



Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung Jahresbericht 2021 - Projektkonsortium SwissNIS

Aarau, 24. Mai 2022

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Projektkonsortium SwissNIS

TPH
Swiss Tropical and Public Health Institute
Kreuzstrasse 2
4123 Allschwil

G+P
Grolimund + Partner AG
Entfelderstrasse 45
5000 Aarau

FaW
Fields at Work GmbH
Hegibachstrasse 41
8032 Zurich

NED-TECH
NED – TECH AG
Unterholz 26
3380 Wangen an der Aare

Autor/Autorin:

Toni Ziegler, G+P, Projektleiter
Martin Rösli, TPH, Projektleiter Stv.
Christa Stephan, G+P
Marco Zahner, FaW
Markus Gugler, NED-TECH
Nicolas Loizeau, TPH
Jürg Fröhlich, FaW
Erik Bühlmann, G+P
Johannes Schindler, G+P
Michal Kovacik, G+P
Simon Burkhard, G+P

Begleitung BAFU:

Sebastian Egger
Urs Walker
Alexander Reichenbach
Andreas Siegenthaler

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.0	18.03.2022	Projektteam	Jahresbericht 2021	SwissNIS, Auftraggeberin
V 1.1	08.04.2022	Projektteam/ Auftraggeberin	Kommentar des Jahresberichts 2021 V 1.0	SwissNIS, Auftraggeberin
V 1.4	24.05.2022	Projektteam	Überarbeiteter Jahresbericht 2021	SwissNIS, Auftraggeberin

Inhalt

1. Einführung und Ziele.....	5
2. Konzept und Methoden.....	6
2.1 Messkonzept.....	6
2.2 Messungen	7
2.2.1 Routenmessungen.....	7
2.2.2 Spotmessungen.....	10
2.2.3 Stationäre Dauermessungen	12
2.3 Auswahl der Messorte	12
2.3.1 Routenmessungen.....	12
2.3.2 Spotmessungen	16
2.3.3 Stationäre Dauermessungen	16
2.4 Datenmanagement	17
2.4.1 Messdateien und Datenbank.....	17
2.4.2 Datenaufbereitung	18
2.4.3 Deskriptive Statistik.....	19
2.5 Messinstrumente.....	19
2.5.1 Allgemeine Gerätespezifikationen	20
2.5.2 Auswahl der Frequenzbänder.....	20
2.5.3 Messgenauigkeit	24
2.5.4 Einfluss der Körperabschirmung.....	24
2.5.5 Crosstalk-Korrektur	28
3. Ergebnisse	31
3.1 Routenmessungen.....	31
3.1.1 Mikroumgebungen Routenmessungen.....	31
3.1.2 HF Exposition.....	33
3.1.3 HF Exposition nach Quellentyp	37
3.1.4 NF Exposition.....	39
3.1.5 NF Exposition nach Quellentyp	41
3.1.6 Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts	41
3.1.7 Vergleich mit Messdaten von 2014.....	42
3.2 Spotmessungen	44
3.2.1 Gesamte HF-Exposition.....	44
3.2.2 Gesamte NF-Exposition.....	45
3.2.3 HF-Exposition nach Quellentyp	46
3.2.4 NF-Exposition nach Quellentyp	47
3.2.5 Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts	48

3.2.6 Verteilung der Messorte für Spotmessungen	49
3.3 Stationäre Dauermessungen	52
3.3.1 Messorte Stationäre Dauermessungen	52
4. Diskussion	53
4.1 Repräsentativität der Daten	54
5. Literaturverzeichnis	57
6. Datenquellen	58
I Glossar	59
II Liste der Standortgemeinden von Mikroumgebungen	61
III Kenngrößen HF-RMS-Messdaten	63
IV Vergleich der HF-EMF Frequenzbänder von 2014 und 2021	69
V Liste der ausgewählten Gemeinden für Messungen	70
VI Liste der Standorte von Spotmessungen	72
VII Crosstalk-Korrektur	73

1. Einführung und Ziele

Seit der Revision der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vom April 2019 ist das Bundesamt für Umwelt (BAFU) explizit damit beauftragt, die Belastung der Bevölkerung durch nichtionisierende Strahlung (NIS) periodisch zu erheben und eine nationale Übersicht zu erstellen (Art. 19b Abs. 1 NISV). Zu diesem Zweck wurde im Jahr 2020 durch das BAFU ein Projekt zur Erhebung von repräsentativen Messdaten zur Belastung der Schweizer Bevölkerung durch nichtionisierende Strahlung in ihrem Alltag ausgeschrieben.

Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den Jahresbericht 2021 zur Erhebung der Messdaten, der durch das Projektkonsortium verfasst wurde, welches den Zuschlag für die Ausschreibung erhalten hat.

Der Jahresbericht 2021 beschreibt einerseits das grundlegende Konzept und die Art der Datenerhebung, andererseits werden erste Ergebnisse der durchgeführten Messungen präsentiert. Da es sich um den ersten Jahresbericht während der Dauer der Datenerhebung handelt, sind Vergleiche mit früheren Messdaten nur eingeschränkt möglich.

Über die weitere Projektlaufzeit wird die Datengrundlage stetig erweitert und in jährlichen Berichten zusammengefasst sowie mit den Daten vorhergehender Jahre verglichen, um die zeitliche Entwicklung der Immissionen zu beurteilen.

2. Konzept und Methoden

In diesem Kapitel werden das Konzept und die Verfahren für die Messungen beschrieben, welche für die gesamte Projektlaufzeit von 5 Jahren in einheitlicher Form geplant sind. Die Auswertung der Messdaten erfolgt jährlich und wird in einem Jahresbericht zusammengefasst.

2.1 Messkonzept

Das Konzept für die im vorliegenden Bericht dokumentierten Expositionsmessungen von nichtionisierender Strahlung beinhaltet drei sich ergänzende Messverfahren:

1. „Routenmessungen“

Mobile Messungen werden mit portablen Geräten auf definierten Messstrecken durchgeführt, wobei die Messungen im Abstand von 2 Jahren wiederholt werden. Die Messstrecken befinden sich innerhalb vorgängig ausgewählter „Mikroumgebungen“. Insgesamt werden schweizweit Messungen in 300 Mikroumgebungen durchgeführt, welche in 9 Typen kategorisiert werden (vgl. Tabelle 1). Innerhalb der einzelnen Mikroumgebungen werden sowohl Messwerte im Freien erfasst, was dem eigentlichen Typ der Mikroumgebung entspricht (z. B. Stadtzentren, Industriegebiete), aber auch in öffentlichen Bereichen (z. B. Bahnhöfe, Restaurants, Supermärkte) und beim Transfer zwischen den Mikroumgebungen bzw. Messungen in zahlreichen öffentlichen Verkehrsmitteln (Regional/Intercity Züge, Trams, Busse). Im Folgenden wird allgemein der Begriff „Messumgebung“ verwendet. Die Mikroumgebungen werden mithilfe von Geoinformationssystemen (GIS) anhand verschiedener Kriterien ausgewählt, damit das Total der Mikroumgebungen die Schweizer Bevölkerung gut repräsentiert.

2. „Spotmessungen“

Es werden mindestens 100 Wohnungen als „Orte mit empfindlicher Nutzung“ (OMEN) ausgewählt, welche in der Nähe mindestens einer NIS-Quelle liegen und in denen daher überdurchschnittliche Feldstärken zu erwarten sind. Damit werden typische Expositionssituationen in der Nähe der jeweiligen NIS-Quellen an Orten erfasst, an denen sich Menschen häufig und lange aufhalten.

3. „Stationäre Dauermessungen“

Um die saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen sowie zeitliche Trends der NIS-Exposition aufzuzeigen, werden an 5 ausgewählten Standorten stationäre Dauermessungen während mindestens zwei Jahren durchgeführt.

Die Messverfahren und die Methodik zur Auswahl der Messorte werden nachfolgend beschrieben.

2.2 Messungen

2.2.1 Routenmessungen

Die sog. Routenmessungen, bzw. „mobilen Messungen“ sind Messungen der niederfrequenten Magnetfelder (NF-MF) und der hochfrequenten elektromagnetischen Felder (HF-EMF) entlang einer definierten Messstrecke (Route). Die Messstrecken liegen in sog. «Mikroumgebungen» (anhand human-geographischer Merkmale definierte Bereiche von ca. 1 km² Fläche), die gemäss dem in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Verfahren ausgewählt werden. Damit die Daten dort erhoben werden, wo sich die Bevölkerung auch wirklich aufhält, werden die Messungen in den verschiedenen Mikroumgebungen zu Fuss durchgeführt. Die zwischen den verschiedenen Routenmessungen nötigen Transfers und Aufenthalte finden jeweils mit dem öffentlichen Verkehr statt, so dass zudem je Messstag zusätzliche Expositionsmessungen in öffentlichen Bereichen (öffentliche Verkehrsmittel, Haltestellen und Bahnhöfe, Restaurants, kulturelle Orte, etc.) stattfinden.

In jeder Mikroumgebung wird eine Messstrecke von ca. 1-1.3 km Länge definiert, so dass für das Abmarschieren ungefähr 15 Minuten benötigt werden und bei einem Messintervall von 6 Sekunden ca. 150 Messwerte pro Mikroumgebung erfasst werden. Die Messstrecken werden so angeordnet, dass möglichst die ganze Fläche der Mikroumgebung erfasst wird. Damit die Messstrecken auch nach mehreren Jahren und bei Personalwechsel reproduzierbar bleiben, werden die Messstrecken auf Karten eingezeichnet und es wird grundsätzlich immer die linke Strassenseite benützt. In einer programmierten Applikation auf einem im Flugmodus betriebenen Tablet wird jeweils eingetragen, wann die Messstrecke betreten oder verlassen wird, bzw. wann das Verkehrsmittel gewechselt wurde (Aktivitätsprotokoll). Mit dem in den Messgeräten integrierten GPS wird für jeden Messpunkt die Koordinate aufgezeichnet. Die Messungen erfolgen grundsätzlich während den Bürozeiten.

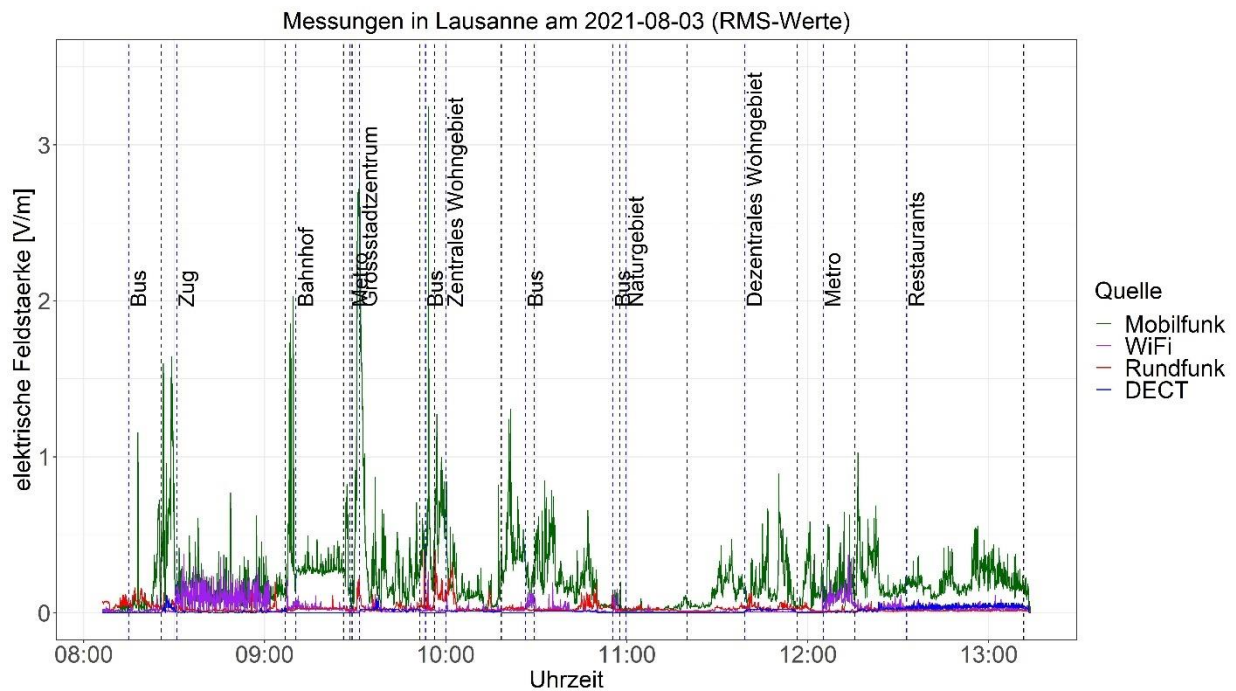
Das Setup für die Routenmessung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die beiden HF-Messgeräte (ExpoM-RF4) und das NF-Messgerät (ExpoM-ELF) sind in einem Koffer so weit voneinander fixiert, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die beiden HF-Messgeräte werden mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten betrieben (erfasste Messwerte bis 6 V/m bzw. 20 V/m). Der Koffer ist in einem Rucksack verstaut, welcher bei der Messung am Rücken getragen wird bzw. in öffentlichen Verkehrsmitteln auf dem Sitz deponiert wird.



