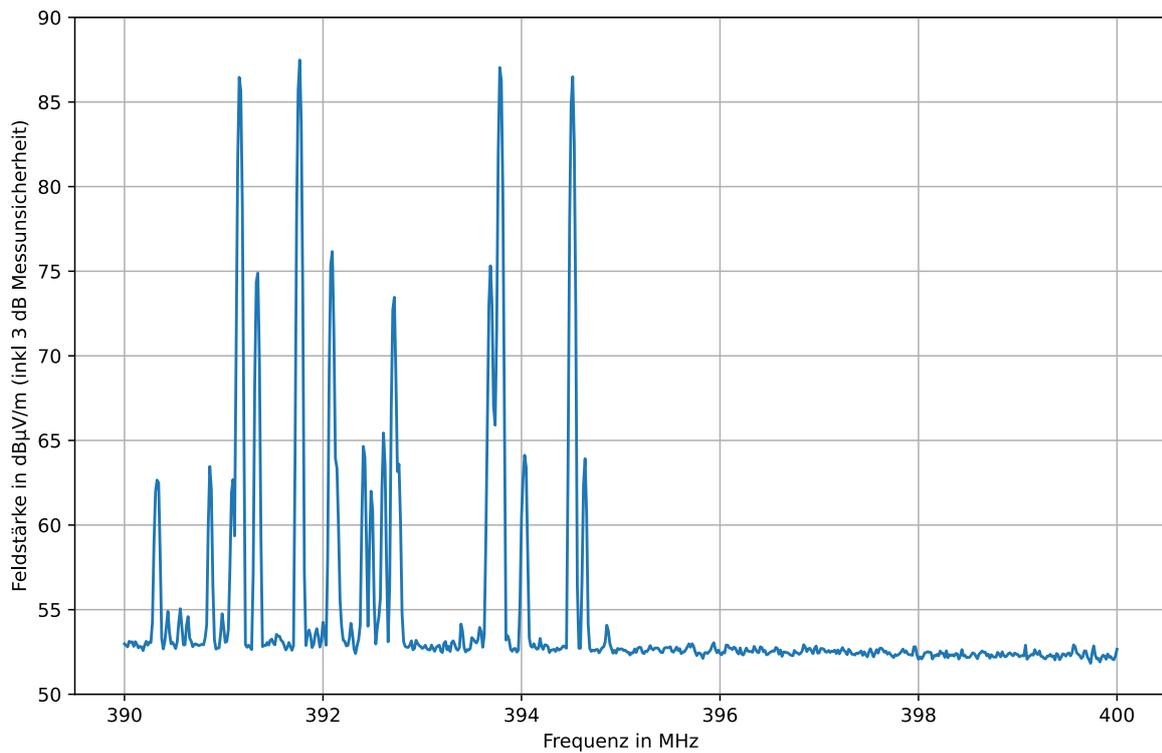


Abb. 8.5: Beispielhaftes Spektrum des digitalen Behördenfunks (TETRA).

8.1.5 Mobilfunksendeanlagen

Große Veränderungen seit der letzten Erhebung ergeben sich bei den Mobilfunksendeanlagen. Klar wird dies beispielsweise durch Betrachtung der Veränderung des im Mobilfunk übertragenen Datenvolumens für den Zeitraum der letzten etwa 20 Jahre (siehe Abbildung 8.6).

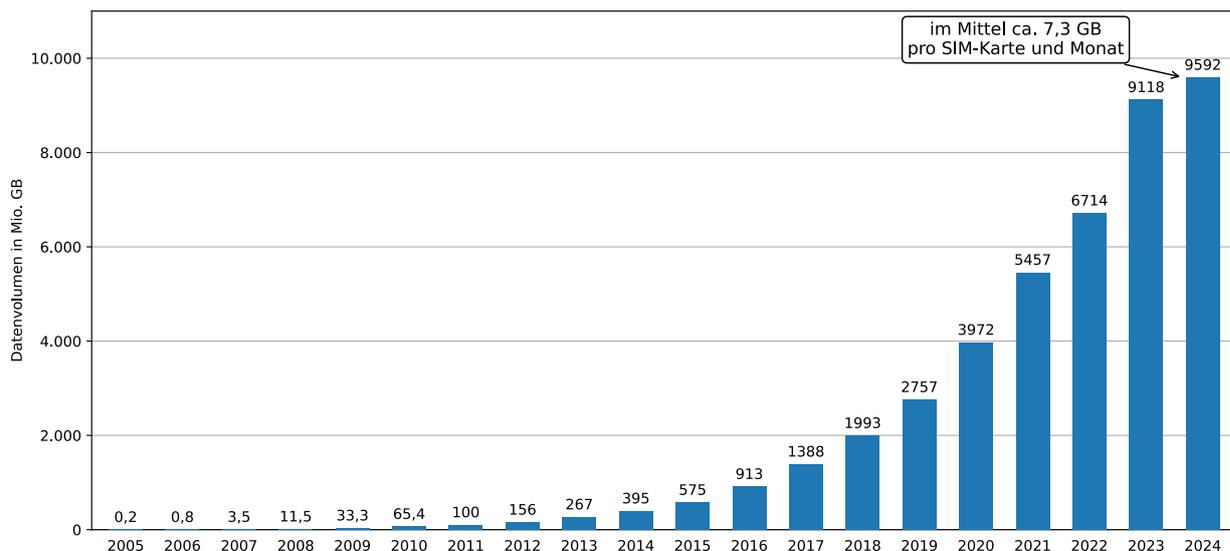


Abb. 8.6: Entwicklung der pro Jahr im Mobilfunk übertragenen Datenmengen (Quelle: Jahresberichte der BNetzA 2010-2024).

In Abbildung 8.6 erkennt man, dass - im Vergleich zu 2010 - die im Jahr 2023 über Mobilfunk übertragene Datenmenge etwa um den Faktor 140 zugenommen hat. Dies konnte nur durch Netzverdichtung, die Nutzung neuer Frequenzbänder sowie leistungsfähigerer Funkstandards (4G (LTE), 5G (NR)) erreicht werden. Zudem wurden in den letzten zehn Jahren auch erhebliche Anstrengungen unternommen, die Netzabdeckung insbesondere im ländlichen Bereich zu verbessern (Schließen von "Funklöchern").

Zum Zeitpunkt der Messungen im Rahmen der Erhebungen 2009 wurden nur in den folgenden drei Frequenzbereichen Mobilfunksendeanlagen betrieben:

MB09: 918 - 960 MHz
 MB18: 1.805 - 1.880 MHz
 MB21: 2.110 - 2.170 MHz
 (MB: "Mobile Broadband")

Nach und nach wurde damit begonnen, das frei gewordene terrestrische TV-Frequenzband (694 bis 860 MHz) für die Mobilkommunikation zu nutzen. Zudem wurden auch noch Bänder im Bereich höherer Frequenzen zwischen 1.450 und 3.800 MHz erschlossen. Somit werden heute zusätzlich die folgenden fünf Bänder aktuell von Mobilfunksendeanlagen für den Downlink genutzt:

MB07: 758 - 788 MHz
 MB08: 791 - 821 MHz
 MB15: 1.452 - 1.492 MHz
 MB26: 2.620 - 2.690 MHz
 MB36: 3.400 - 3.800 MHz

Diese neuen Bänder müssen im Rahmen der aktuellen Erhebungen zusätzlich zu den bisherigen drei Mobilfunkbändern messtechnisch abgedeckt werden.

Ein typisches Spektrum der aktuellen Situation im 900 MHz-Band ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Klar erkennbar ist die Mischnutzung der Standards 4G (LTE) und GSM durch die Provider.

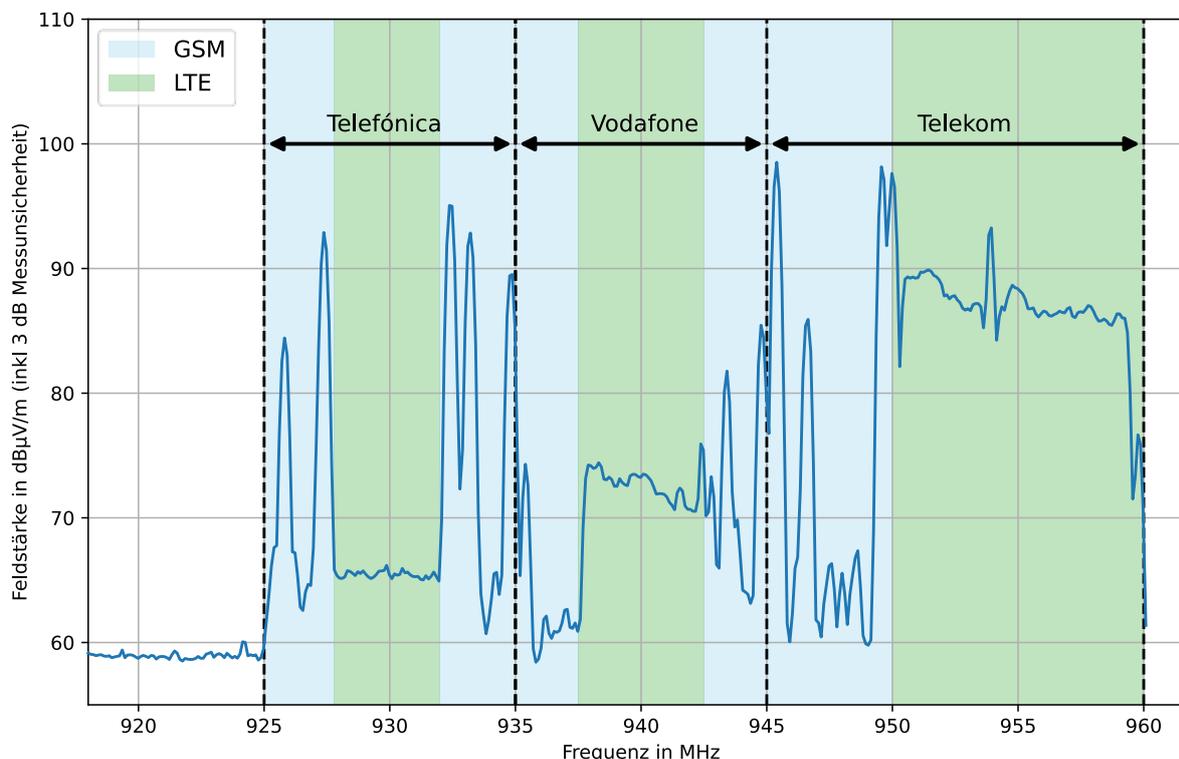


Abb. 8.7: Beispielhaftes Spektrum im 900 MHz-Mobilfunkband. Es sind Mischnutzungen der Standards 4G (LTE) und GSM zu erkennen.