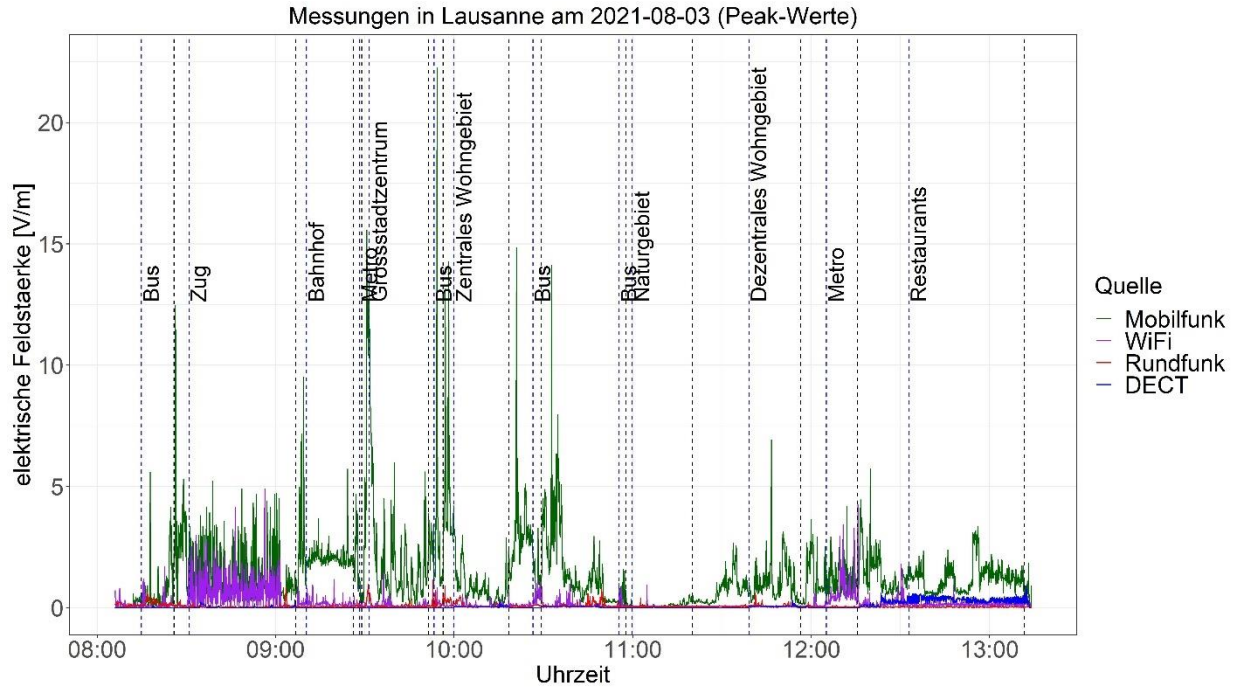
Abbildung 1: Darstellung des Setups für die Routenmessung

Ein Messverlauf für eine Routenmessung in Lausanne am Morgen des 03.08.2021 ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Messergebnisse sind für die A) HF-Exposition (RMS-Werte), B) HF-Exposition (Peak-Werte) und C) NF- Exposition (RMS-Werte) gezeigt. Die Geräte wurden kurz nach 8:00 Uhr am Startpunkt eingeschaltet, dann notierten wir mit einer Smartphone-App, wann wir den Bus um 8:14 Uhr nahmen (blau gestrichelte Linie) und um 8:24 Uhr verliessen (schwarz gestrichelte Linie). So notierten wir für jeden Mikroumgebungstyp den Beginn und das Ende einer Messumgebung. Dann fuhren wir um 8:31 Uhr mit dem Zug nach Lausanne, wo wir vier Mikroumgebungen definiert hatten (Grosstadtzentrum, Zentrales Wohngebiet, Naturgebiet, Dezentrales Wohngebiet). Die Transfers zwischen den verschiedenen Mikroumgebungen wurden mit dem Bus, der Metro oder zu Fuss durchgeführt. Nach den Messungen in einem Restaurant wurden die Messungen am Nachmittag fortgesetzt.

A. HF Exposition, RMS-Werte



B. HF Exposition, Peak-Werte



C. NF Exposition, RMS-Werte

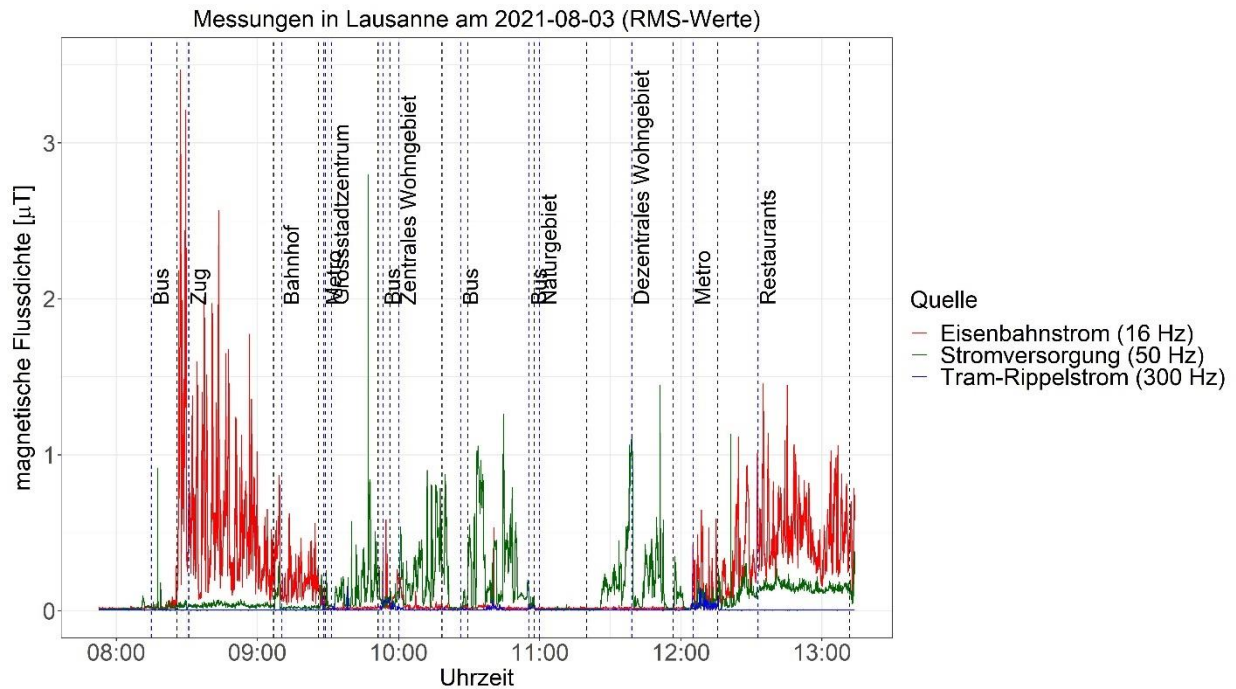


Abbildung 2: Beispiel eines Messverlaufs in Lausanne am 03.08.2021 für die verschiedenen Expositionsquellen (HF: Mobilfunk, WiFi, Rundfunk, DECT, und NF: Eisenbahnstrom, Stromversorgung, Tram-Rippelstrom): A) HF-Exposition, RMS-Werte; B) HF-Exposition, Peak-Werte; C) NF-Exposition, RMS-Werte. Die blauen Linien zeigen den Beginn der Aufzeichnung eines Mikroumgebungstyps an (z.B. Bus, Zug, Bahnhof, etc.). Die schwarzen Linien zeigen das Ende des Mikroumgebungstyps an.

2.2.2 Spotmessungen

Die Spotmessungen bestehen an jedem Messort aus drei Teilmessungen:

- Stationäre Messung während 10 min mit 10 s Messintervall im Wohnzimmer auf einem nichtleitenden Stativ („spot-local“). Die Messgeräte werden an einem Ort platziert, an dem sich die Bewohner regelmässig längere Zeit aufhalten, entweder beim Sofa oder beim Esstisch. Die genaue Position wird so gewählt, dass eine geringe Abdämpfung gegenüber externen Quellen zu erwarten ist (z.B. freie Sicht auf Mobilfunkantennen oder minimale Distanz zu Hochspannungsleitungen).
- Mobile Messung durch Abschreiten der gesamten Wohnung während 10 min mit Messintervall 6 s mit Befestigung der Messgeräte an einem nichtleitenden Schulterstativ („spot-area“). Diese mobile Messung wird gleichzeitig mit der stationären Messung durchgeführt.
- Stationäre Messung während 24 h mit 10 s Messintervall im Schlafzimmer in Bettnähe auf Liegehöhe („spot-long“)

Bei allen Teilmessungen werden parallel je ein ExpoM-ELF und ein ExpoM-RF (mit der empfindlichen Sensitivitätseinstellung von 6 V/m) eingesetzt.

Vor oder zwischen den Messungen werden Informationen zum Messort und den Umgebungsbedingungen als Metadaten mit einer Smartphone-App elektronisch erfasst.



Abbildung 3: Darstellung des Mess-Setups für „spot-local“ (links), „spot-area“ (Mitte) und „spot-24h“ (rechts).

Als Beispiel für die Variabilität der Messwerte ist in Abbildung 4 und Abbildung 5 der zeitliche Verlauf der Messwerte während 24 h in einer Wohnung in der Nähe einer einspurigen Eisenbahnlinie und einer Mobilfunkantenne abgebildet.

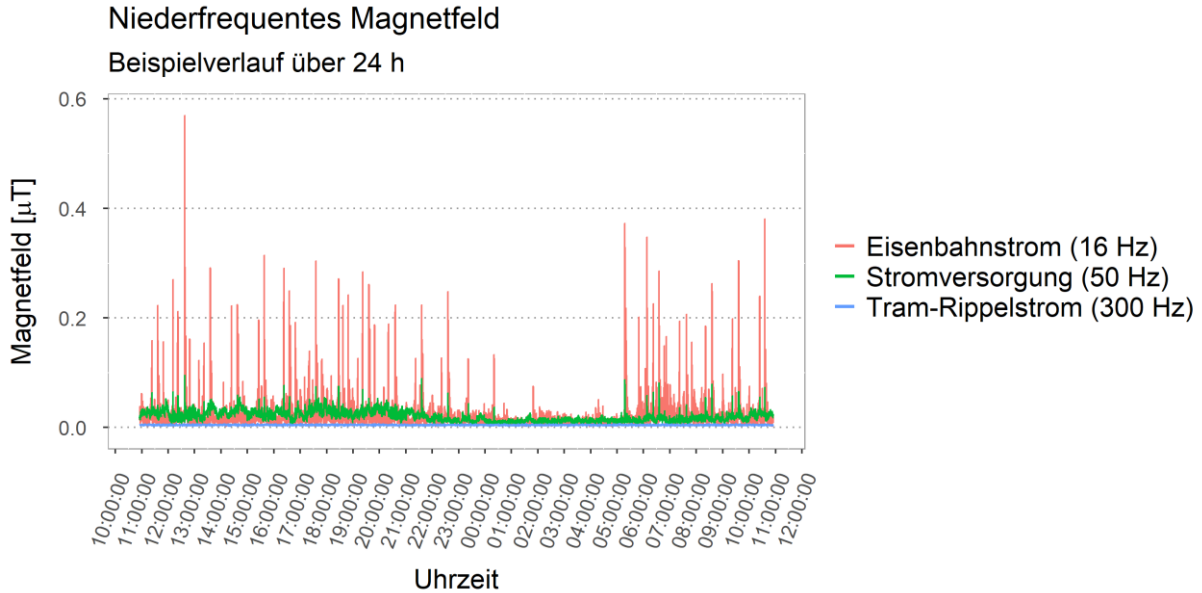


Abbildung 4: Beispielverlauf des niederfrequenten Magnetfelds (rms-Werte) in einer Wohnung in der Nähe einer Eisenbahnlinie.

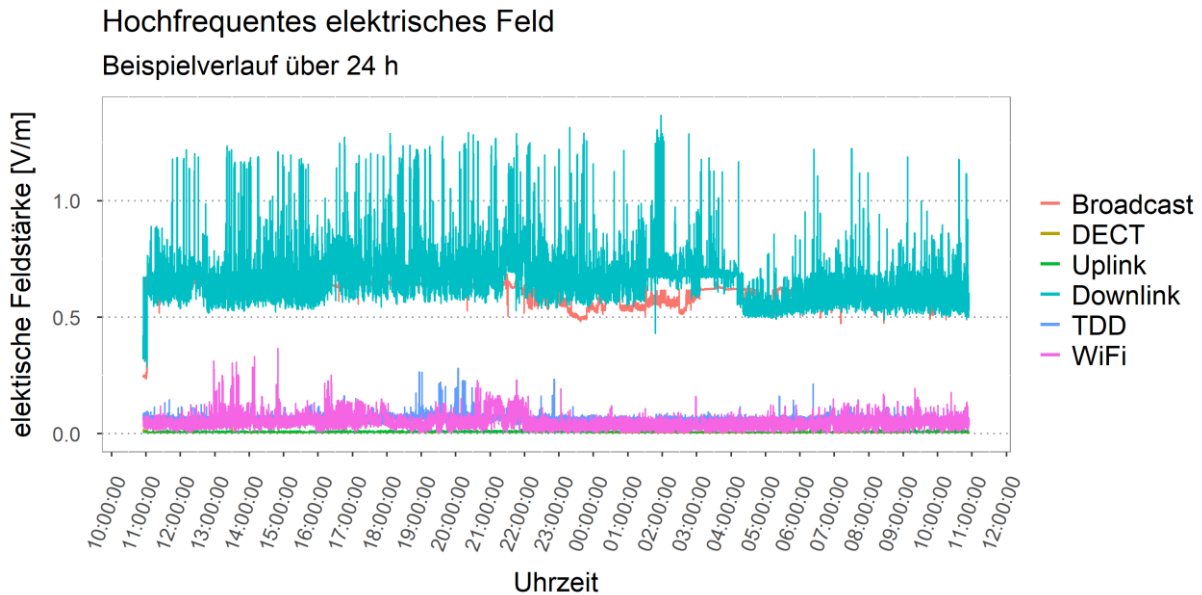


Abbildung 5: Beispielverlauf des hochfrequenten elektrischen Feldes (rms-Werte) in einer Wohnung in der Nähe einer Mobilfunkantenne.

2.2.3 Stationäre Dauermessungen

Für die Stationären Dauermessungen wird ein ExpoM-RF-Dosimeter in einem wetterfesten Kunststoffkoffer im Aussenbereich aufgestellt und per USB-Kabel mit einem Mini-Computer verbunden, welches der Auslesung der Daten und der Stromversorgung dient. Auf die Aufzeichnung der niederfrequenten Bänder wird verzichtet, weil der zeitliche Verlauf dieser Feldstärken und die Stromflüsse in den Netzen bzw. Fahrleitungen gekoppelt ist und damit bekannten Mustern folgt oder von den Betreibern aufgezeichnet wird. Die Stationären Dauermessungen zeichnen jeweils während 12 h in einem Intervall von 10 s Messwerte auf. Nach Ablauf der 12 h werden die Daten ausgelesen, was einen Unterbruch der Datenaufzeichnung von rund 1 min zur Folge hat.

Die Befestigung des Koffers wird soweit möglich mit nichtleitenden Materialien realisiert und muss an jedem Standort unter Berücksichtigung der individuellen Gegebenheiten erfolgen.

2.3 Auswahl der Messorte

Dieses Kapitel beschreibt zusammenfassend die Verfahren zur Auswahl der Messorte für die drei Messverfahren.

2.3.1 Routenmessungen

Im Rahmen des Monitorings werden 300 Mikroumgebungen jeweils zweimal im exakten Abstand von 2 Jahren besucht und auf den gleichen Strecken gemessen. Als erster Schritt wurden «Standortgemeinden» für die Mikroumgebungen mit dem Ziel ausgewählt, alle 25 Gemeindetypologien gemäss der Klassierung des Bundesamtes für Statistik (Bundesamt für Statistik, 2012) repräsentativ zum jeweiligen Bevölkerungsanteil zu berücksichtigen. Ausgenommen davon sind die neun grössten Städte, welche alle bewusst ausgewählt worden sind (Zürich, Lausanne, Lugano, Genève, Basel, Bern, Winterthur, Luzern, St. Gallen). Weitere Gemeinden aus den übrigen Gemeindetypologien wurden aus allen Sprachregionen ausgewählt, wobei zwecks Vergleichbarkeit die Gemeinden aus der Messkampagne in (Röösli M. F. M., 2015) berücksichtigt wurden. So wurden 70 Gemeinden (Anhang V) ausgewählt (Stand 22.04.2022), die in Abbildung 6 dargestellt sind.

Übersichtskarte der Messorte

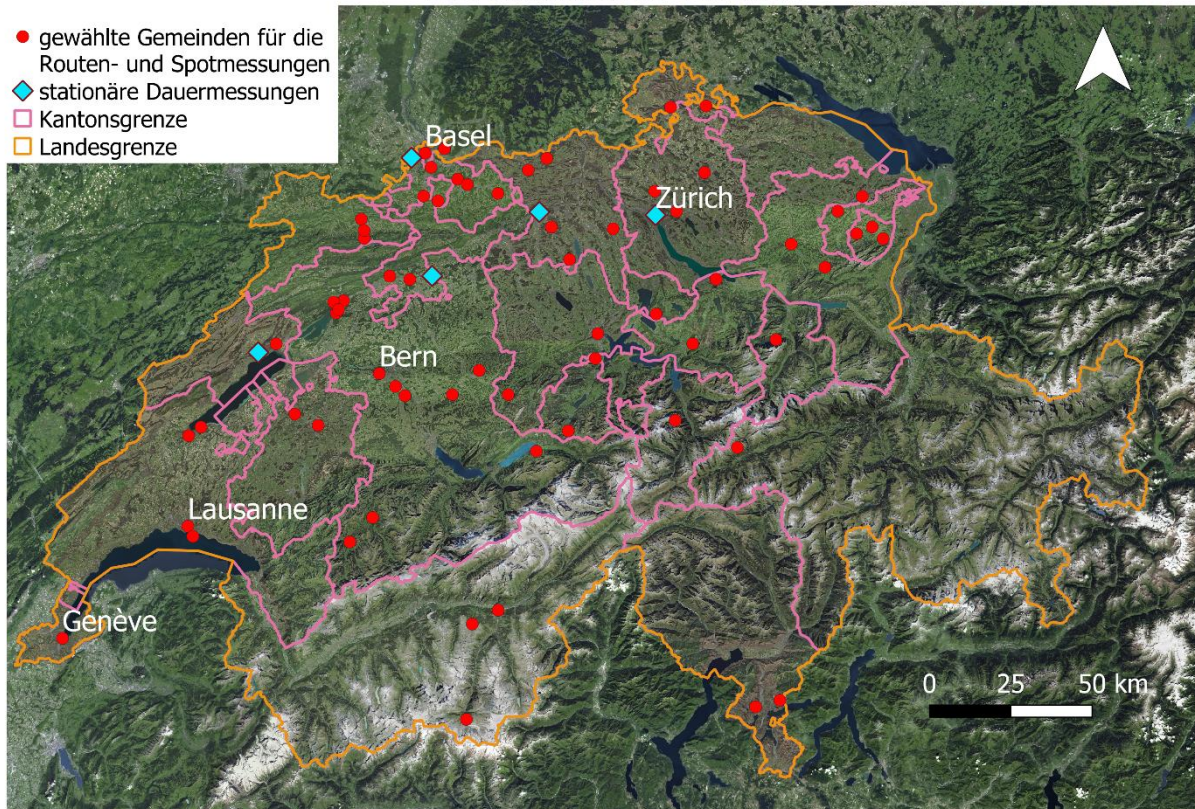


Abbildung 6: Karte der Schweiz mit den 70 Gemeinden (Stand 22.04.2022), die für die Routen- und Spotmessungen ausgewählt wurden, sowie den 5 Messorten für die stationäre Dauermessungen. Quelle: <https://wmats.geo.admin.ch>, Hintergrund Karte

Die Definition und Auswahl der Mikroumgebungen innerhalb der Gemeinden basiert auf umfangreichen GIS-Grundlagedaten und je Messkampagne iterativ durchgeführten GIS-Analysen. Ausgangslage für die Bereichsdefinition möglicher Mikroumgebungen von rund 1 km² Fläche ist der "Corine Land Cover (CLC)"-Datensatz der Schweiz¹. Anhand der CLC Klassen wurden 9 typische Bereiche als Mikroumgebungstypen definiert, in denen sich die Schweizer Bevölkerung aufhält, vgl. Tabelle 1. In einer gewählten Mikroumgebung kann anschliessend eine abzuschreitende Messroute für die Routenmessung geplant werden. Diese soll die Fläche möglichst gleichmässig abdecken, wobei die Möglichkeiten durch den spezifischen Strassenverlauf gegeben sind, weshalb kein allgemeingültiges, quantitatives Verfahren definiert werden kann.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft Mikroumgebungen und eine Messroute in Zürich.

Die Mikroumgebungstypen «Grossstadtzentrum», «Zentrales Wohngebiet» und «Dezentrales Wohngebiet» wurden ausschliesslich für Teile von Städten der BFS-Gemeindetypologien «Kernstadt einer grossen Agglomeration» und «Kernstadt einer mittelgrossen Agglomeration» definiert und betreffen damit Gemeinden von Agglomerationen mit mindestens 50'000 Einwohnern. Für diese Kategorie wurden die 9

¹ Bestandsaufnahme der Landbedeckung in 44 Klassen: <https://www.wsl.ch/en/projects/corine-switzerland.html>

grössten Schweizer Städte ausgewählt. Die übrigen Mikroumgebungstypen betreffen entweder kleinere Gemeinden oder sind unabhängig von der Einwohnerzahl (z.B. Industriegebiet).

Tabelle 1: Beschreibung der 9 Mikroumgebungstypen.

Mikroumgebungstyp	CLC-Klasse	Beschreibung
Grossstadtzentrum	111	Altstadt, historischer Teil, Kino, Bars, Restaurants, Hotels, wenig Strassenverkehr, Fussgängerzone
Zentrales Wohngebiet	111	Zentrumsnah, enge Baustruktur, halbe Entfernung zum Stadtzentrum, wenig Strassenverkehr
Dezentrales Wohngebiet	112	Relativ grosser Anteil an Grünflächen im Vergleich zu zentralen Wohngebieten
Industriegebiet	121	Industrie, Geschäftsviertel
Stadtzentrum (bzw. Dorfzentrum)	112	Marktplatz, Altstadt
Wohngebiet	112	Ausserhalb des Stadtzentrums
Sport-/Freizeitgebiet	141/142	Sportplatz, Parks, Strand
Naturgebiet	311-321	Wald, Wiese
Landwirtschaftliche Gebiet	211-243	Ackerland, Dauerkulturen, Weiden

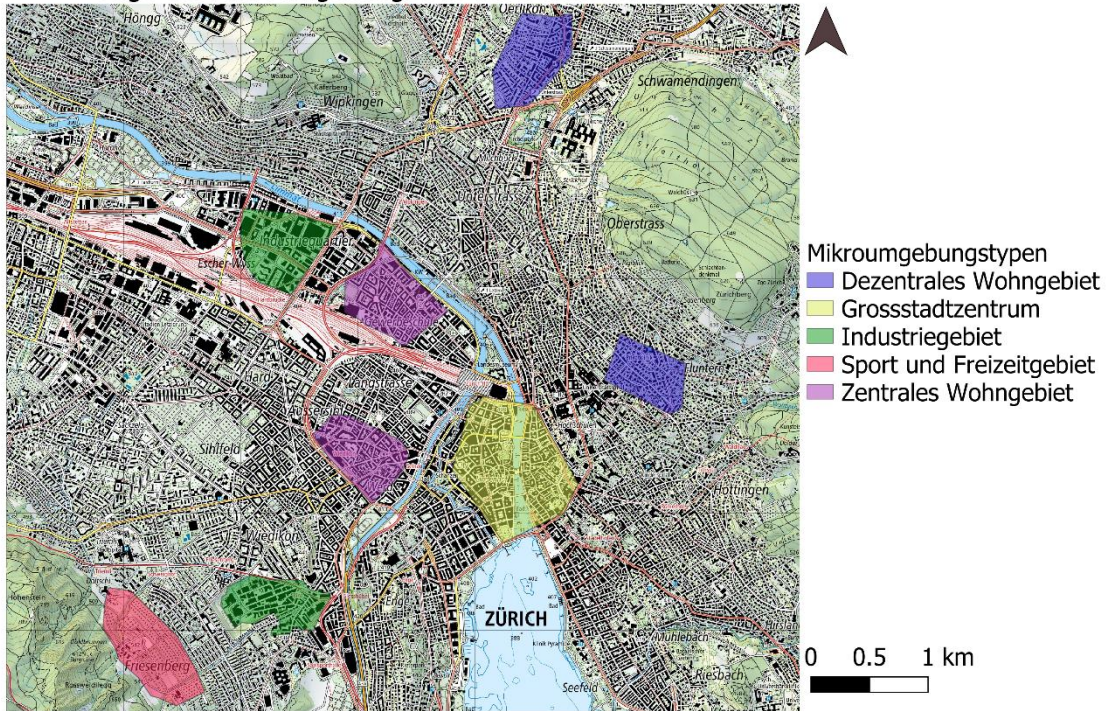
Da die Routenmessung die typische NIS Exposition der Schweizer Bevölkerung im öffentlichen Aussenbereich erfassen sollen, muss die Auswahl der Mikroumgebungen repräsentativ für die Bevölkerung sein. Die Repräsentativität hinsichtlich typischer NIS Quellen und allgemeinen Bevölkerungsstatistiken wird mithilfe von GIS berechnet und periodisch aktualisiert. Die Ergebnisse dienen der Detailauswahl aus möglichen Mikroumgebungen. Hierzu wird für alle untersuchten Parameter der Bevölkerungsanteil der in allen Mikroumgebungen wohnhaften und vom jeweiligen Parameter «betroffenen» Personen berechnet. Dieser Wert wird jeweils mit dem durchschnittlichen Anteil der Gesamtschweizer Bevölkerung verglichen, welche vom gleichen Parameter betroffen ist.² Ausgangslage zu Beginn der Auswahl weiterer Mikroumgebungen waren die bestehenden 49 Mikroumgebungen aus der Pilotstudie von 2014 (Rösli M. F. M., 2015), welche auch in dieser Studie enthalten sind. Folgende Parameter werden bei der Repräsentativitätsanalyse berücksichtigt:

- NIS Quellen: Mobilfunkanlagen (je Sendeleistungsklasse und Technologie), Radio- und TV-Sender (je Sendeleistungsklasse), Hochspannungsleitungen (je Spannungsklasse), Zug- und Tramlinien (je Typ und Spurklasse).
- Bevölkerungsstatistik: Gemeindetypologie (nach BFS), Corinne Land Cover Typ, Kantone (+ mindestens eine Mikroumgebung je Kanton), Sprachregion (mindestens eine Mikroumgebung je Sprachregion). Zudem sollen alle neun grössten Städte mit mindestens einer Mikroumgebung vertreten sein.

Auf diese Weise werden für jährlich vier Routenmesskampagnen jeweils 35 bis 40 Mikroumgebungen definiert.

² Beispiele: „Wieviele Personen leben [in der Schweiz / in den gewählten Mikroumgebungen] innerhalb von 50 m Distanz zu mindestens einer 4G Antenne mit Sendeleistung zwischen 100 bis 1000 W?“; „Wieviele Personen leben [in der Schweiz / in den gewählten Mikroumgebungen] in einer Gemeinde vom Bfs-Typ 113 (Kernstadt einer grossen Agglomeration)?“

Lage der Mikroumgebungen in der Stadt Zürich



Messpfad innerhalb einer Mikroumgebungen in der Stadt Zürich

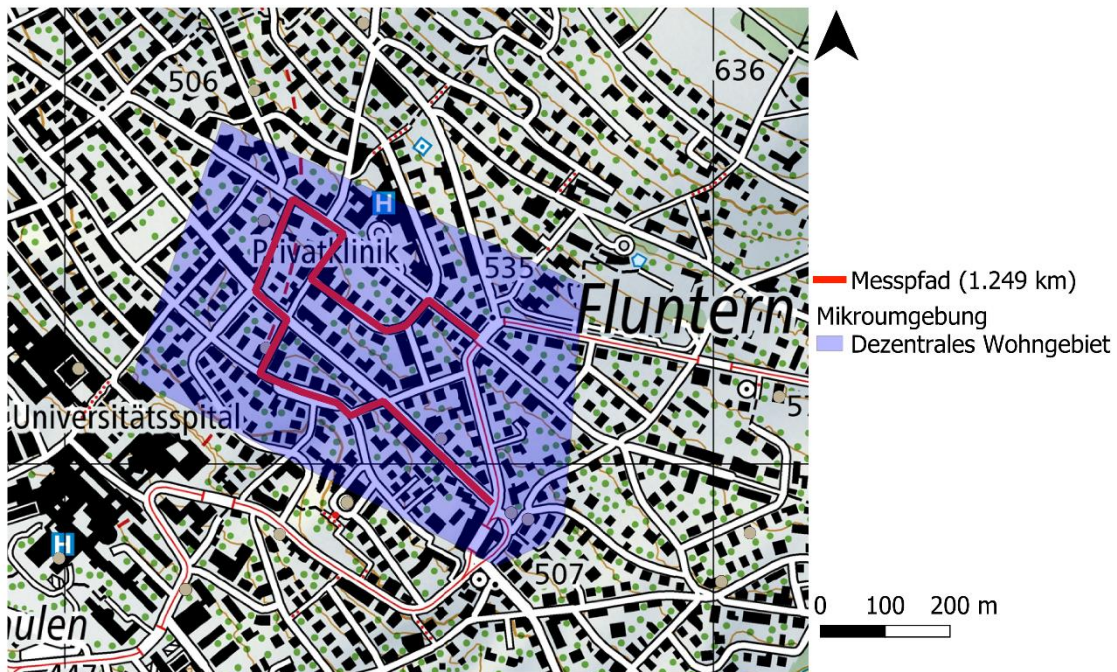


Abbildung 7: Beispiel Mikroumgebungen Stadt Zürich (oben), Beispiel für eine Messroute innerhalb einer Mikroumgebung (unten). Quelle: <https://wmts.geo.admin.ch>, Landeskarte: 1:25000