8.2 Messpunkte

Im Rahmen des Funkwellenmessprojektes wurden in der Vergangenheit bereits zweimal Messungen an Orten in den vier repräsentative Regionen Baden-Württembergs (Stuttgart, Mannheim/Heidelberg, Freiburg und Oberschwaben) vorgenommen (Aufteilung: Siehe Abbildung 8.9). Im Rahmen des "Funkwellenmessprojekts 2003" wurden die Immissionen an insgesamt 895 Messpunkten, im "Funkwellenmessprojekt 2009" an 598 Messpunkten erfasst [BOC 03], [GRI 10].

Das aktuelle Projekt wiederholt die Immissionsmessungen an 499 Punkten, die bereits im Rahmen der beiden früheren Messkampagnen untersucht wurden, um hieraus durch eventuell vorhandene Veränderungen der Immissionssituation erkennen zu können. 101 Messpunkte, welche sich alle innerorts befinden, wurden neu in das Programm aufgenommen.

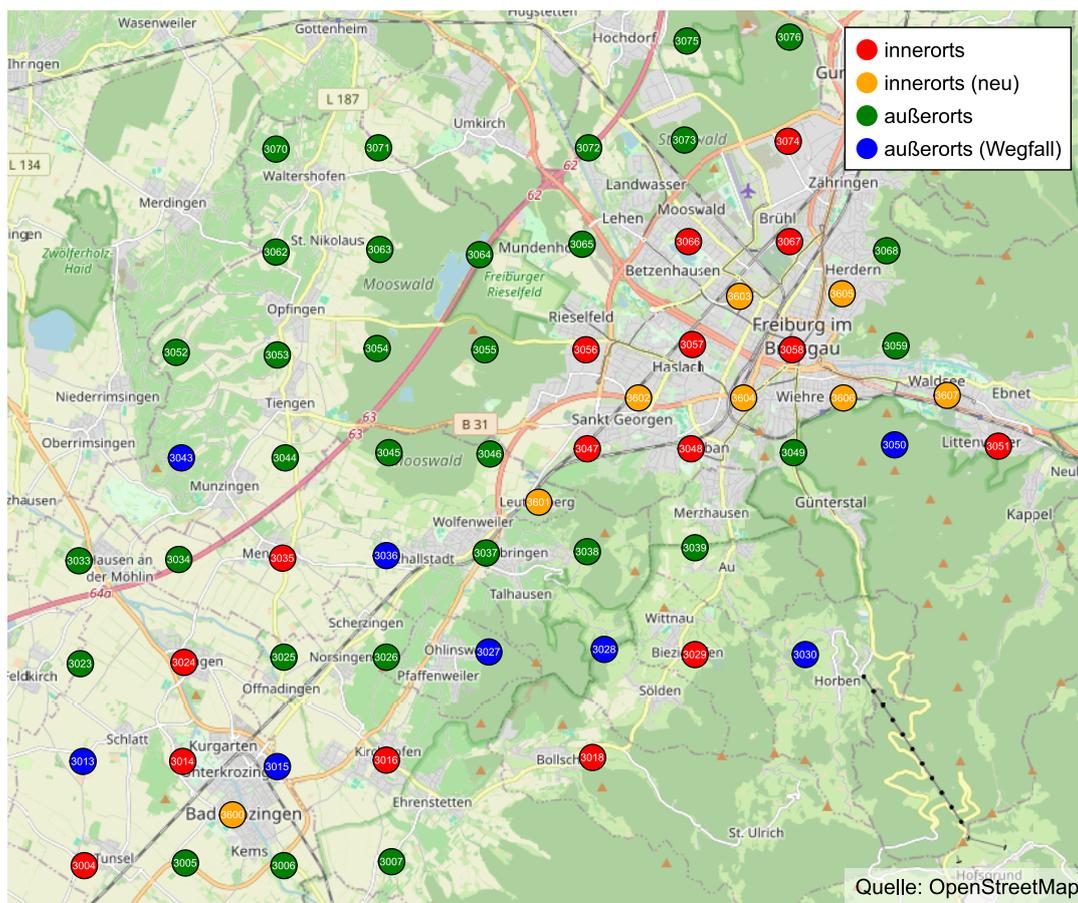


Abb. 8.8: Messpunkttraster im Untersuchungsgebiet "Freiburg" (Messkampagne 2024).

Abbildung 8.8 zeigt exemplarisch an der Untersuchungsregion Freiburg das sich typisch ergebende Messpunkteraster für die Messkampagne 2024. Hierbei haben die verschiedenen Farben der Punktemarkierung folgende Bedeutung:

- Punkte (innerorts), auch bereits im Rahmen der Messkampagne 2009 gemessen
- Punkte (innerorts), im Rahmen der Messkampagne 2024 erstmals gemessen
- Punkte (außerorts), auch bereits im Rahmen der Messkampagne 2009 gemessen
- Punkte (außerorts), im Rahmen der Messkampagne 2024 nicht mehr gemessen

In Abbildung 8.8 erkennt man, dass die acht neu dazu gekommenen innerörtlichen Messpunkte per Zufallsauswahl immer in die Mitte zwischen vier "Altmesspunkte" gelegt wurden (orange Punkte), sodass innerorts der Messpunktdichte tendenziell vergrößert wird. Im Messprogramm 2009 wurde die Zahl der Messpunkte gegenüber 2003 von etwa 900 auf zirka 600 verringert. Dies geschah vorwiegend durch Streichung von außerorts gelegenen Messpunkten. Dadurch erhöhte sich der Anteil der innerörtlichen Messpunkte von 25 Prozent im Jahr 2003 auf 33 Prozent im Jahr 2009.

Wie oben erwähnt, wurde 2024 gegenüber der Messkampagne 2009 die Zahl an Messpunkten, die außerorts liegen, durch Zufallsauswahl nochmals verringert (siehe

blaue Punkte in Abbildung 8.8). Stattdessen wurden an den 101 neu festgelegten Punkten (alle innerorts) erstmalig Messungen vorgenommen. Damit bleibt die Gesamtanzahl der Messpunkte mit aktuell 600 gegenüber den Messungen in 2009 (598 Punkte) nahezu unverändert, nur der Anteil der Messpunkte innerorts hat - wie vom Auftraggeber gewünscht - nochmals deutlich zugenommen. Im Projekt 2024 war nun die Zahl der Messpunkte außerorts und innerorts mit jeweils 300 gleich groß.

Die Verteilung der Messpunkte auf die vier Untersuchungsgebiete ist für jede der drei Messkampagnen in Abbildung 8.9 dargestellt. Sie ist in allen Kampagnen im Wesentlichen ähnlich.

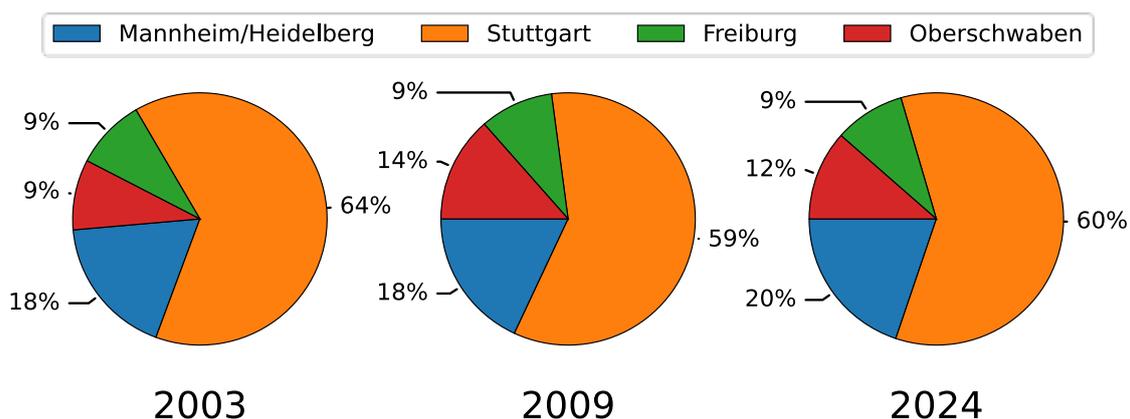


Abb. 8.9: Aufteilung der Messpunkte auf die vier Untersuchungsgebiete.

Für die aktuelle Kampagne ergeben sich insgesamt je 300 Messpunkte inner- und außerorts. Betrachtet man die Verteilung innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete (Abbildung 8.10), so liegt der Anteil der innerorts gelegenen Messpunkte zwischen 41% (Oberschwaben) und 66% (Mannheim-Heidelberg). Dieser Unterschied ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Besiedlungsdichte in den Untersuchungsgebieten zurückzuführen. Bei einem festen Messpunktraster in einem Gebiet mit dichter Besiedlung (Mannheim/Heidelberg) resultieren automatisch mehr innerorts gelegene Messpunkte, als es in ländlicheren Untersuchungsgebieten der Fall ist.

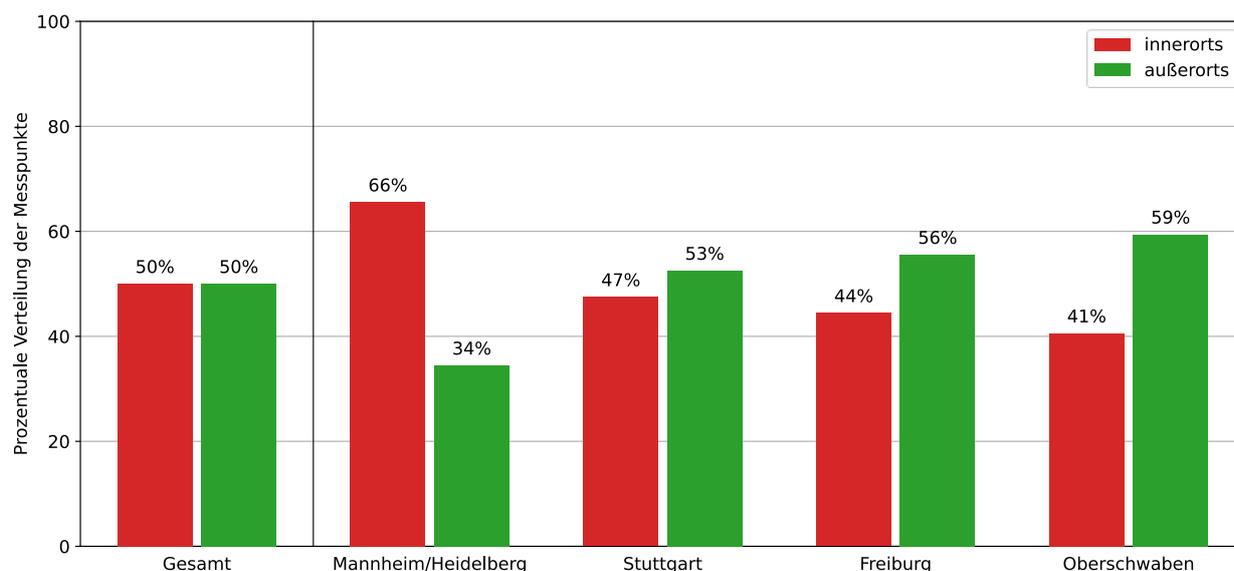


Abb. 8.10: Aufteilung der Messpunkte nach Lage inner- und außerorts im Jahr 2024.