2.3.2 Spotmessungen

Die Spotmessungen werden in Privatwohnungen bzw. -Wohnhäusern durchgeführt und erfassen damit sehr individuelle Situationen. Für eine repräsentative Auswahl wäre prinzipiell eine Zufallsstichprobe erwünscht. Das hätte jedoch den Nachteil, dass Situationen mit hoher Exposition, welche selten sind, bei der relativ geringen Anzahl von ausgewählten Wohnhäusern verpasst würden. Aus diesem Grund wird bei der Auswahl eine doppelte Strategie angewendet. Um sicher zu stellen, dass hohe Expositionen durch verschiedene Quellentypen (siehe Tabelle 9) erfasst werden, wird gezielt nach Wohnungen gesucht, an denen aufgrund räumlicher Nähe zu einer NIS-Quelle (z.B. Nähe Bahnlinie) überdurchschnittlich hohe Feldstärken durch diese „primäre“ Quelle zu erwarten sind. In Bezug auf andere, „sekundäre“ NIS-Quellen ist die entsprechende Wohnung aber quasi zufällig ausgewählt. Es kann deshalb angenommen werden, dass die gesamte Stichprobenmenge der Spot-Messorte bezüglich sekundärer, externer NIS-Quellen für die Exposition der Wohnbevölkerung in den Mikroumgebungen mit Spot-Messungen näherungsweise repräsentativ verteilt ist. Bei der Definition von Standortvorschlägen für Spotmessungen wird nach den folgenden Kriterien vorgegangen:

1. Die Messorte müssen zwecks Vergleichbarkeit innerhalb einer Routenmessung-Mikroumgebung liegen
2. Die Messorte müssen innerhalb einer quellenspezifisch definierten Distanz („Einflussperimeter“) von mindestens einer „massgebenden“ NIS-Quelle liegen
3. Über die gesamte Projektlaufzeit wird darauf geachtet, dass sowohl die Wohnungstypen wie auch die massgebenden NIS-Quellentypen in den Messorten statistisch angemessen vertreten sind.

Die Wohnungs- und Quellentypen sowie die Einflussperimeter sind in Kapitel 3.2.6 zu finden.

2.3.3 Stationäre Dauermessungen

Die Stationären Dauermessungen werden an Standorten des Projektkonsortiums betrieben, um die Sicherheit (Beschädigung, Vandalismus, Zugänglichkeit, Störwirkungen) und die Wartung (Infrastruktur, Stromversorgung, Internetanschluss) gewährleisten zu können.

Die Auswahl der Standorte erfolgte anhand von HF-Quellen in der Nähe der Standorte und der Gemeindetypologie.

2.4 Datenmanagement

2.4.1 Messdateien und Datenbank

Die in den Messungen erzeugten Rohdaten lassen sich in zwei Kategorien gliedern: Messdaten auf Messpunktebene (NF und HF bzw. ExpoM-ELF und ExpoM-RF) und Metadaten auf Messungsebene (Messgerätinformationen, Messungsinformationen, GIS-Parameter). Um dies abzubilden, und neben der nötigen Datensicherung, -Nachverfolgung und Dokumentation auch Datenaggregationen zu ermöglichen, werden die Daten in einer zentralen Datenbank verwaltet. Wie in Abbildung 8 schematisch dargestellt, besteht diese aus drei Ebenen:

- Level 0: Datenablage der Rohdateien in einem FTP Verzeichnis. Dies ist einerseits die Import-schnittstelle der von den Messgeräten erzeugten Messdaten und weiteren zusammengestellten Metadaten, dient andererseits auch der Dokumentation der ursprünglichen, unveränderten Rohdaten («raw»). In einem Vorverarbeitungsschritt werden diese Rohdateien messungsspezifisch aufbereitet (Zuordnung zu Messungen, Zeitstempel, GPS-Signal, etc.) und stehen so («pro») für das Einlesen in Level 1 bereit.
- Level 1: zusammengefasste, vereinheitlichte Datenspeicherung in drei Tabellen («dataElf», «dataRf» und «metaMeas») einer MySQL Datenbank. Nach dem automatisierten Einlesen aus Level 0 werden die Messdaten hier aufbereitet und Korrekturen für bekannte, systematische Fehler (siehe Abschnitt 2.4.2) durchgeführt. Dies geschieht durch externe R-Skripte (siehe auch Kapitel 2.4.2), eine direkte Nachverfolgung aller Datenoperationen ist einerseits durch das integrierte Versions-Management, andererseits durch das redundante Abspeichern (kein Überschreiben) der erzeugten Daten gegeben. Zusätzlich zur automatisierten Datenverarbeitung finden manuelle Tests zur Qualitätskontrolle statt.
- Level 2 (und höher): Aggregationsebene der MySQL Datenbank. Die aufbereiteten Daten aus Level 1 werden entsprechend den gewünschten Auswertungen gefiltert und räumlich, zeitlich oder nach Kategorien etc. aggregiert. Dies gibt die Möglichkeit reproduzierbar vergleichende Analysen periodisch zu erzeugen und abzuspeichern.

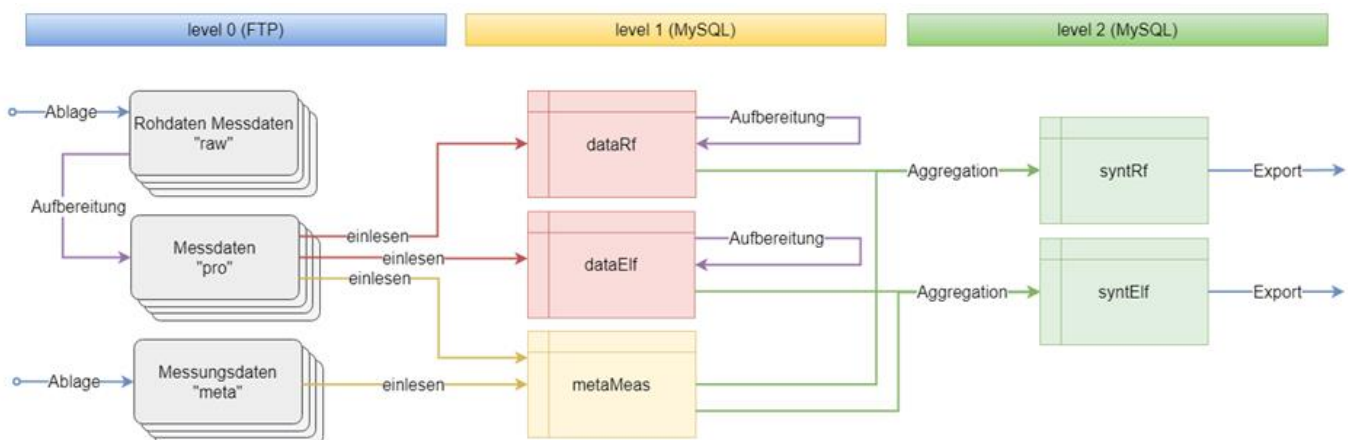


Abbildung 8: Vereinfachtes Schema der Datenbankstruktur

2.4.2 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung und -Analyse der Routen- und Spotmessungen ist grundsätzlich identisch. Bei den Routenmessungen werden anhand des Aktivitätsprotokolls (vgl. Abschnitt 2.2.1) die Messdaten der richtigen Mikroumgebung zugeordnet und entsprechend in der Datenbank abgelegt, bei den Spotmessungen werden die Daten analog den drei Teilmessungen zugewiesen. In einem ersten Schritt wird visuell die Plausibilität der Daten überprüft und Fehler im Messablauf (wie z.B. Abbruch des Messvorgangs) identifiziert. Anschliessend wird anhand von Korrelationsanalysen gemäss Eeftens M. S. B., 2018 mögliches Übersprechen (Crosstalk) zwischen benachbarten Frequenzbändern korrigiert (detaillierte Beschreibung der Crosstalk-Korrektur siehe Kapitel 2.5.5). Für die weitere Datenanalyse werden die Bänder in verschiedene Frequenzgruppen aufgeteilt und innerhalb davon quadratisch addiert. Die Definition der Frequenzgruppen erfolgte anhand von deren technischen Anwendung bzw. Herkunft.

Die HF Bänder wurden in 7 Gruppen eingeteilt. Die Nummern entsprechen den in Tabelle 2 aufgeführten Frequenzbändern:

- Rundfunk: Diese Kategorie umfasst Radio, DAB, TV in den Bändern 1 bis 8.
- Mobilfunk Uplink (Endgeräte): Dies entspricht den Bandnummern 9, 13, 14, 17, 20, 23
- Mobilfunk Downlink (Basisstationen): Dies entspricht den Bandnummern 11, 12, 15, 16, 18, 21, 25
- Mobilfunk TDD: Ein Spezialfall stellen die Time Division Duplexing (TDD) Frequenzbänder dar (743-753 MHz, 2570-2615 MHz sowie 3500 -3800 MHz), welche zeitversetzt für Up- und Downlink genutzt werden. Das bedeutet, dass aufgrund der Frequenz keine funktionelle Zuteilung in Up- und Downlink möglich ist. Es ist davon auszugehen, dass bei Aussenmessungen die Exposition durch Downlink dominiert wird, während in öffentlichen Verkehrsmitteln und in öffentlich zugänglichen Innenräumen Uplink auch eine wichtige Rolle spielen dürfte. Dies entspricht den Bandnummern 10, 24, 26, 27, 28
- W-LAN: Die Bandnummern 22 und von 29 bis 35
- Schnurlostelefon: Die Bandnummer 19
- Totale RF-EMF: Die gesamte Summe aller Bänder

Für niederfrequente Magnetfelder wird folgende Frequenzgruppierung durchgeführt:

- Eisenbahnstrom: das Hauptband entspricht Bandnummer 2 und die Oberwelle befindet sich in Bandnummer 3. Auf ein eigenes Band für die Oberwelle wurde verzichtet, weil deren Amplitude bei Testmessungen vernachlässigbar war.
- Haushaltsstrom: das Hauptband entspricht Bandnummer 4 und die Oberwellen sind die Bandnummern 6 und 8
- Tramstrom (gleichgerichteter Dreiphasen-Drehstrom): das Hauptband entspricht Bandnummer 10 und die Oberwellen sind die Bandnummern 12 und 14
- Totale ELF-MF: Dies entspricht der Summe der drei vorherigen Gruppen, d.h. ohne Berücksichtigung der unspezifischen Zwischenbänder.

2.4.3 Deskriptive Statistik

Alle Auswertungen von HF-Messungen werden mit der Leistungsflussdichte durchgeführt und dann für die Berichterstattung in elektrische Feldstärken (V/m) transformiert. Bei HF-Messungen wird die Datenanalyse sowohl für die RMS-Werte wie auch für die Peak-Werte durchgeführt sowie separat für jedes funktionelle Frequenzband. Da nicht bekannt ist, welche Parameter der Exposition biologisch am relevantesten sind, werden eine Vielzahl möglicher Expositionsmasse evaluiert. Dazu werden jeweils alle Daten von einer Berichtsperiode pro Typ Mikroumgebung aggregiert und folgende Summenstatistik berechnet: Minimum, Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum sowie verschiedene Perzentile (25., 75., 95. und 99.).

Man beachte, dass wenn im Folgenden bei HF-EMF Daten der Ausdruck Mittelwert verwendet wird, vom arithmetischen Mittelwert der Leistungsflussdichte gesprochen wird, welcher dann in elektrische Feldstärke transformiert wird. Das gleiche gilt für die Bildung von Summen über verschiedene Frequenzen. Es sei erwähnt, dass diese Form der Mittelwertbildung nur für Effektivwerte (RMS) physikalisch zutreffend ist. Zur Vereinfachung der Darstellung werden trotzdem im Folgenden mit der gleichen Methodik auch Summen bzw. Mittelwerte von Peak-Werten gebildet. Die Peak-Werte verschiedener Frequenzen treten aber während eines Messintervalls im Allgemeinen zu verschiedenen Zeitpunkten auf. Das bedeutet, dass die Summe der Peak-Werte für verschiedene Frequenzen zu einer Überschätzung der ausgewiesenen Peak-Werte führt. Jedoch ist zu beachten, dass während einem Messintervall von sechs Sekunden alle Frequenzbänder nacheinander gescannt werden. Insofern können kurzfristige Peaks verpasst werden, was zu einer Unterschätzung der Peakwerte beiträgt. Das gewählte Vorgehen hat den Vorteil, dass es ein robustes Mass bildet, welches aussagekräftig die typische zeitliche Dynamik zwischen Mittelwert und Peak-Werten wiedergibt (sogenannter Crest-Faktor).

2.5 Messinstrumente

Für die Messungen kommen tragbare Exposimeter mit integriertem Datenlogger von Fields at Work zum Einsatz. Die Messung niederfrequenter Magnetfelder (NF-MF) wird durch das ExpoM-ELF Gerät abgedeckt während für die hochfrequenten elektromagnetischen Felder (HF-EMF) ExpoM-RF Geräte der letzten Generation (Revision 4) zum Einsatz kommen.

Die ExpoM Messgeräte (Abbildung 9) sind kompakt und leicht und verfügen über einen integrierten GPS-Logger. Diese eignen sich daher besonders gut für mobile Messungen. Die im Rahmen dieses Projektes vorgesehenen Spot-Messungen und stationären Messungen können damit aber ebenfalls durchgeführt werden, so dass eine optimale Vergleichbarkeit aller Messergebnisse gewährleistet ist.



Abbildung 9: Eingesetzte Messgeräte: ExpoM-ELF (links) und ExpoM-RF 4 (rechts)

Messgeräte der ExpoM-Familie werden weltweit verwendet und wurden in den letzten Jahren für zahlreiche Studien und Messkampagnen im In- und Ausland eingesetzt.

2.5.1 Allgemeine Gerätespezifikationen

Das ExpoM-ELF ist ein 3-Achsen Magnetfeldmessgerät, das den Frequenzbereich von DC bis 100 kHz abdeckt und in der Standard-Empfindlichkeit Magnetfeldstärken bis $\pm 1500 \mu\text{T}$ erfassen kann. Die Messungen erfolgen im Zeitbereich und enthalten somit den höchstmöglichen Grad an Information. Bandselektive Auswertungen werden mithilfe nachträglicher digitaler Signalverarbeitung (FFT) der Zeitbereichsmessungen vorgenommen.