Begonnen wurden die Messungen im September 2023 im Untersuchungsgebiet Stuttgart. Danach folgten die Messungen in den Untersuchungsgebieten Mannheim/Heidelberg, Oberschwaben und Freiburg. In den Spätherbst- und Wintermonaten beziehungsweise einer Schlechtwetterphase im Frühling wurden keine Messungen vorgenommen (Mitte Oktober 2023 bis Mitte Mai 2024). Im Jahr 2023 wurden nur 44 der 600 Messpunkte abgearbeitet, der überwiegende Teil der Messungen erfolgte also im Jahr 2024. Abgeschlossen wurden die Messungen Ende August 2024 im Untersuchungsgebiet Freiburg.

Die Durchführung der Messungen war auf Werktage zwischen 08:00 und 20:00 Uhr beschränkt ("busy hours"), sodass auch eine typische Auslastung der Mobilfunksendeanlagen zu erwarten war. Zum Schutz der Messausrüstung wurden bei nennenswertem Niederschlag keine Messungen vorgenommen.

8.3 Details zu Messung und Ergebnisauswertung

8.3.1 Novellierung der 26. BImSchV im Jahr 2013

Im Jahr 2013 erfolgte eine Novellierung der 26. BImSchV, was bei der aktuellen Kampagne zu einigen Konsequenzen bei der Auswertung der Messergebnisse im Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz im Vergleich zu den früheren Kampagnen führt.

Da in der 26. BImSchV vor der Novellierung für den Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz (noch) keine Grenzwerte vorhanden waren, wurden bei der Auswertung der Messungen im Rahmen der Kampagnen 2003 und 2009 die Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [99/519/EG] herangezogen [GRI 10].

Die Novellierung der 26. BImSchV schließt diese Lücke. Seit 2013 liefert die Verordnung für den kompletten hier betrachteten Frequenzbereich von 9 kHz bis 6 GHz Grenzwerte und Summationsvorschriften sowohl zur Bewertung der thermischen Wirkung als auch der Reizwirkung durch induzierte Körperströme. Die Grenzwerte der 26. BImSchV für die thermische Wirkung sind in Tabelle 8.1 dokumentiert.

Tab. 8.1: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (thermische Wirkungen). Für die Frequenz f ist in die Formeln der Zahlenwert in MHz einzusetzen.

Frequenz f in MHz	Effektivwert, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle	
	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m
0,1 - 1	87	$0,73/f$
1 - 10	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$
10 - 400	28	0,073
400 - 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000 - 300000	61	0,16

Aus Tabelle 8.1 erkennt man, dass in zwei Frequenzbereichen (1 bis 10 MHz bzw. 0,4 bis 2 GHz) die Grenzwerte für die thermische Wirkung frequenzabhängig sind.

Wirken gleichzeitig Felder unterschiedlicher Frequenzen am Immissionsort mit nennenswerter Stärke ein, was aktuell bei der großen Anzahl an vorhandenen Funksendeanlagen sehr häufig der Fall ist, dann ist in Anlehnung an Anhang 2b der 26. BImSchV gemäß Gleichung 8.1 ein grenzwertbezogener Ausschöpfungsgrad $SUM_{\text{thermisch}}$ mittels quadratischer Summation der von den einzelnen Signalen stammenden Grenzwert-Ausschöpfungsgrade zu bilden (d.h. eine "feldstärkebezogene Summenimmission"). Für das betrachtete elektrische Feld errechnet sich dieser nach Gleichung 8.1:

$$SUM_{\text{thermisch}} = \sqrt{\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2} \quad (8.1)$$

Dabei bezeichnen E_i die gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i und $E_{L,i}$ den Grenzwert für die elektrische Feldstärke bei Frequenz i nach Tabelle 8.1.

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung 8.1 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen Feldstärke-Grenzwertes in der Summe über alle einwirkenden Signale. Dieser darf den Wert 100 (Prozent) nicht überschreiten.

Die in Tabelle 8.1 angegebenen Grenzwerte basieren auf den thermischen Wirkungen hochfrequenter Felder, die erst ab einer Frequenz von 100 kHz relevant werden. Zusätzlich ist noch die im niederfrequenten Bereich dominierende Reizwirkung elektromagnetischer Felder zu berücksichtigen. Auch hierfür legt die 26. BImSchV Grenzwerte fest. Für den in diesem Projekt bezüglich Reizwirkungen relevanten Frequenzbereich von 9 kHz bis 10 MHz sind sie in Tabelle 8.2 dokumentiert.

Tab. 8.2: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (Reizwirkungen).

Frequenz	Elektrische Feldstärke	Magnetische Feldstärke
f in MHz	E_{eff} in V/m	H_{eff} in A/m
0,009 - 10	83	21,5

Für die Bewertung der Reizwirkung gilt im relevanten Frequenzbereich also ein konstanter Grenzwert von 83 V/m für das elektrische Feld.

Wirken gleichzeitig Felder unterschiedlicher Frequenzen am Immissionsort mit nennenswerter Stärke ein, dann ist in Anlehnung an Anhang 2a der 26. BImSchV auch für die Reizwirkung ein grenzwertbezogener Ausschöpfungsgrad $SUM_{\text{Reizwirkung}}$ zu bilden (Gleichung 8.2), allerdings hier mittels linearer Summation der von den einzelnen Signalen stammenden Grenzwert-Ausschöpfungsgrade.

$$SUM_{\text{Reizwirkung}} = \sum_{i=9 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} \quad (8.2)$$

Dabei bezeichnen E_i die gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i und $E_{L,i}$ den Grenzwert für die elektrische Feldstärke bei Frequenz i nach Tabelle 3.2 (83 V/m).

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung 8.2 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen Feldstärke-Grenzwertes in der Summe über alle einwirkenden Signale. Dieser darf den Wert 100 (Prozent) nicht überschreiten.

Die Vorgaben der 26. BImSchV sind somit eingehalten, wenn an einem Messort beide ermittelten Summenimmissionswerte unter 100 Prozent bleiben.

Anders als bei Ton- und TV-Rundfunksendern, die permanent eine konstante Leistung abstrahlen, ist die von Mobilfunkantennen emittierte Leistung von der aktuellen Auslastung (d.h. vornehmlich von der aktuell übertragenen Datenmenge) abhängig. Daher stellen die im Rahmen des Messprojektes ermittelten Feldstärkewerte nur die zum Zeitpunkt der Messung aktuell vorhandene, nicht jedoch die maximal mögliche Immission dar.

Da die Vorgaben der 26. BImSchV jedoch auch noch bei höchster betrieblicher Auslastung der verursachenden Sendeanlagen einzuhalten sind, kann mit den Ergebnissen der Messkampagne genau genommen noch kein finaler Nachweis der Grenzwerteinhaltung geführt werden. Dies ist auch nicht die Aufgabenstellung des Funkwellenmessprojektes. Wie bereits erläutert, soll mittels der an einer großen Zahl von Punkten gewonnenen Messergebnisse die typische Immissionssituation bezüglich hochfrequenter Felder in Baden-Württemberg sowie eventuell vorhandene signifikante Veränderungen im Vergleich zu den Erhebungen aus den Jahren 2003 beziehungsweise 2009 dargestellt werden.

Der Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV in der Umgebung von Funksendeanlagen mit mehr als 10 W EIRP erfolgt in Deutschland grundsätzlich im Rahmen des obligatorischen Standortbescheinigungsverfahrens der BNetzA.

8.3.2 Elektrische Feldstärke als Beurteilungsgröße

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im sogenannten "Fernfeld" einer Strahlungsquelle über den Feldwellenwiderstand des Freiraumes, $Z_0 \approx 377\Omega$, ineinander überführbar und beinhalten dieselbe Information. Bei allen im Rahmen dieses Projektes vermessenen Punkten kann von Fernfeldbedingungen ausgegangen werden, da diese immer weit genug von den felderzeugenden Quellen (Sendeantennen) entfernt waren.

Zudem sind die Grenzwerte der 26. BImSchV im hier relevanten Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 300 GHz so festgelegt, dass im Fernfeld bei Einhaltung des Grenzwertes für das elektrische Feld automatisch auch der Grenzwert für das magnetische Feld unterschritten wird. Im Rahmen des aktuellen Messprojektes wurde – so wie auch bei den früheren Erhebungen – nur eine der beiden Größen, nämlich die elektrische Feldstärke E als Beurteilungsgröße für die Immission herangezogen.

Angemerkt werden sollte an dieser Stelle jedoch, dass im Frequenzbereich unterhalb von 30 MHz genau genommen nicht die elektrische Feldstärke gemessen wird, sondern die Messantenne das vorhandene Magnetfeld ermittelt und vom Feldanalysator daraus unter der Annahme, dass sich der Messpunkt im Fernfeld der Strahlungsquellen befindet, mittels der Freiraumimpedanz die äquivalente elektrische Feldstärke berechnet und angezeigt wird. Diese Besonderheit ist nicht neu, auch in den beiden früheren Messkampagnen (2003 und 2009) wurde bis 30 MHz das Magnetfeld ermittelt und daraus unter Fernfeldannahme das elektrische Feld errechnet, da für die Beurteilung der Immissionen durchgehend die elektrische Feldstärke herangezogen werden soll.

8.3.3 Konfiguration des Feldanalysators

Grundphilosophie des Funkwellenmessprojektes war es von Anfang an, sehr detaillierte, frequenzmäßig fein aufgelöste Immissionsmessungen vor Ort vorzunehmen. Dadurch wird es beispielsweise möglich, aus den Resultaten auf die Verursacher der Immission zu schließen. Allerdings bedeutet dies, dass vor Ort eine sehr große Anzahl an Einzelmessungen durchzuführen sind.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Resultate sicherzustellen, orientieren sich die Messungen der aktuellen Kampagne - so weit möglich - an der Vorgehensweise der beiden früheren Messkampagnen. Da jedoch seit 2009 einige neue Funkssysteme in Betrieb genommen wurden (z.B. LTE, TETRA, 5G), müssen die Messverfahren zum Teil auch angepasst werden.

Zudem bedingt der technische Fortschritt der letzten 20 Jahre, dass nicht mehr die gleiche Messausrüstung wie im Jahr 2003 bzw. 2009 eingesetzt wird. Damit die Messungen in immer gleicher Art und Weise ablaufen und der Mensch als Unsicherheitsfaktor möglichst nicht zur Geltung kommen kann, wurde für die aktuelle Messkampagne erstmals eine nahezu komplett automatische Ablaufsteuerung der Messung entwickelt. Es wäre ungemein zeitraubend und fehleranfällig, wenn die inzwischen sehr vielen (ca. 40) am Messpunkt vorzunehmenden Einzelmessungen noch - wie früher - manuell nacheinander aufgerufen und abgespeichert würden müssten. Moderne Messgeräte bieten inzwischen die Möglichkeit, zweckmäßige Messroutinen zu erstellen und diese vor Ort automatisch ablaufen zu lassen [WUS 23].

Es ist jedoch trotzdem nicht möglich, die Gesamtmessung in einem Durchgang vorzunehmen, denn aufgrund des großen zu erfassenden Frequenzbereichs muss die Messantenne gewechselt werden. Zur Erfassung des relevanten Frequenzbereichs von 9 kHz bis 6 GHz sind insgesamt drei unterschiedliche Antennen notwendig. Die Gesamtmessung ist daher in drei Messroutinen unterteilt, wobei für jede dieser "Teilmessungen" eine andere Messantenne mit dem Feldanalysator zu verbinden ist. Die Messroutinen decken hierbei folgende Frequenzbereiche ab:

- **Routine 1:** Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz (Messantenne: 3AX 9k-250 MHz)
- **Routine 2:** Frequenzbereich von 30 MHz bis 700 MHz (Messantenne: 3AX 27M-3G)
- **Routine 3:** Mobilfunkfrequenzbereich von 700 MHz bis 3,8 GHz plus weitere Bänder zwischen 1 und 6 GHz (Messantenne: 3AX 420M-6G)

Messroutine 1 erfasst Signale im Frequenzbereich des Längst- bis Kurzwellenfunks, mit Routine 2 werden insbesondere die Signale von UKW-, DAB-, und DVB-T-Sendern sowie von BOS- (TETRA-) Funkstationen erfasst. Messroutine 3 umfasst einerseits alle Signale von Mobilfunkbasisstationen und komplettiert anschließend die Messung sonstiger Funksignale bis 6 GHz. Der Zeitbedarf für die Durchführung der automatisierten "Hauptmessung" (Durchlauf der Messroutinen 1 bis 3 inklusive Antennenwechsel) beträgt etwa zehn Minuten.

Die zusätzlich im Projekt durchzuführenden speziellen Messungen von LTE- und 5G-Signalen zum Zweck eines Vergleichs aktueller und maximal möglicher Immission erfolgen, getrennt zur "Hauptmessung", mit einem zweiten Messaufbau. Hierfür wurde eine vierte Messroutine entwickelt. Der Zeitbedarf für die Durchführung dieser "Zusatzmessung" (Durchlauf von Messroutine 4 inklusive Auf- und Abbau) beträgt ebenfalls etwa zehn Minuten. Diese Messung läuft automatisch parallel zur Hauptmessung und generiert daher nur wenig zusätzlichen Zeitbedarf.

Die Messroutinen 1 bis 3 nutzen die Betriebsart "Safety Evaluation" des Feldanalyzers (SRM-3006 von Narda STS). In den folgenden Abbildungen (8.11 - 8.15) sind die detaillierten Einstellungen (z.B. gemessene Frequenzbänder) für die einzelnen Routinen dokumentiert.

In Messroutine 3 werden zunächst alle Mobilfunkbänder gemessen (erste Zeile der Tabelle; Details dazu in der kleinen Tabelle darunter). Zusätzlich erfasst Messroutine 3 möglicherweise relevante Signale in den Frequenzbändern oberhalb 1 GHz, die nicht vom Mobilfunk, jedoch von anderen Funkssystemen genutzt werden.

An den Messpunkten im näheren Umfeld des Flughafens Stuttgart wurde zusätzlich auch die Immissionen, verursacht durch das dort vorhandene ASR-Flughafenradar ermittelt. Diese Messung wurde nicht in den automatischen Ablauf integriert, sondern manuell gestartet.

Bei den in Abbildung 8.14 grün eingerahmten Messungen handelt es sich um spektrale Übersichtsmessungen. Diese sollen bei Unklarheiten eine spektrale Betrachtung der untersuchten Mobilfunkfrequenzbänder im Rahmen der Auswertung der Messungen ermöglichen. Details zur Momentanimmisionsmessung finden sich in Abbildung 8.15.

Measurement Routine Information						
Long Name		001_LUBW_09 kHz - 30 MHz				
Configuration						
Measurement Routine						
Setup Name	Storing Condition	Measurement Time	No. of Runs	Automatic Next Step	Text	
28_LW_9k-250k	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	150	ON	▼ LW_9 kHz - 250 kHz	
28_MW_250k-1,5M	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	150	ON	▼ MW_250 kHz - 1,5 MHz	
28_KW_1,5M-10M	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	150	ON	▼ KW_1,5 MHz - 10 MHz	
28_KW_10M-20M	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	150	ON	▼ KW_10 MHz - 20 MHz	
28_KW_20M-30M	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	150	ON	▼ KW_20 MHz - 30 MHz	

Abb. 8.11: Messroutine 1: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter.

Measurement Routine Information					
Long Name 002_LUBW_27 MHz - 694 MHz_Broadcast					
Configuration					
Measurement Routine					
Setup Name	Storing Condition	Measurement Time	No. of Runs	Automatic Next Step	Text
33_27-75 MHz	▼ No. of Runs ▼	00:00:10	50	ON	▼ 27 - 75 MHz
30_BOS_4m	▼ No. of Runs ▼	00:00:10	50	ON	▼ 75 - 87,5 MHz
27_UKW	▼ No. of Runs ▼	00:00:10	50	ON	▼ 87,5 - 108 MHz
34_108-165 MHz	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	50	ON	▼ 108 - 165 MHz
31_BOS_2m	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	50	ON	▼ 165 - 174 MHz
23_DAB	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	20	ON	▼ 174 - 230 Mz
35_230-390 MHz	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	50	ON	▼ 230 - 390 MHz
04_TETRA	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	20	ON	▼ 390 - 400 MHz
32_TETRA_Level Recorder_Full Band	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	50	ON	▼ TETRA_Bandintegration 390 - 400 MHz
36_400-465 MHz	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	20	ON	▼ 400 - 465,5 MHz
37_465-470 MHz_Funkruf	▼ No. of Runs ▼	00:00:10	100	ON	▼ 465,5 - 470 MHz
24_DVB-T2	▼ No. of Runs ▼	00:00:00	20	ON	▼ 470 - 694 MHz

Abb. 8.12: Messroutine 2: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter.

Measurement Routine Information						
Long Name 003_LUBW_Mobilfunk_Sonstiges						
Configuration						
Measurement Routine						
Setup Name	Storing Condition	Measurement Time	No. of Runs	Automatic Next Step	Text	
12_LUBW_Mobile_aktuell_kurz	No. of Runs	00:00:00	10	ON	Akt. Imm. Mobilfunk 0,7 - 3,8 GHz	
12_LUBW_MB36	No. of Runs	00:00:00	10	ON	Akt. Immission MB36	
39_703-1.805 MHz	No. of Runs	00:00:00	64	ON	703 - 1805 MHz	
16_DECT	No. of Runs	00:00:00	500	ON	DECT Overview	
16_DECT_LEVEL_REC_FULL BAND	No. of Runs	00:00:00	100	ON	DECT Level Recorder 1880 - 1900 MHz	
21_WLAN_Overview	No. of Runs	00:00:00	300	ON	WLAN 2,45 GHz Overview	
22_WLAN_2,4_LEVEL_REC_CH 1	No. of Runs	00:00:00	100	ON	WLAN 2,45 GHz, CH 1_X-Axis	
22_WLAN_2,4_LEVEL_REC_CH 5	No. of Runs	00:00:00	100	ON	WLAN 2,45 GHz, CH 5_X-Axis	
22_WLAN_2,4_LEVEL_REC_CH 9	No. of Runs	00:00:00	100	ON	WLAN 2,45 GHz, CH 9_X-Axis	
22_WLAN_2,4_LEVEL_REC_CH 13	No. of Runs	00:00:00	100	ON	WLAN 2,45 GHz, CH 13_X-Axis	
39_2900-5100 MHz	No. of Runs	00:00:00	32	ON	2900 - 5100 MHz	
22_WLAN_5G	No. of Runs	00:00:00	100	ON	WLAN_Overview 5 GHz-Band	
22_WLAN_5GHz_Safety	No. of Runs	00:00:00	4	ON	WLAN 5 GHz_alle Kanäle	

Service Table Information			
Short Name 0_LUBW_Mobile_k			
Long Name 0_LUBW_Mobile_kurz			
Service Table			
Lower Frequency	Upper Frequency	Name	RBW
758 MHz	788 MHz	MB07	10 kHz
791 MHz	821 MHz	MB08	100 kHz
918 MHz	960 MHz	MB09	100 kHz
1,452 GHz	1,492 GHz	MB15	200 kHz
1,805 GHz	1,88 GHz	MB18	200 kHz
2,11 GHz	2,17 GHz	MB21	200 kHz
2,62 GHz	2,69 GHz	MB26	200 kHz
3,4 GHz	3,8 GHz	MB36	20 kHz

Abb. 8.13: Messroutine 3: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter.

Routine 4 steuert die "Zusatzmessung" und erfasst hierzu mittels der "codeselektiven" Messmethode [WUS 23] bestimmte, mit konstanter Leistung von 4G (LTE)- und 5G (NR)-Anlagen abgestrahlte Signalisierungssignale (RS bzw. SSS). Mittels dieser Signale kann auf die bei Vollaustlastung maximal durch das jeweilige Signal am Messpunkt erzeugte Immission hochgerechnet werden (siehe Abschnitt 5.3). Zusätzlich wird durch Kanalleistungsmessung für jedes untersuchte 4G (LTE)- bzw. 5G (NR)-Band die aktuell vorhandene Immission ermittelt (rot eingerahmte Messung in Abbildung 8.14).