Das ExpoM-RF 4 ist ein konfigurierbares, bandselektives Exposimeter für hochfrequente elektromagnetische Felder von 50 MHz bis 6 GHz und erfasst die elektrische Feldstärke in V/m. Es stehen drei Empfindlichkeitsbereiche (6, 20 und 50 V/m) zur Verfügung. Das Gerät misst bandselektiv innerhalb einer selektierbaren Bandbreite von 35, 75 oder 100 MHz. Es können Bänder mit beliebigen Mittenfrequenzen innerhalb des spezifizierten Messbereichs definiert werden. Das ExpoM-RF nimmt in jedem Messintervall eine Stichprobe der Immission in allen vorkonfigurierten Bändern (siehe Tabelle 2). Aus diesen Stichproben (je ca. 50 ms Messdauer) wird jeweils der Effektivwert (RMS) sowie der kurzzeitige Peak-Wert (Maximum) ermittelt und abgespeichert.

Die ausführlichen Gerätespezifikationen der beiden Geräte befinden sich auf den entsprechenden Produktseiten der Fields at Work Webseite (www.fieldsatwork.ch).

2.5.2 Auswahl der Frequenzbänder

Für dieses Projekt wurde eine Auswahl von je 35 Frequenzbänder im NF-MF und HF-EMF Bereich getroffen, welche alle wichtigen Rundfunk-, Mobilfunk- und drahtlosen Telekommunikationsdienste sowie durch Infrastruktur verursachte NIS-Immissionen abdeckt. Die 35 Frequenzbänder werden für jedes Gerät individuell in der echofreien Messkammer (Fernfeld) kalibriert.

Die HF-Frequenzbänder sind in Tabelle 2 aufgelistet und entsprechen weitestgehend spezifischen Diensten. Erklärungen zu den Abkürzungen sind im Glossar (Anhang I) zu finden.

Die NF-Bänder sind in Tabelle 3 aufgeführt. In der Schweiz werden die allermeisten Wechselstrombahnen mit einer Frequenz von 16.7 Hz betrieben. Der Strom der allgemeinen Stromversorgung weist eine

Frequenz von 50 Hz auf. Trams, Trolleybusse und Gleichstrombahnen werden mit Gleichstrom betrieben. Da dieser im Normalfall durch eine Gleichrichtung von Dreiphasenwechselstrom (mit einer Frequenz von 50 Hz) erzeugt wird, kann dem Gleichstrom ein Wechselstromanteil von 300 Hz (6-faches von 50 Hz) überlagert sein (sog. Rippelstrom), wie in Abbildung 10 qualitativ erläutert. In Tabelle 3 sind mit Bahnstrom (16 bis 17 Hz), Netzspannung (50 Hz) und gleichgerichtetem Drehstrom (300 Hz, „Tram“) sowie teilweise Oberwellen davon einige spezifische Frequenzbänder enthalten, welche die Felder von weit verbreiteten Quellen erfassen. Das restliche Spektrum zwischen 5 Hz und 100 kHz wird durch unspezifische Zwischenbänder abgedeckt und vollständig erfasst. Mit Stand März 2022 werden diese unspezifischen Bänder bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt, weil darin im Rahmen der bisher erfolgten Auswertungen keine nennenswerten Signale festgestellt werden konnten. Die Daten sind trotzdem vollständig in der Datenbank enthalten und können bei Bedarf ausgewertet werden. Ebenso werden auf dem Dateisystem die Rohdaten aus den Messgeräten gespeichert, womit auch eine spätere Auswertung anderer Frequenzbänder technisch möglich wäre.

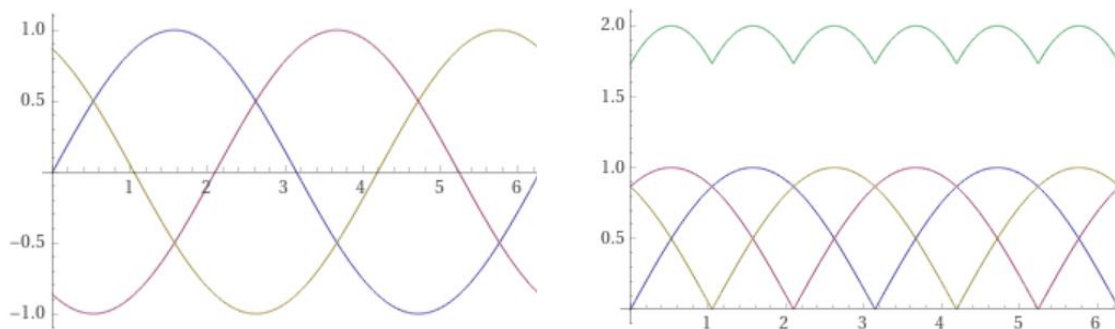


Abbildung 10: Qualitative Illustration des Wechselstromanteils des gleichgerichteten Drehstroms: die drei Phasen des Drehstroms entsprechen drei um jeweils 120° phasenverschobenen Sinuskurven (linke Grafik). Diese drei Wechselspannungen können gleichgerichtet werden (entsprechend dem Betrag der Sinuskurven in der unteren Hälfte der rechten Abbildung). Werden diese Spannungen zusätzlich addiert, ergibt sich eine Gleichspannung mit einer Rippelstruktur mit dem sechsfachen der Grundfrequenz (grüne Kurve in der rechten Grafik).

Tabelle 2: Auflistung der HF-Frequenzbänder.

HF-EMF Band r.	Beschreibung	Mittenfrequenz in MHz	Bandbreite in MHz	Dienst Kategorie
1	FM Radio	97.75	35	broadcast
2	DAB/DAB+	202	75	broadcast
3	Polycom / TETRAPOL	385	35	infrastructure
4	TETRAPOL, amateur, ISM 433	422.5	35	ISM, public
5	PMR/PAMR (Betriebsfunk)	452.5	35	infrastructure
6	Broadcasting CH (1)	507.5	75	broadcast
7	Broadcasting CH (2)	583.5	75	broadcast
8	Broadcasting CH (3)	659.5	75	broadcast
9	Mobile 700 UL (CH)	718	35	cellular uplink
10	Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35	cellular TDD
11	Mobile 700 DL (CH)	770.5	35	cellular downlink
12	Mobile 800 downlink	808.5	35	cellular downlink
13	Mobile 800 uplink	847	35	cellular uplink
14	Mobile 900 uplink	897.5	35	cellular uplink
15	Mobile 900 downlink	942.5	35	cellular downlink
16	Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	cellular downlink
17	Mobile 1800 uplink	1747.5	75	cellular uplink
18	Mobile 1800 downlink	1842.5	75	cellular uplink
19	DECT	1897.5	35	
20	Mobile 2100 uplink	1957	75	cellular uplink
21	Mobile 2100 downlink	2145	75	cellular downlink
22	ISM 2.4 GHz	2438	100	WiFi
23	Mobile 2600 uplink	2535	75	cellular uplink
24	Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	cellular TDD
25	Mobile 2600 downlink	2657	75	cellular downlink
26	Mobile 3500 (1)*	3475	100	cellular TDD
27	Mobile 3500 (2)*	3605	100	cellular TDD
28	Mobile 3500 (3)*	3735	100	cellular TDD
29	WiFi 5 GHz (1)	5200	100	WiFi
30	WiFi 5 GHz (2)	5325	100	WiFi
31	WiFi 5 GHz (3)	5450	100	WiFi
32	WiFi 5 GHz (4)	5575	100	WiFi
33	WiFi 5 GHz (5)	5700	100	WiFi
34	WiFi / SRD 5.8 GHz (1)	5825	100	WiFi
35	WiFi / SRD 5.8 GHz (2)	5950	100	WiFi

*Die Mittenfrequenzen und Bandbreiten wurden so ausgewählt, dass unter Berücksichtigung des Crosstalks der Frequenzbereich von 3400 bis 3800 MHz lückenlos abgebildet wird.

Tabelle 3: Auflistung der NF-Frequenzbänder.

NF-MF Band	Beschreibung	Mittenfrequenz in Hz	Bandbreite in Hz	Dienst Kategorie
1	LF Band 5 bis 15 Hz	10	10	
2	Eisenbahnstrom, 16 bis 17 Hz	16.5	1	Öffentlicher Verkehr
3	LF Band 18 bis 48 Hz in μ T	33	30	Unspezifisches Zwischenband
4	Netzspannung AC, 49 bis 51 Hz	50	2	Stromnetz
5	LF Band 52 bis 98 Hz	75	46	Unspezifisches Zwischenband
6	Netzspannung erste Oberschwingung, 99 bis 101 Hz	100	2	Stromnetz
7	LF Band 102 bis 148 Hz	125	46	Unspezifisches Zwischenband
8	Netzspannung zweite Oberschwingung, 149 bis 151 Hz	150	2	Stromnetz
9	LF Band 152 bis 298 Hz	225	146	Unspezifisches Zwischenband
10	Tramstrom (DC mit Rippelstrom), 299 bis 301 Hz	300	2	Öffentlicher Verkehr
11	LF Band 302 bis 598 Hz	450	296	Unspezifisches Zwischenband
12	Tramstrom erste Oberschwingung, 599 bis 601	600	2	Öffentlicher Verkehr
13	LF Band 602 bis 898 Hz	750	296	Unspezifisches Zwischenband
14	Tramstrom zweite Oberschwingung, 899 bis 901 Hz	900	2	Öffentlicher Verkehr
15	LF Band 902 bis 1000 Hz	951	98	Unspezifisches Zwischenband
16	HF Band - 1 bis 5 kHz	3000	4000	Unspezifischer Frequenzblock
17	HF Band 5.1 bis 10 kHz	7550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
18	HF Band 10.1 bis 15 kHz	12550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
19	HF Band 15.1 bis 20 kHz	17550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
20	HF Band 20.1 bis 25 kHz	22550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
21	HF Band 25.1 bis 30 kHz	27550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
22	HF Band 30.1 bis 35.1 kHz	32600	5000	Unspezifischer Frequenzblock
23	HF Band 35.1 bis 40 kHz	37550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
24	HF Band 40.1 bis 45 kHz	42550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
25	HF Band 45.1 bis 50 kHz	47550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
26	HF Band 50.1 bis 55 kHz	52550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
27	HF Band 55.1 bis 60 kHz	57550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
28	HF Band 60.1 bis 65 kHz	62550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
29	HF Band 65.1 bis 70 kHz	67550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
30	HF Band 70.1 bis 75 kHz	72550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
31	HF Band 75.1 bis 80 kHz	77550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
32	HF Band 80.1 bis 85 kHz	82550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
33	HF Band 85.1 bis 90 kHz	87550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
34	HF Band 90.1 bis 95 kHz	92550	4900	Unspezifischer Frequenzblock
35	HF Band 95.1 bis 100 kHz	97550	4900	Unspezifischer Frequenzblock

2.5.3 Messgenauigkeit

Die folgende Tabelle führt die Messunsicherheiten der beiden Messgeräte auf. Die Unsicherheitsanalyse des ExpoM-ELF bezieht sich auf die Messung von Wechselfeldern, d.h. die DC-Komponente ist nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Messgenauigkeit der eingesetzten Messgeräte. Die Berechnung der kombinierten Unsicherheit berücksichtigt die Verteilung der einzelnen Beiträge gemäss den etablierten GUM-Richtlinien (JCGM, 2008).

Einflussgrösse	Beschreibung	Verteilung	Beitrag ExpoM-ELF	Beitrag ExpoM-RF
Kalibrierung	Unsicherheiten der Referenz-Feldstärken während der Kalibrierungsmessungen durch Aufbau und Messgeräte	Normal	3.7%	10.7%
Frequenzgang	Variation der Kalibrierungskonstanten bei Messungen ausserhalb der kalibrierten Frequenzpunkte	Gleich	5.0%	28.3%
Nichtlinearität	Variation der Kalibrierungskonstanten bei Messungen ausserhalb der kalibrierten Amplitudenwerte / Interpolation	Gleich	1.0%	5.8%
Anisotropie	Richtungsabhängige Empfindlichkeit des Messgeräts	Gleich	1.0%	49.6%
Auflösung	Digitale Rundungs- und Offsetfehler	Gleich	0.5%	3.0%
Temperatur	Unsicherheit durch Temperaturdrift von Sensoren und Elektronik	Gleich	2.5%	10%
Wiederholbarkeit	Zufällige Variationen (Rauschen)	Normal	0.5%	1.0%
TOTAL	kombinierte Messunsicherheit (95% Konfidenzintervall)		3.9% / 0.33 dB	34.1% / 2.6 dB

Tabelle 4 zeigt, dass im NF Bereich die Messunsicherheit gering ist. Die erwartete Abweichung liegt bei 3.9%. Im HF Bereich ist die Unsicherheit mit $\pm 34.1\%$ deutlich grösser. Dies ist messtechnisch zu erwarten. Es ist zu betonen, dass sich diese Messunsicherheit auf einen einzelnen Messwert bezieht. Wird jedoch bei einer Routenmessung das Messgerät bewegt, werden sich die Unsicherheiten beim Mittelwert für die entsprechende Mikroumgebung zu einem grossen Teil kompensieren. Im Idealfall, wenn alle Fehler zufällig normalverteilt wären, würde die Unsicherheit mit der Wurzel der Anzahl Messwerte reduziert werden. Nimmt man also 150 Messwerte pro Mikroumgebung an (Messintervall von 6 Sekunden während 15 Minuten), würde sich die Messunsicherheit des Mittelwertes also im Idealfall auf $\pm 3\%$ reduzieren. In der Realität wird dies aber nicht erreicht, da einige der Fehlerbeiträge nicht unabhängig sein dürften. Dies betrifft v.a. die Temperatur, Kalibrierung und teilweise den Frequenzgang. Damit ist die tatsächliche Unsicherheit des Mittelwertes pro Mikroumgebung im Bereich von $\pm 10\%$. Dieser Unsicherheitsbereich wurde bei der früheren Geräteversion bei Parallelmessungen im Feld bestätigt (Eeftens M. D. S., 2020).