Measurement Routine Information					
Long Name	004_LUBW_Zusatzmessung_4G_5G				
Configuration					
Measurement Routine					
Setup Name	Storing Condition	Measurement Time	No. of Runs	Automatic Next Step	Text
03_MB07/08_Overview	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB07_08_Overview
01_gsm 900	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB09_Overview
03_MB15_Overview	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB15_Overview
02_gsm 1800	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB18_Overview
03_MB21_Overview	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB21_Overview
03_MB26_Overview	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	25	ON	∨ MB26_Overview
03_MB36_Overview	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	30	ON	∨ MB36_Overview
12_LUBW_Mobile_aktuell	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	10	ON	∨ Momentanimmision Mobilfunkbänder
07_5G_07_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_5G_TEF
07_5G_07_TEF_2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_5G_TEF_f2
07_5G_07_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_5G_VF
07_5G_07_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_5G_TK
08_LTE700_code_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_4G_TEF
08_LTE700_code_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_4G_TK
08_LTE700_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB07_4G_VF
05_LTE800_code_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB08_4G_TEF
05_LTE800_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB08_4G_VF
05_LTE800_code_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB08_4G_TK
06_LTE1500_code_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB15_4G_TK
06_LTE1500_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB15_4G_VF
06_LTE1800_code_D1_1815	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB18_4G_TK_1
06_LTE1800_code_D1_1829,4	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB18_4G_TK_2
06_LTE1800_code_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB18_4G_TEF
06_LTE1800_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB18_4G_VF
07_5G_18_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB18_5G_VF
06_LTE2100_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB21_4G_VF
06_LTE2100_code_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB21_4G_TEF
06_LTE2100_code_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB21_4G_TK
06_LTE2600_code_D2	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB26_4G_VF
06_LTE2600_code_D1	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB26_4G_TK
06_LTE2600_code_TEF	∨ No. of Runs	∨ 00:00:00	15	ON	∨ MB26_4G_TEF

Abb. 8.14: Messroutine 4: Erfasste Signale und Messparameter der codeselektiven Messung von 4G (LTE)- und 5G (NR)-Signalen (blau eingerahmt). Die Momentanimmisionsmessung (Details dazu in Abbildung 8.15) ist rot eingerahmt, Überblicksspektren sind grün umrandet.

Service Table Information				
Short Name		0_LUBW_Mobile		
Long Name		0_LUBW_Mobile		
Service Table				
Lower Frequency	Upper Frequency	Name	RBW	
758 MHz	768 MHz	MB07_TEF	10 kHz	∨
768 MHz	778 MHz	MB07_TK	10 kHz	∨
778 MHz	788 MHz	MB07_VF	100 kHz	∨
791 MHz	801 MHz	MB08_TEF	100 kHz	∨
801 MHz	811 MHz	MB08_VF	100 kHz	∨
811 MHz	821 MHz	MB08_TK	100 kHz	∨
918 MHz	960 MHz	MB09	100 kHz	∨
1,452 GHz	1,472 GHz	MB15_TK	200 kHz	∨
1,472 GHz	1,492 GHz	MB15_VF	200 kHz	∨
1,805 GHz	1,825 GHz	MB18_TK_1	200 kHz	∨
1,825 GHz	1,835 GHz	MB18_TK_2	100 kHz	∨
1,835 GHz	1,855 GHz	MB18_TEF	200 kHz	∨
1,855 GHz	1,88 GHz	MB18_VF	200 kHz	∨
2,11 GHz	2,13 GHz	MB21_VF	200 kHz	∨
2,13 GHz	2,15 GHz	MB21_TEF	200 kHz	∨
2,15 GHz	2,17 GHz	MB21_TK	200 kHz	∨
2,62 GHz	2,64 GHz	MB26_VF	200 kHz	∨
2,64 GHz	2,66 GHz	MB26_TK	200 kHz	∨
2,66 GHz	2,69 GHz	MB26_TEF	200 kHz	∨
3,4 GHz	3,49 GHz	MB36_VF	20 kHz	∨
3,49 GHz	3,54 GHz	MB36_TEF	20 kHz	∨
3,54 GHz	3,61 GHz	MB36_DRI	20 kHz	∨
3,61 GHz	3,7 GHz	MB36_TK	20 kHz	∨
3,7 GHz	3,8 GHz	MB36_CN	20 kHz	∨

Abb. 8.15: Messroutine 4: Erfasste Signale und Messparameter der Momentanimmisionsmessung.

Der Vergleich mit den Grenzwerten und die finalen Summationen erfolgen erst in der Auswertung der Messungen. Liegen gemessene Frequenzbänder des Mobilfunks im Bereich von frequenzabhängigen Grenzwerten (zwischen 0,4 und 2 GHz), wurde bei bandselektiver Messung jeweils der für die Mitte des betrachteten Bandes geltende Grenzwert angewendet. Unterhalb von 30 MHz wurde eine spektrale Messung vorgenommen, sodass für jedes nennenswert vorhandene Signal exakt mit dessen individuellem Grenzwert bewertet werden konnte.

Die am Messpunkt vorhandenen Summenimmisionen wurden hierbei gemäß den Formeln 8.1 und 8.2 ermittelt. Die statistischen Mittelwerte über die Gesamtheit der Messpunkte bzw. die Messpunkte der einzelnen Untersuchungsregionen wurden - so wie auch in den Kampagnen 2003 und 2009 der Fall - durch lineare Mittelung über die einzelnen feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfungen errechnet.

8.4 Messungen am Referenzpunkt

Zur Sicherstellung der Stabilität des Messaufbaus, aber auch zur Demonstration der auslastungsabhängigen Schwankungen der Immissionen durch Mobilfunksignale wurden wiederholte Messungen an einem festen Referenzmesspunkt in Nürnberg-Buch (nahe des Flughafens Nürnberg) durchgeführt. Wie in Abbildung 8.16 zu sehen, erfolgten insgesamt acht Messungen, die über den kompletten Zeitraum der Messkampagne von etwa einem Jahr verteilt waren. In diesem Zeitraum variierte die ermittelte Summen-Grenzwertausschöpfung bezüglich der Körperströme zwischen 0,07% und 0,08%. Bei der thermischen Grenzwertausschöpfung konnte eine größere Schwankungsbreite (zwischen 2,06% und 2,65%) beobachtet werden. Die sich aus den acht Messungen ergebenden statistischen Kennwerte sind in Tabelle 8.3 angegeben.

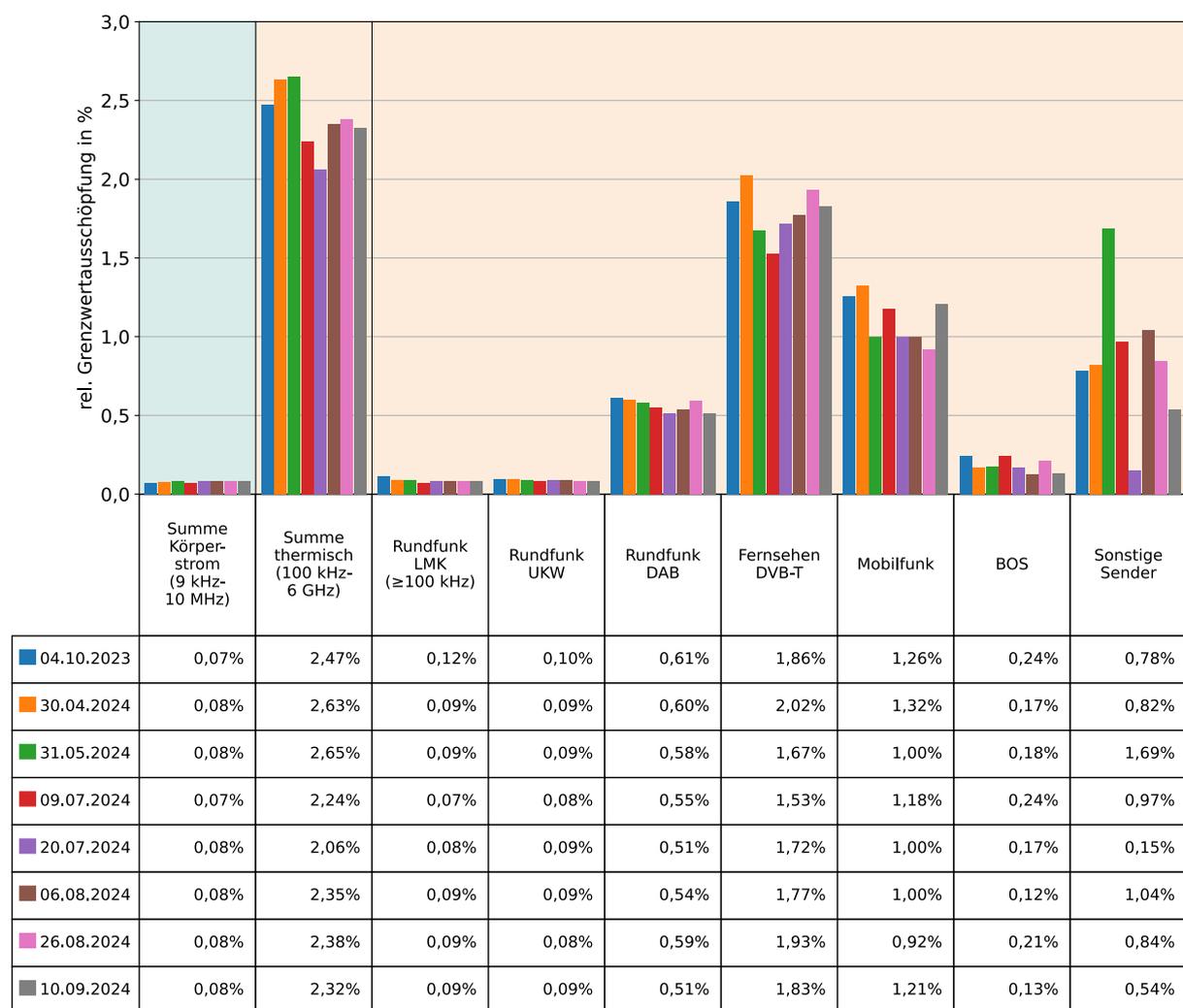


Abb. 8.16: Schwankungsbreite der am Referenzpunkt in Nürnberg-Buch gemessenen Immissionen über einen Zeitraum von etwa einem Jahr.

Tab. 8.3: Statistische Kenndaten der Referenzmessung (Summenimmission in Prozent, aufgeteilt nach Funkdiensten bzw. als Gesamtimmission).