2.5.4 Einfluss der Körperabschirmung

Von Werk aus werden die ExpoM-RF Geräte in der echofreien Messkammer im Freifeld kalibriert. Dabei steht das Gerät auf einer freistehenden isolierten Plattform, welche einen vernachlässigbaren Einfluss auf das eintreffende Feld hat. In der Praxis wird das Messgerät bei Routenmessungen in einem Rucksack mitgeführt und in einem relativ kleinen Abstand (ca. 20 cm) zum Körper getragen. Diese Faktoren können die gemessene elektromagnetische Feldstärke zu einem gewissen Grad durch Dämpfungs-, Abschattungs- und Reflexionseffekte beeinflussen. Das Ausmass dieser Effekte wurde anhand des im Projekt eingesetzten Messaufbau für die Routenmessungen untersucht. Dazu wurden die Unterschiede

in der durchschnittlich erfassten Feldstärke ermittelt, wenn die Messgeräte unter verschiedenen Bedingungen und Einfallrichtungen exponiert werden. Die Messungen wurden im Sinne von kontrollierten Extrembedingungen in der echofreien Messkammer durchgeführt. In Alltagssituationen sind Abschattungseffekte durch das Vorhandensein mehrerer Quellen/Einfallrichtungen und Reflexionen in der Umgebung abmildert.

Frequenzen: Der kalibrierte Aufbau in der echofreien Messkammer hat eine untere Frequenzgrenze von 350 MHz. Dadurch muss auf eine Evaluation der zwei untersten Frequenzbänder der SwissNIS Liste (97.75 MHz und 202 MHz) verzichtet werden. Die restlichen 33 Bänder von 385 bis und mit 5950 MHz wurden in dieser Evaluation alle berücksichtigt.

Feldstärke: Da im Rahmen dieses Berichts primär relative Einflüsse untersucht werden, spielt die absolute Feldstärke keine entscheidende Rolle. Die Feldstärke wurde mit 0.875 V/m so gewählt, dass die Messwerte im optimalen Messbereich der Messgeräte zu liegen kommen.

Orientierung und Polarisation: Die Messung wurde aus vier Richtungen mit jeweils zwei Polarisierungen durchgeführt (total 8 Messungen pro Szenario). Da der Rucksack im Einsatz eine klar definierte Orientierung hat, wurden die Messungen auf vier seitliche Einfallrichtungen beschränkt. Diese sind in den folgenden Bildern dargestellt (sowohl beim Rucksack als dem darin verpackten Messkoffer). In den Bildern ist zudem die Definition der Polarisationsrichtung sichtbar. Vertikale Polarisation herrscht dann, wenn das E-Feld parallel zur längeren Seite des Rucksacks/Koffers ausgerichtet ist.



Abbildung 11: Bezeichnungen und Orientierung des Messkoffers und Rucksacks mit Definition der Polarisation des einfallenden Feldes

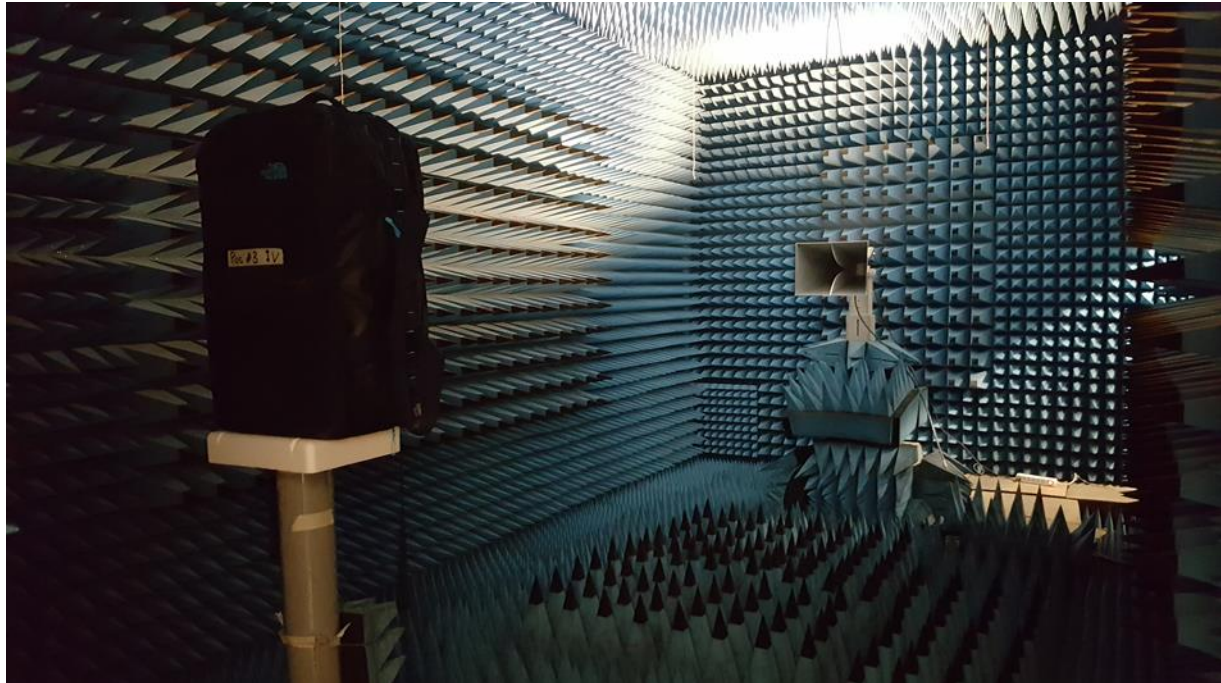


Abbildung 12: Aufbau in der echofreien Kammer

Ergebnisse: Die folgenden Grafiken fassen die gemessenen Unterschiede relativ zur Referenzsituation (ExpoM-RF Gerät im Freifeld) zusammen. Die farbigen Kreise stellen die relativen Unterschiede der einzelnen Messungen (8 Einfallrichtungen) dar, während die schwarzen Punkte den relativen Unterschied nach Mittelung über alle Einfallrichtungen darstellen.

In einer ersten Messung (Abbildung 13) wurde der Einfluss des Messrucksacks isoliert betrachtet. Der Stoff, Kunststoffteile und die Nähe zu den anderen zwei Messgeräten im Koffer führen zu einer Verschiebung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit. Dieser Effekt ist um 500-700 MHz sowie um 3.5 GHz besonders ausgeprägt. Wenn jedoch der über alle Richtungen gemittelte Wert betrachtet wird, kommt es nicht zu nennenswerten systematischen Abweichungen (-1.2% über alle Frequenzen gemittelt). Die Extremwerte betragen -8.5% bzw. +12%. Abweichungen in dieser Grössenordnung können auch durch leichte Unterschiede in der Positionierung der Messgeräte herrühren.

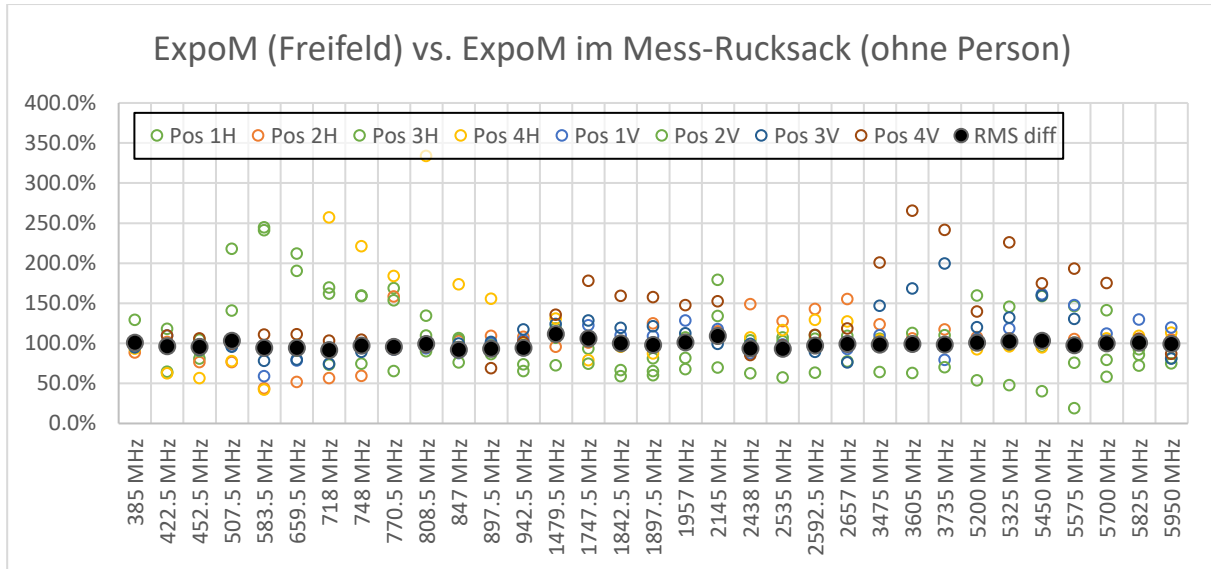


Abbildung 13: Relative Verschiebung der Messwerte wenn sich das ExpoM-RF im Mess-Rucksack (ohne Person) befindet

Wenn der Rucksack durch eine Person getragen wird, fallen die Effekte erwartungsgemäss stärker aus (Abbildung 14). Je nach Frequenz können nun auch ausgeprägtere Verschiebungen in den gemittelten Werten beobachtet werden (Extremwerte -32% bzw. +18%). Die über alle Frequenzen gemittelte Abweichung beträgt -11.6%, was auf eine leichte systematische Unterschätzung hinweist.

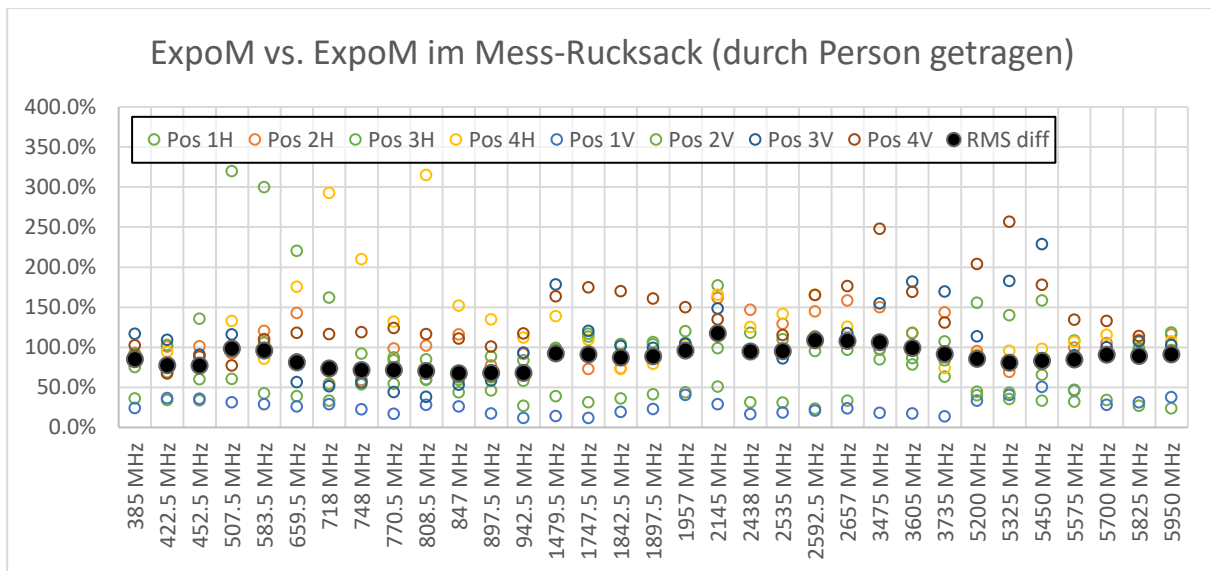


Abbildung 14: Relative Verschiebung der Messwerte wenn sich das ExpoM-RF im Mess-Rucksack befindet, welcher von einer Person getragen wird.

Die Messergebnisse in der echofreien Kammer deuten darauf hin, dass der Messaufbau für mobile Messungen möglicherweise zu einer leichten systematischen Unterschätzung der gemessenen Feldstärken führt. Allerdings beruhen diese Ergebnisse auf einem Laboraufbau mit vereinfachten Annahmen und einer beschränkten Anzahl Einfallrichtungen des elektromagnetischen Feldes.

Die durchschnittliche Abweichung wird als akzeptabel eingestuft, deshalb wird auf systematische Korrekturen der Messwerte verzichtet. Würden solche Korrekturen eingeführt, müssten die Werte mit einer feiner aufgelösten Labormessung (mehr Einfallrichtungen und Variationen) sowie empirischen Vergleichen auf echten Routenmessungen frequenzabhängig validiert werden (beispielsweise Person mit Messrucksack vs. einzelnes Messgerät mit deutlich grösserem Abstand zur Person). Ansonsten bestünde das Risiko, mit durch den Messaufbau beeinflussten, vermeintlichen Korrekturfaktoren die Messwerte zu verfälschen.

2.5.5 Crosstalk-Korrektur

Crosstalk beschreibt den Umstand, dass ein Signal, das in einem Frequenzband A ("Aggressor") gesendet wird, zusätzlich in einem benachbarten Frequenzband B ("Opfer") aufgezeichnet wird. Dieser Effekt kann auftreten, wenn die beiden Frequenzbänder hinreichend nahe beieinanderliegen, sodass die Frequenzfilterung im Messgerät keine scharfe Trennung zwischen den Bändern erwirken kann.

Bei den hochfrequenten Messungen ist der Crosstalk bei bestimmten Frequenzbändern mit relativ geringem Frequenzabstand oder mit einer Überlappung vorhanden. Die Bandpaare, für die eine Crosstalk-Korrektur angewendet werden soll, werden durch den Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) zwischen diesen Bändern, dem Frequenzabstand zwischen den einzelnen Bändern und der qualitativen Korrelation der NIS-Quellen (ähnliche oder unterschiedliche Anwendung) bestimmt. Aus den 34 benachbarten Bandpaaren wurden 4 Bandpaare ausgewählt und in Tabelle 5 dargestellt, welche die festgelegten Kriterien für die Anwendung einer Crosstalk-Korrektur erfüllen.

Tabelle 5: *Ausgewählte Bandpaare zur Anwendung der Crosstalk-Korrekturen mit den entscheidenden Kriterien für die Auswahl.