Kategorie	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Summe Körperstrom	0,08	0,08	0,01	0,07
Summe thermisch	2,31	2,34	0,18	0,08
Rundfunk LMK	0,09	0,09	0,01	0,14
Rundfunk UKW	0,09	0,09	0,00	0,05
Rundfunk DAB	0,56	0,56	0,04	0,07
Fernsehen DVB-T	1,79	1,80	0,15	0,08
Mobilfunk	1,11	1,09	0,14	0,13
BOS	0,18	0,17	0,04	0,23
Sonstige Sender	0,64	0,79	0,35	0,55

Betrachtet man die in Tabelle 8.3 angegebenen Variationskoeffizienten, zeigen sich besonders stabile Werte bei den Funkdiensten mit konstanter Leistungsabstrahlung, also dem UKW- und DAB-Tonrundfunk und dem digitalen TV. Wäre dies nicht der Fall, könnte das auf Veränderungen im Messaufbau hindeuten (z.B. veränderte Dämpfungswerte der Messkabel). Da dies hier jedoch nicht beobachtet wurde, kann über den Zeitraum der Messungen von einem stabilen Messaufbau ausgegangen werden.

Etwas größere Schwankungen zeigen die Mobilfunk- und die BOS-Immissionen. Dies ist nicht verwunderlich, denn die abgestrahlte Leistung ist bei derartigen Sendeanlagen von der aktuellen Auslastung abhängig. Die ebenfalls etwas größeren Schwankungen beim LMK-Funk sind vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Immissionen von verhältnismäßig weit entfernten Sendern (>150 km) stammen und sich daher - neben tageszeitabhängigen Änderungen der abgestrahlten Leistung - auch Schwankungen in den Ausbreitungsbedingungen (Wetter, Ionosphäre) auswirken können.

Die deutlichen Schwankungen der ermittelten Immissionen bei den "sonstigen Sendern" sind hauptsächlich auf eine VOR-DME-Funknavigationsanlage zurückzuführen, die sich im unmittelbaren Umfeld des Referenzpunktes (Entfernung ca. 300 Meter) befindet. Die von der DME-Komponente (DME = Distance Measurement Equipment) bei Frequenzen knapp oberhalb von 1 GHz abgestrahlte Leistung ist vom aktuellen Flugverkehrsaufkommen im Umfeld des Flughafens Nürnberg abhängig.

Der besonders geringe Immissionswert der "sonstigen Sender" bei der Messung am 20.07.2024 erklärt sich durch eine an diesem Tag nicht messbare Radarfrequenz des Nürnberger Flughafenradars (ASR), welches möglicherweise wegen Wartungsarbeiten temporär abgeschaltet gewesen sein könnte.

8.5 Beeinflussung der Messergebnisse durch das Umfeld

Je nach Lage des Messpunkts waren gelegentlich Signale im niederfrequenten Spektrum (typisch <1 MHz) messbar, welche die dort vorhandenen Immissionen der Funkdienste überlagerten. Dies trat insbesondere an Messpunkten in der Nähe von nahe an Industriebetrieben (invertergesteuerte elektrische Antriebe, Schweißanlagen etc.) elektrifizierten Bahnstrecken, Hochspannungsfreileistungen, aber auch an Photovoltaikanlagen und E-Ladesäulen (Wallboxen) in Wohngebieten auf. Es handelt sich hierbei um unbeabsichtigte Hochfrequenzemissionen von technischen Systemen, die auch nicht unbedingt permanent vorhanden sind, sondern meist nur kurzfristig auftreten.

In Abbildung 8.17 sind die Langwellenspektren zweier benachbarter Messpunkte Nr. 2388 und 2389) in einem gemeinsamen Bild vergleichend dargestellt, von denen sich einer auf freiem Feld und der andere in unmittelbarer Nähe einer Bahnlinie befand. Die von der Bahn-Oberleitung offensichtlich abgestrahlten Hochfrequenzsignale überlagern breitbandig das gemessene Spektrum, was eine sinnvolle Auswertung erschwert bzw. für manche Funksignale verhindert.

In diesem Frequenzbereich musste daher gelegentlich die automatisierte Auswertung der Messung nachbearbeitet werden, da es aufgrund von vorhandenen Störsignalen (die zum Teil auch nicht permanent vorhanden waren, jedoch durch dem Max-Hold-Modus des Messgeräts dennoch "eingefangen" wurden) ansonsten zu einer Verfälschung der Immissionswerte gekommen wäre.

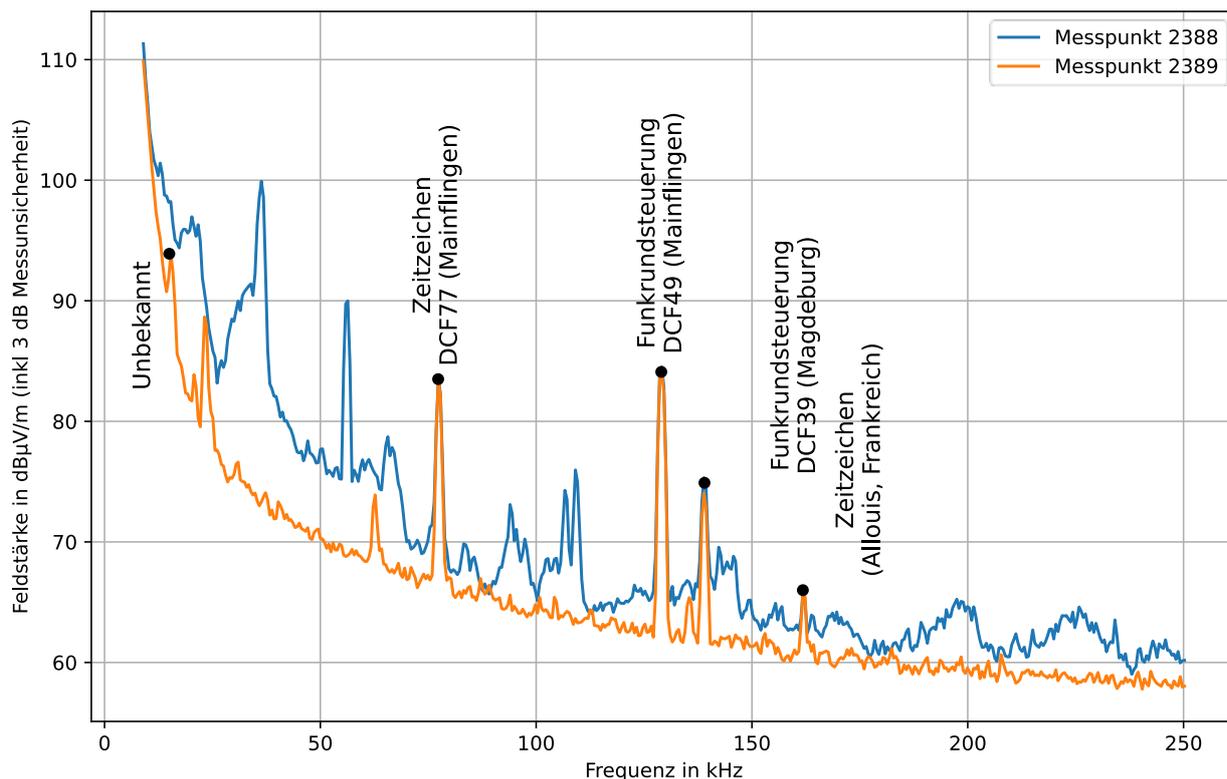


Abb. 8.17: Durch eine in der Umgebung befindliche Störquelle beeinflusstes Frequenzspektrum. Der Messpunkt 2388 befand sich unmittelbar neben einer Bahnlinie, der benachbarte Messpunkt 2389 hingegen auf freiem Feld weit entfernt von der Bahnlinie.

Eine andere Art von Störsignalen können durch die Natur erzeugt werden. Auch Blitze emittieren ein vergleichsweise breites Störspektrum. Auch derartige Artefakte traten bei den Messungen auf. Im weiteren Umfeld von Messpunkt 1129 konnten Blitzentladungen eines Gewitters beobachtet werden, die sich dann auch im Messergebnis ausgewirkt haben (blaues Spektrum in Abbildung 8.18). Die Störungen im Spektrum traten teilweise in sehr geringen Abständen von einigen wenigen Sekunden auf. Die Messung wurde in derartigen Fällen manuell wiederholt, es wurde ein Zeitpunkt abgepasst, in dem das Spektrum "sauber" war.

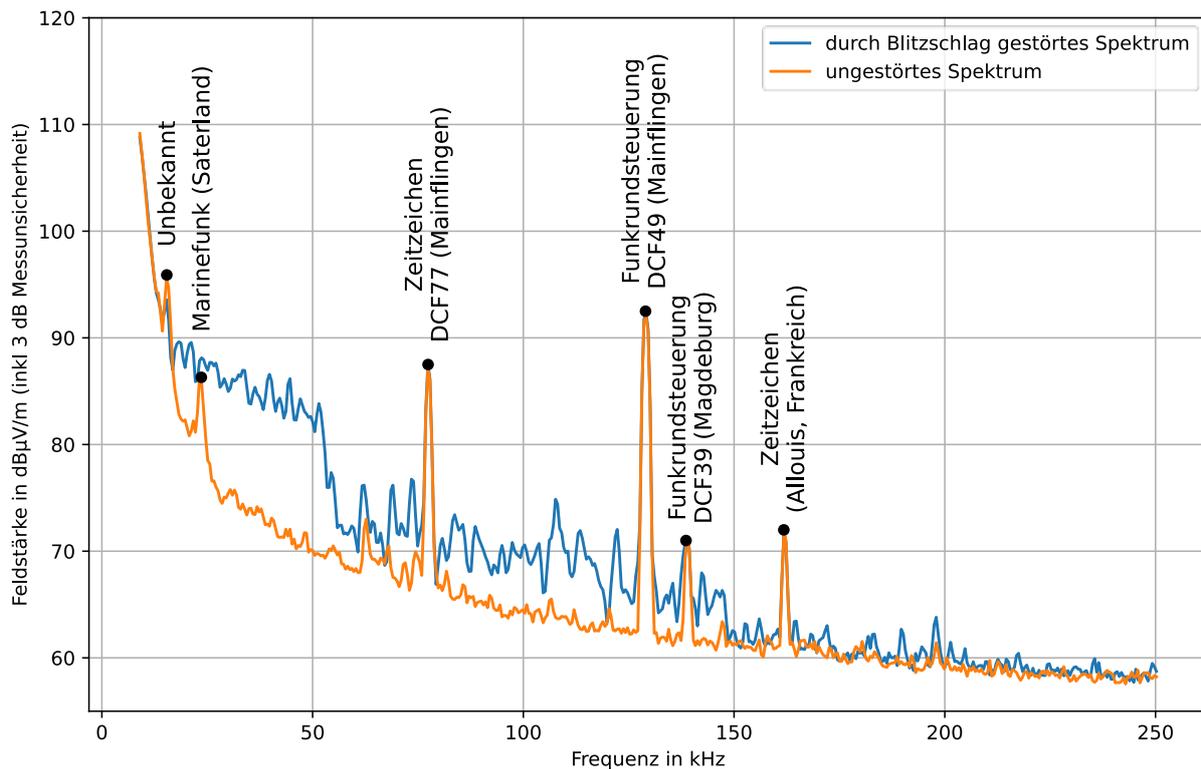


Abb. 8.18: Durch Blitzentladungen verursachte Veränderungen im gemessenen Frequenzspektrum (Messpunkt 1129).