Nr.	Band 1*	Band 2*	Ausschlaggebende Kriterien
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	Pearson-Korrelation > 0.36 Frequenzabstand: 3.5 MHz Nicht korreliert (Rundfunk / Mobiltelefone)
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	Pearson-Korrelation > 0.22 Frequenzabstand: -5 MHz korrelierte Anwendung (Mobilfunk)
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	Pearson-Korrelation > 0.20 Frequenzabstand: -12.5 MHz korrelierte Anwendung (Mobilfunk)
4	18-Mobile 1800 downlink	19-DECT	Pearson-Korrelation > 0.66 Frequenzabstand: 0 MHz Nicht korreliert (Mobilfunkantennen / Festnetztelefone)

Um die Crosstalk-Korrektur der HF-EMF-Daten durchzuführen, wurde ein von Eftens M. S. B. (2018) entwickeltes R-Skript verwendet. Die Korrekturalgorithmus besteht aus den folgenden Schritten:

- (1) Definition von Clustern, bei denen es zu Crosstalk kommen kann. Der Beginn und das Ende neuer Cluster fallen mit einer plötzlichen Änderung des absoluten Werts eines Bands oder des Verhältnisses zwischen dem Opfer- und dem Aggressor -Band zusammen. Diese Änderung wird als rate-of-change (ROC) bezeichnet und als Schwellenwert

für eine „plötzliche“ Änderung wurde ein Faktor 10 (RMS-Werte) bzw. 50 (Peak-Werte) innerhalb von 24 Sekunden festgelegt.

- (2) Wenn innerhalb solcher Cluster das Korrelationsniveau zwischen den beiden Bändern höher als ein definierter Schwellenwert ist (0,2 für unkorrelierte bzw. 0,4 für korrelierte Quellen), dann wird dem Opferband ein Substitutionswert zugewiesen. Als Ersatzwert wird das typische Expositionsniveau in jeder Messumgebung und für jedes Frequenzband berechnet: der Median der Exposition in diesem Frequenzband von den Messwerten, welche die Kriterien für eine Korrektur nicht erfüllen und in derselben Messumgebung erfasst wurden. Korrekturen wurden nur vorgenommen, wenn der Substitutionswert niedriger als der Messwert ist, so dass die Exposition nie nach oben korrigiert wird.

In Tabelle 6 sind die Auswirkungen der auf die ausgewählten Bänder angewandten Korrektur beispielhaft für den gesamten Datensatz der beiden ersten Routenmessung-Kampagnen dargestellt. So wurden beispielsweise 53.7 % der DECT-RMS-Datenpunkte korrigiert, was zu einer Verringerung der durchschnittlichen DECT-Exposition um 53.7 % für die RMS-Werte führt (Tabelle 6), während lediglich 0.4 % der Mobile 1800 DL - Datenpunkte korrigiert werden und die Reduktion der Exposition in diesem Band 1.6 % für die RMS-Werte beträgt. Anhang VII zeigt die Gesamtexpositionsreduktion (absolut und prozentual) nach Anwendung der Crosstalk-Korrektur für die ausgewählten Bandpaare für jeden Messumgebungstyp. Die Korrektur reduziert die mittlere HF-Gesamtexposition für jeden Messumgebungstyp um 0 % bis 3.8 % für RMS- und Spitzenwerte. Der DECT-Dienst ist am stärksten von der Crosstalk-Korrektur betroffen, gefolgt vom TDD-Dienst. Bei anderen Diensten (Downlink, Uplink, Broadcast) ist der Effekt der Korrektur sehr begrenzt.

Die grosse Reduktion der DECT-Exposition bei den Routenmessungen kommt daher, dass im DECT-Band Schnurlostelefone senden, welche hauptsächlich in Innenräumen eingesetzt werden, während die Routenmessungen vorwiegend im Freien stattfinden. Die „echten“ DECT-Messwerte sind daher bei den Routenmessungen sehr gering, sodass ein Beitrag aus Crosstalk anteilmässig entsprechend gross sein kann.

Tabelle 6: Ergebnisse der Crosstalk-Korrektur für die ausgewählten Bandpaare N: A) RMS-Werte (N = 102726) B) Spitzenwerte (N = 102739). Für jedes Band sind der unkorrigierte und der korrigierte Mittelwert sowie die mittlere Reduktion (prozentual und absolut) angegeben.

A)

Nr.	Band 1	Band 2	Korrelations-Schwellenwert	unkorrigierter Mittelwert Band 1 [V/m]	unkorrigierter Mittelwert Band 2 [V/m]	korrigierter Mittelwert Band 1 [V/m]	korrigierter Mittelwert Band 2 [V/m]	Anteil korr. Datenpunkte Band 1 [%]	Anteil korr. Datenpunkte Band 2 [%]	Mittlere Reduktion Band 1 [%]	Mittlere Reduktion Band 2 [%]	Mittlere Abweichung Band 1 [V/m]	Mittlere Abweichung Band 2 [V/m]
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	0.2	0.005	0.017	0.004	0.017	2.5	0.2	21.8	0.0	0.001	0.000
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	0.4	0.017	0.010	0.017	0.009	0.4	1.7	0.2	11.8	0.000	0.001
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	0.4	0.010	0.050	0.008	0.050	22.8	0.2	18.6	0.0	0.002	0.000
4	18-Mobile 1800 DL	19-DECT	0.2	0.122	0.061	0.121	0.028	0.4	53.7	1.6	53.7	0.002	0.032

B)

Nr.	Band 1	Band 2	Korrelations-Schwellenwert	unkorrigierter Mittelwert Band 1 [V/m]	unkorrigierter Mittelwert Band 2 [V/m]	korrigierter Mittelwert Band 1 [V/m]	korrigierter Mittelwert Band 2 [V/m]	Anteil korr. Datenpunkte Band 1 [%]	Anteil korr. Datenpunkte Band 2 [%]	Mittlere Reduktion Band 1 [%]	Mittlere Reduktion Band 2 [%]	Mittlere Abweichung Band 1 [V/m]	Mittlere Abweichung Band 2 [V/m]
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	0.2	0.056	0.183	0.044	0.183	5.6	3.2	21.6	0.1	0.012	0.000
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	0.4	0.183	0.113	0.183	0.092	2.0	2.6	0.1	18.8	0.000	0.021
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	0.4	0.113	0.401	0.091	0.400	29.9	0.3	19.7	0.1	0.022	0.001
4	18-Mobile 1800 DL	19-DECT	0.2	0.636	0.265	0.635	0.082	0.5	54.4	0.2	69.1	0.001	0.184

3. Ergebnisse

3.1 Routenmessungen

3.1.1 Messumgebungen

Im Jahr 2021 wurden zwei Messkampagnen von Routenmessungen durchgeführt. Die erste Kampagne dauerte von 21.07 bis 20.08 und die zweite von 26.10 bis 11.10. Insgesamt wurden 75 Mikroumgebungen gemessen, ihre Verteilung in der Schweiz ist in der Abbildung 15 dargestellt. Neben den eigentlichen Messstrecken im Freien wurden zudem in 53 öffentlichen Innenräumen gemessen und über eine Dauer von rund 32 Stunden Messdaten in öffentlichen Verkehrsmitteln erhoben.

Standorte von durchgeführten Routenmessungen

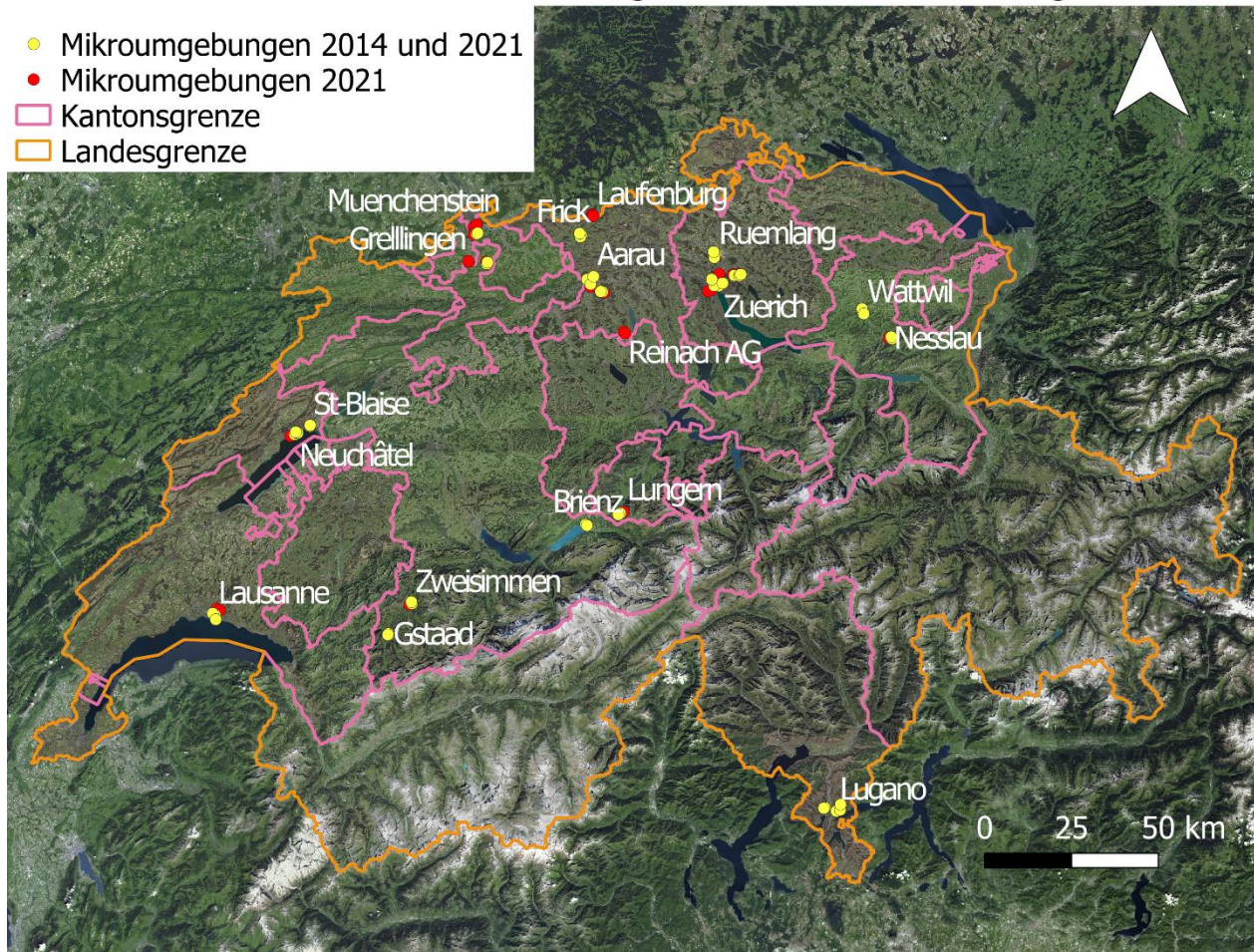


Abbildung 15: Karte der Standorte von durchgeführten Routenmessungen in 2014 und 2021. Quelle: <https://wmts.geo.admin.ch>

Tabelle 7 zeigt die Gesamtzahl der erfassten RMS Messpunkte mit mindestens 5 Minuten Messdauer pro Messumgebungen, die Messdauer und die Anzahl der gemessenen Umgebungen für jeden Messumgebungstyp für das RF-Gerät. Die genaue Anzahl Messpunkte unterscheidet sich zwischen dem RF-Gerät für Peak und dem ELF-Gerät geringfügig, weil die Geräte nicht exakt gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden können.

Eine Liste der besuchten Gemeinden mit ihrer typologischen BFS-Klassifizierung und die darin definierten Mikroumgebungen ist in Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 7: Anzahl der RMS Messpunkte mit mindestens 5 Minuten Messdauer, Messzeiten und der gemessenen Mikroumgebungen pro Typ Mikroumgebungen für das RF-Gerät.

	Mikroumgebungstyp / Messumgebungstyp	Messpunkte	Messdauer	Gemessene Umgebungen
1	Zug	17994	29:59:24	62
2	Tram	501	00:50:06	5
3	Bus	1098	01:49:48	11
4	Metro	105	00:10:30	1
5	Seilbahn	439	00:43:54	2
6	Grossstadtzentrum	977	01:37:42	5
7	Zentrales Wohngebiet	1015	01:41:30	6
8	Dezentrales Wohngebiet	1504	02:30:24	8
9	Stadtzentrum	2797	04:39:42	17
10	Wohngebiet	3413	05:41:18	20
11	Industriegebiet	1366	02:16:36	8
12	Sport-/Freizeitgebiet	554	00:55:24	3
13	Landwirtschaftliches Gebiet	633	01:03:18	3
14	Naturgebiet	940	01:34:00	5
15	Bahnhof	1582	02:38:12	17
16	Tramhaltestelle	284	00:28:24	5
17	Bushaltestelle	544	00:54:24	7
18	Flughafen	174	00:17:24	1
19	Supermarkt	670	01:07:00	5
20	Restaurants	4409	07:20:54	13
21	Museum	529	00:52:54	1
22	Hochschulcampus (ETH/UNI/FH)	403	00:40:18	3
23	Bibliotheken	151	00:15:06	1

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Anzahl Messumgebungen nach Umgebungstyp und Standortgemeinde ist in Anhang II zu finden, sowohl für eigentliche Mikroumgebungen wie auch öffentliche Bereiche.

Tabelle 8: Liste der besuchten Gemeinden, die Anzahl N der besuchten Mikroumgebungen und ihre typologische BFS-Klassifizierung (Bundesamt für Statistik, 2012).