8.6 Ergebnisdokumentation (Beispiel)

Für jeden der 600 Messpunkte wurde ein individuelles Messprotokoll angefertigt, welches einem einheitlichen Schema folgt. Das typische Aussehen der Ergebnisdokumentation für einen Messpunkt ist in folgenden Abbildungen wiedergegeben. Es handelt sich hierbei um den Punkt 1004 in der Messregion Mannheim/Heidelberg.

Seite 1: Allgemeine Angaben zum Messpunkt, Foto und Karte



Messpunkt: 1004

Gebiet: Mannheim/Heidelberg

Lage und Messbedingungen

Ort: Walldorf
 Lage: Dietmar-Hopp-Allee

Geographische Koordinaten (WGS84)
 Breite: 49,0° 17,0' 40,7" N
 Länge: 8,0° 38,0' 28,1" O

UTM-Koordinaten (ETRS89/UTM Zone 32N)
 Ostwert: 473907
 Nordwert: 5460272

Datum: 12.08.2024
 Uhrzeit: 13:35 – 13:50

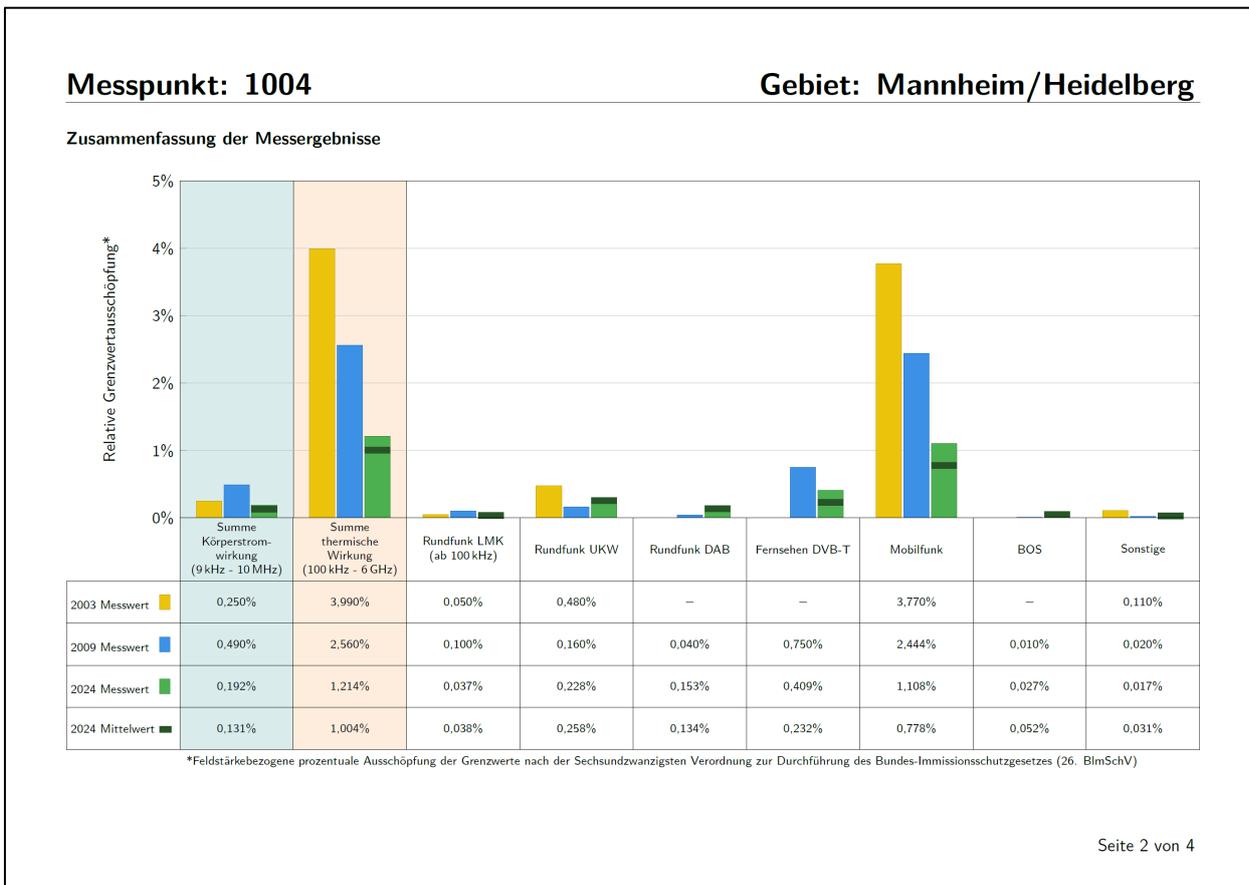
Wetter: bewölkt, trocken
 Temperatur: 26,6°C
 Luftfeuchte: 53%

ggfs. nächster Sender in Sichtkontakt: —
 ggfs. geschätzte Entfernung zum nächsten Sender: —
 ggfs. Azimutwinkel zum nächsten Sender: —

Besonderheiten: keine



Seite 2: Zusammenfassende Darstellung der Summenimmissionswerte



Seite 3 und 4: Detailaufstellung der Einzelimmissionen

Messpunkt: 1004

Gebiet: Mannheim/Heidelberg

Detaillierte Messergebnisse

Quelle	Mittelfrequenz in MHz	Elektrische Feldstärke (inkl. 3 dB Messunsicherheit)		Grenzwert elektrische Feldstärke** in V/m	Relative Grenzwert- ausschöpfung** in %	Leistungsdichte (ab 10 MHz) in $\mu\text{W}/\text{m}^2$
		in dB $\mu\text{V}/\text{m}$	in V/m			
Lang-/Mittel-/Kurzwellen (9 kHz - 30 MHz)						
Langwellenfunk	0.015	94,7	0,054	83.000	0,065	-
Marinefunk DHO38 (Saterland)	0,023	89,0	0,028	83.000	0,034	-
Langwellenfunk	0,063	77,0	0,007	83.000	0,009	-
Zeitzeichen DCF77 (Mainflingen)	0,077	87,2	0,023	83.000	0,028	-
Funkrundsteuerung DCF49 (Mainflingen)	0,129	89,8	0,031	87.000	0,036	-
Funkrundsteuerung DCF39 (Magdeburg)	0,139	69,9	0,003	87.000	0,004	-
Zeitzeichen (Allouis, Frankreich)	0,162	74,2	0,005	87.000	0,006	-
Langwellenfunk	0,198	61,6	0,001	87.000	0,001	-
Langwellenfunk	0,260	76,3	0,007	87.000	0,007	-
Tonrundfunk UKW (87,5 MHz - 108 MHz)						
Rundfunk UKW	88,85	86,8	0,022	28.000	0,078	1,270
Rundfunk UKW	89,90	79,5	0,009	28.000	0,034	0,235
Rundfunk UKW	90,62	73,9	0,005	28.000	0,018	0,065
Rundfunk UKW	91,98	72,4	0,004	28.000	0,015	0,046
Rundfunk UKW	92,71	71,7	0,004	28.000	0,014	0,039
Rundfunk UKW	95,31	74,6	0,005	28.000	0,019	0,076
Rundfunk UKW	95,94	74,9	0,006	28.000	0,020	0,081
Rundfunk UKW	96,98	72,1	0,004	28.000	0,014	0,043
Rundfunk UKW	97,81	90,8	0,035	28.000	0,123	3,167
Rundfunk UKW	98,44	70,3	0,003	28.000	0,012	0,028
Rundfunk UKW	99,06	70,7	0,003	28.000	0,012	0,031
Rundfunk UKW	99,90	88,0	0,025	28.000	0,090	1,670
Rundfunk UKW	100,42	70,2	0,003	28.000	0,012	0,028
Rundfunk UKW	101,15	69,7	0,003	28.000	0,011	0,025
Rundfunk UKW	101,56	75,4	0,006	28.000	0,021	0,091
Rundfunk UKW	102,19	75,9	0,006	28.000	0,022	0,104
Rundfunk UKW	102,81	89,5	0,030	28.000	0,107	2,370
Rundfunk UKW	103,65	72,8	0,004	28.000	0,016	0,050
Rundfunk UKW	104,06	86,3	0,021	28.000	0,074	1,126
Rundfunk UKW	105,21	69,7	0,003	28.000	0,011	0,025
Rundfunk UKW	105,62	72,1	0,004	28.000	0,014	0,043
Rundfunk UKW	106,67	77,0	0,007	28.000	0,025	0,132

Messpunkt: 1004

Gebiet: Mannheim/Heidelberg

Quelle	Mittelfrequenz in MHz	Elektrische Feldstärke (inkl. 3 dB Messunsicherheit)		Grenzwert elektrische Feldstärke** in V/m	Relative Grenzwert- ausschöpfung** in %	Leistungsdichte (ab 10 MHz) in $\mu\text{W}/\text{m}^2$
		in dB $\mu\text{V}/\text{m}$	in V/m			
Tonrundfunk DAB (174 MHz - 230 MHz)						
Kanal 5C	178,38	85,1	0,018	28,000	0,064	0,860
Kanal 9B	204,62	87,0	0,022	28,000	0,080	1,339
Kanal 9D	208,12	87,0	0,022	28,000	0,079	1,314
Kanal 11B	218,62	87,1	0,023	28,000	0,081	1,360
BOS (TETRA) / PMR (Professional Mobile Radio) / Pager etc. (390 MHz - 470 MHz)						
TETRA (390 MHz - 400 MHz)	395,00	77,6	0,008	28,000	0,027	0,154
Pager	469,77	80,1	0,010	29,802	0,034	0,271
Fernsehrundfunk DVB-T2 (470 MHz - 694 MHz)						
Kanal 21	474,00	96,2	0,065	29,936	0,216	11,109
Kanal 24	498,00	97,1	0,071	30,684	0,233	13,510
Kanal 27	522,00	94,5	0,053	31,415	0,168	7,390
Kanal 35	586,00	91,6	0,038	33,285	0,114	3,825
Kanal 41	634,00	91,5	0,037	34,622	0,108	3,712
Kanal 44	658,00	92,2	0,041	35,271	0,116	4,412
Mobilfunk Downlink (<1 GHz)						
MB07 (758 MHz - 788 MHz)	773,00	105,7	0,193	38,229	0,506	99,234
MB08 (791 MHz - 821 MHz)	806,00	107,8	0,247	39,036	0,632	161,309
MB09 (918 MHz - 960 MHz)	939,00	108,4	0,263	42,134	0,624	183,087
Mobilfunk Downlink (>1 GHz)						
MB18 (1805 MHz - 1880 MHz)	1842,50	105,7	0,194	59,021	0,328	99,462
MB21 (2110 MHz - 2170 MHz)	2140,00	104,5	0,167	61,000	0,274	73,902
Sonstige Signale (9 kHz - 6 GHz)						
DECT (1880 MHz - 1900 MHz)	1890,00	74,2	0,005	59,777	0,009	0,070
ISM 2,4 GHz (2422 MHz - 2442 MHz)	2432,00	79,0	0,009	61,000	0,015	0,208

**Grenzwerte und feldstärkebezogene prozentuale Ausschöpfung nach der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV).

Im Bereich überlappender Grenzwertdefinitionen (100kHz-10 MHz) wird zugunsten der Übersichtlichkeit in der Tabelle nur der Grenzwert für die thermische Wirkung angegeben.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Untersuchungsgebiete der Funkwellenmessprojekte 2003, 2009 und 2024.....	3
2.2	Messpunktraster im Untersuchungsgebiet "Freiburg" (Messkampagne 2024).....	4
3.1	Frequenzabhängiger Verlauf der Grenzwerte für die elektrische Feldstärke.	8
5.1	Grenzwertausschöpfung über alle Messpunkte.....	19
5.2	Verteilung der ermittelten thermischen Grenzwertausschöpfung in vier Größenklassen.	19
5.3	Verteilung der ermittelten Grenzwertausschöpfung nach Körperstromwirkung in vier Größenklassen.	20
5.4	Mittlere Immission, Median und höchster Immissionswert aufgeschlüsselt für die einzelnen Immissionsklassen.....	21
5.5	Prozentualer Anteil der einzelnen Funkdienste an der mittleren thermischen Gesamtgrenzwertausschöpfung.....	22
5.6	Klassenmittel- und Medianwerte über alle 600 Messpunkte.	23
5.7	Durchschnittliche Summenimmissionen der einzelnen Funkdienste inner- und außerorts im Vergleich.	24
5.8	Messprogramme 2009 und 2024 im Vergleich – Vergleich der thermischen Gesamtimmission (Anteile der Messpunkte in Prozent).	26
5.9	Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024.	27
5.10	Vergleich des Klassenmedians für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024.	28
5.11	Veränderung von Klassenmittelwert, Median und Maximalwert für das gleiche Messpunktekollektiv (499 Messpunkte) zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.	29
5.12	Verteilung der ermittelten thermischen Grenzwertausschöpfung in vier Größenklassen – Vergleich der Messprogramme 2009 und 2024 (499 Messpunkte).	30
5.13	Veränderung der Anteile der Funkdienste an der Gesamtimmission zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.	31
5.14	Prozentuale Veränderung der mittleren Immissionen der Funkdienste für das gleiche Messpunktekollektiv in den vier Untersuchungsgebieten zwischen den Messprogrammen 2009 und 2024.....	32
5.15	Durchschnittliche Immissionswerte für alle 600 untersuchten Punkte, sowie aufgeschlüsselt nach Regionen.....	33

5.16 Untersuchungsgebiet Stuttgart einschließlich Lage leistungsstarker Sendeanlagen.	34
5.17 Übersicht für das Untersuchungsgebiet Stuttgart hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).....	35
5.18 Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Stuttgart.....	36
5.19 Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Stuttgart.....	37
5.20 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Summe der Körperstromwirkung.	38
5.21 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Summe der thermischen Wirkung.	39
5.22 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch UKW-Rundfunksender.....	39
5.23 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch DAB-Rundfunksender.....	40
5.24 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch DVB-T-Sender	40
5.25 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch Mobilfunksender	41
5.26 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Stuttgart, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).	41
5.27 Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die Körperstromwirkung.....	42
5.28 Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Stuttgart für die thermische Wirkung.	43
5.29 Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim einschließlich Lage leistungsstarker Sendeanlagen.....	44
5.30 Übersicht für das Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).....	45
5.31 Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim.	46
5.32 Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim.....	47
5.33 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Summe der Körperstromwirkung.....	48
5.34 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Summe der thermischen Wirkung.	49

5.35	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch UKW-Rundfunksender	50
5.36	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch DAB-Rundfunksender	51
5.37	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch DVB-T-Sender	52
5.38	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch Mobilfunksender	53
5.39	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).	54
5.40	Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die Körperstromwirkung.	55
5.41	Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Heidelberg/Mannheim für die thermische Wirkung.	56
5.42	Untersuchungsgebiet Freiburg	57
5.43	Übersicht für das Untersuchungsgebiet Freiburg hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung)	58
5.44	Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Freiburg.	59
5.45	Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Freiburg.	60
5.46	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Summe der Körperstromwirkung.	61
5.47	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Summe der thermischen Wirkung.	62
5.48	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch UKW-Rundfunksender	63
5.49	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch DAB-Rundfunksender	64
5.50	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch DVB-T-Sender	65
5.51	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch Mobilfunksender	66
5.52	Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Freiburg, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).	67
5.53	Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Freiburg für die Körperstromwirkung.	68
5.54	Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Freiburg für die thermische Wirkung	69
5.55	Untersuchungsgebiet Oberschwaben	70

5.56 Übersicht für das Untersuchungsgebiet Oberschwaben hinsichtlich der Ausschöpfung des Grenzwertes (Summenimmission für Körperstrom und thermische Wirkung).	71
5.57 Vergleich der relativen Häufigkeiten der einzelnen Intervalle der Gesamtimmission (thermische Wirkung) zwischen dem Messprogrammen 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben.	72
5.58 Vergleich der Klassenmittelwerte für das gleiche Messpunktekollektiv zwischen den Messprogrammen 2003, 2009 und 2024 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben.	73
5.59 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die Summe der Körperstromwirkung.	74
5.60 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die Summe der thermischen Wirkung.	75
5.61 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch UKW-Rundfunksender.	76
5.62 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch DAB-Rundfunksender.	77
5.63 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch DVB-T-Sender.	78
5.64 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch Mobilfunksender.	79
5.65 Verteilung der Immission im Untersuchungsgebiet Oberschwaben, verursacht durch Sender für den digitalen Behördenfunk (BOS-Funk).	80
5.66 Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die Körperstromwirkung.	81
5.67 Verteilung der Veränderung der Immission im Vergleich zu 2009 im Untersuchungsgebiet Oberschwaben für die thermische Wirkung.	82
5.68 Statistische Verteilung der für die einzelnen untersuchten Frequenzbänder an den 600 Messpunkten ermittelten relativen Auslastungsfaktoren in Dezibel.	85
5.69 Mittlere Auslastungsfaktoren für die 15 untersuchten 4G (LTE)-/5G (NR)-Bänder in Dezibel.	86
5.70 Mittlere Auslastungsfaktoren aller Messpunkte.	87
8.1 Beispielhaftes Längst- und Langwellenspektrum.	93
8.2 Beispielhaftes UKW-Spektrum.	94
8.3 Beispielhaftes DAB-Spektrum.	95
8.4 Beispielhaftes DVB-T-Spektrum.	96
8.5 Beispielhaftes Spektrum des digitalen Behördenfunks (TETRA).	97
8.6 Entwicklung der pro Jahr im Mobilfunk übertragenen Datenmengen (Quelle: Jahresberichte der BNetzA 2010-2024).	98
8.7 Beispielhaftes Spektrum im 900 MHz-Mobilfunkband.	99
8.8 Messpunktraster im Untersuchungsgebiet "Freiburg" (Messkampagne 2024).	100
8.9 Aufteilung der Messpunkte auf die vier Untersuchungsgebiete.	101
8.10 Aufteilung der Messpunkte nach Lage inner- und außerorts im Jahr 2024.	102

8.11 Messroutine 1: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter	107
8.12 Messroutine 2: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter	108
8.13 Messroutine 3: Erfasste Frequenzbänder und Messparameter	109
8.14 Messroutine 4: Erfasste Signale und Messparameter der codeselektiven Messung von LTE- und 5G-Signalen.	110
8.15 Messroutine 4: Erfasste Signale und Messparameter der Momentanim- missionsmessung.	111
8.16 Schwankungsbreite der am Referenzpunkt in Nürnberg-Buch gemesse- nen Immissionen über einen Zeitraum von etwa einem Jahr	112
8.17 Durch eine in der Umgebung befindliche Störquelle beeinflusstes Fre- quenzspektrum.....	115
8.18 Durch Blitzentladungen verursachte Veränderungen im gemessenen Frequenzspektrum (Messpunkt 1129).	116

Tabellenverzeichnis

3.1	Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (thermische Wirkungen).	7
3.2	Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (Reizwirkungen).....	7
3.3	Wichtige Funkdienste mit ihren Frequenzbereichen und den dazugehörigen Grenzwerten nach 26. BImSchV.....	10
4.1	Verwendete Messausrüstung.....	13
5.1	Statistische Kenndaten der ermittelten Immissionen in Prozent.	21
5.2	Punkte mit den höchsten Immissionen. An allen Punkten bestand Sichtverbindung zu einem Sendemasten.....	25
5.3	Statistische Kenndaten für die 358 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Stuttgart.	35
5.4	Statistische Kenndaten für die 119 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Mannheim/Heidelberg.	45
5.5	Statistische Kenndaten für die 54 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Freiburg.	58
5.6	Statistische Kenndaten für die 69 Messpunkte des Untersuchungsgebiets Oberschwaben.	71
5.7	Untersuchte 4G/5G-Bänder und ihre Frequenzbereiche.....	84
8.1	Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (thermische Wirkungen).	103
8.2	Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV (Reizwirkungen).....	104
8.3	Statistische Kenndaten der Referenzmessung (Summenimmission in Prozent, aufgeteilt nach Funkdiensten bzw. als Gesamtimmission).....	113