Gemeinde		N	Gemeindetypologie gemäss BFS
Aarau	AG	5	Kernstadt einer mittelgrossen Agglomeration (121)
Bioggio	TI	2	Städtische Arbeitsplatzgemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (122)
Brienz (BE)	BE	2	Tourismusgemeinde eines ländlichen Zentrums (314)
Dübendorf	ZH	5	Städtische Arbeitsplatzgemeinde einer grossen Agglomeration (112)
Frick	AG	3	Industriegemeinde eines ländlichen Zentrums (316)
Gränichen	AG	3	Städtische Wohngemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (123)
Grellingen	BL	2	Periurbane Industriegemeinde mittlerer Dichte (226)
Saanen	BE	2	Tourismusgemeinde eines ländlichen Zentrums (314)
Laufenburg	AG	3	Ländliche zentral gelegene Industriegemeinde (326)
Lausanne	VD	5	Kernstadt einer grossen Agglomeration (111)
Lugano	TI	3	Kernstadt einer mittelgrossen Agglomeration (121)
Lungern	BE	3	Ländliche periphere Mischgemeinde (338)
Münchenstein	BL	6	Städtische Arbeitsplatzgemeinde einer grossen Agglomeration (112)
Nesslau	SG	3	Ländliche zentral gelegene Dienstleistungsgemeinde (327)
Neuchâtel	NE	4	Kernstadt einer mittelgrossen Agglomeration (121)
Reinach (AG)	AG	2	Städtische Industriegemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (136)
Rümlang	ZH	3	Periurbane Industriegemeinde hoher Dichte (216)
Seewen	BL	3	Periurbane Dienstleistungsgemeinde geringer Dichte (237)
Saint-Blaise	NE	2	Städtische Wohngemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (123)
Wattwil	SG	3	Städtische Industriegemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (136)
Zürich	ZH	8	Kernstadt einer grossen Agglomeration (111)
Zweisimmen	BE	3	Ländliche periphere Mischgemeinde (338)

3.1.2 HF Exposition

Die Verteilung der Mittelwerte der gesamten HF-Exposition pro Messumgebungstyp für alle Messpunkte ist in Abbildung 16 (Mittelwert der RMS-Effektivwerte) und in Abbildung 17 (Mittelwert der Peak-Werte) dargestellt, wobei die Mittelwerte wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben mit der Leistungsflussdichte gebildet werden. Die Mittelwerte für jeden Messumgebungstyp sind pro Messumgebung gemittelt und berücksichtigen nur Messungen mit mindestens 5 Minuten Messdauer. Die durchschnittlichen Expositionen sind alle geringer als 0.67 V/m (RMS-Effektivwerte). Die Werte sind tendenziell höher im Bereich vom ÖV (Bahnhof, Haltestellen, Flughafen) sowie in Industrie-, Sport- und Freizeitgebieten. Im Vergleich zur Variabilität innerhalb des gleichen Typs Messumgebung sind die Unterschiede zwischen den Messumgebungen eher gering. In Bezug auf die Peak-Werte ist ein ähnliches Muster zu beobachten, einfach auf höherem Level. Der Durchschnitt der Peak-Werte liegt bei maximal 4.2 V/m (Tramhaltestelle). Die Streuung der Messwerte über alle Messungen für die RMS- und Peak-Werte (ohne Aggregation pro Messumgebungen) kann Abbildung 18 und Abbildung 19 entnommen werden.

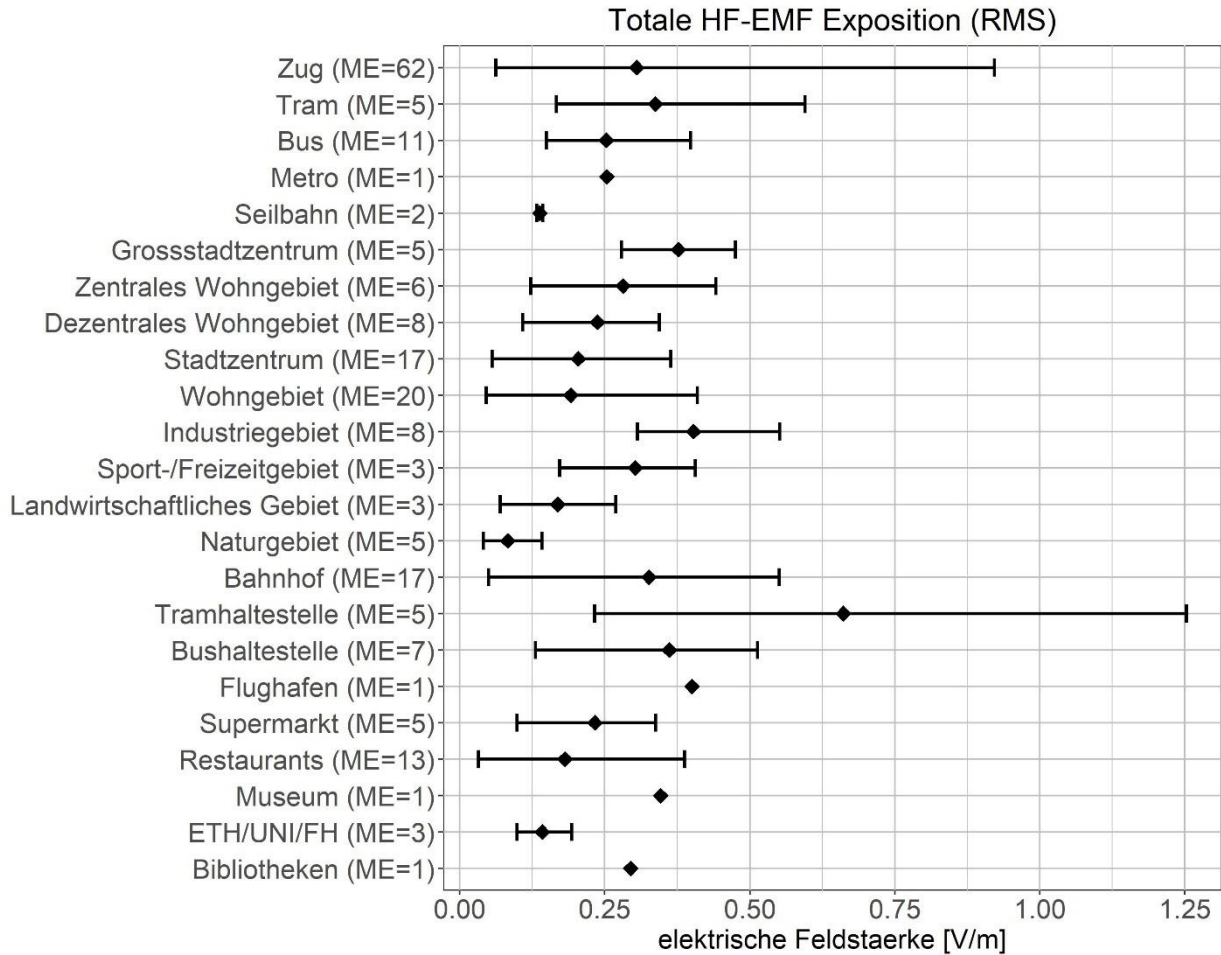


Abbildung 16: Vergleich der RMS HF-EMF Messungen der verschiedenen Messumgebungen. Die Raute zeigt jeweils den Mittelwert aller Messumgebungen pro Messumgebungstyp. Die Spannweite zeigt jeweils den tiefsten und höchsten Mittelwert pro einzelne Messumgebung. "ME" bezeichnet die Anzahl der enthaltenen Messumgebungen.

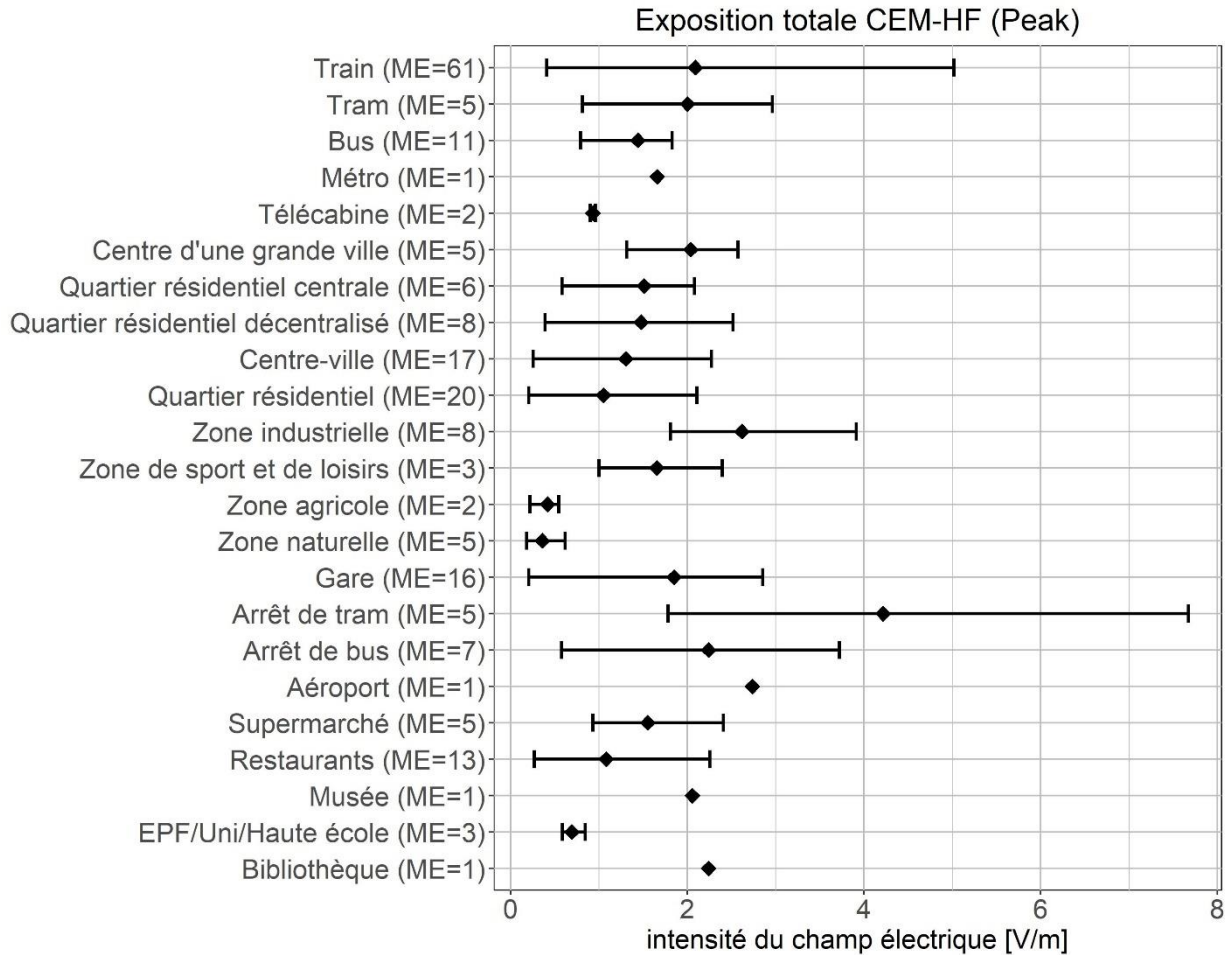


Abbildung 17: Vergleich der Peak HF-EMF der verschiedenen Messumgebungen. Die Raute zeigt jeweils den Mittelwert aller Messumgebungen pro Messumgebungstyp. Die Spannweite zeigt jeweils den tiefsten und höchsten Mittelwert pro einzelne Messumgebung. "ME" bezeichnet die Anzahl der enthaltenen Messumgebungen.

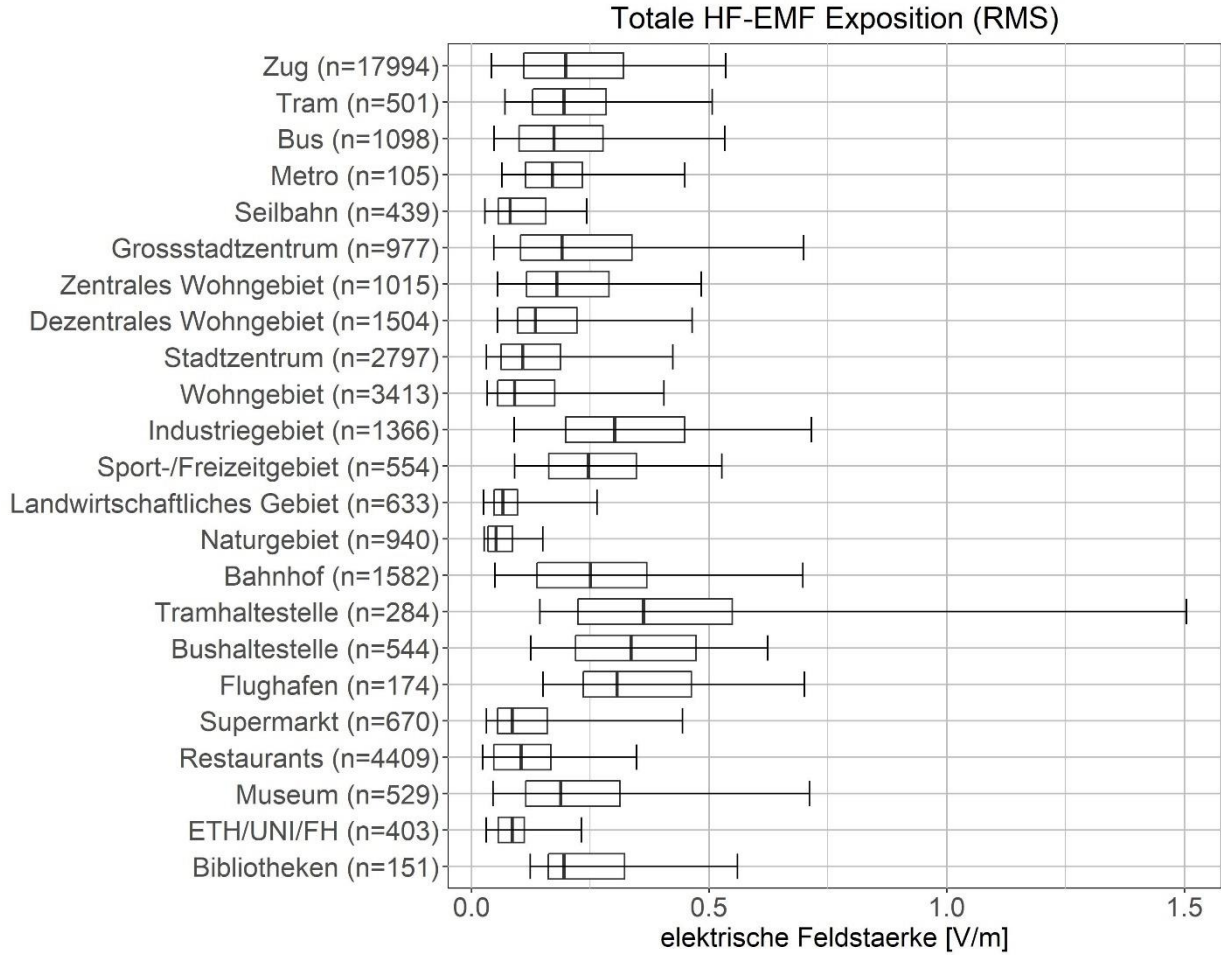


Abbildung 18: Streuung der RMS HF-EMF Messwerte der verschiedenen Messumgebungstypen. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kasten das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil pro Messumgebungstyp. "n" bezeichnet die Anzahl Datenpunkte pro Messumgebungstyp.

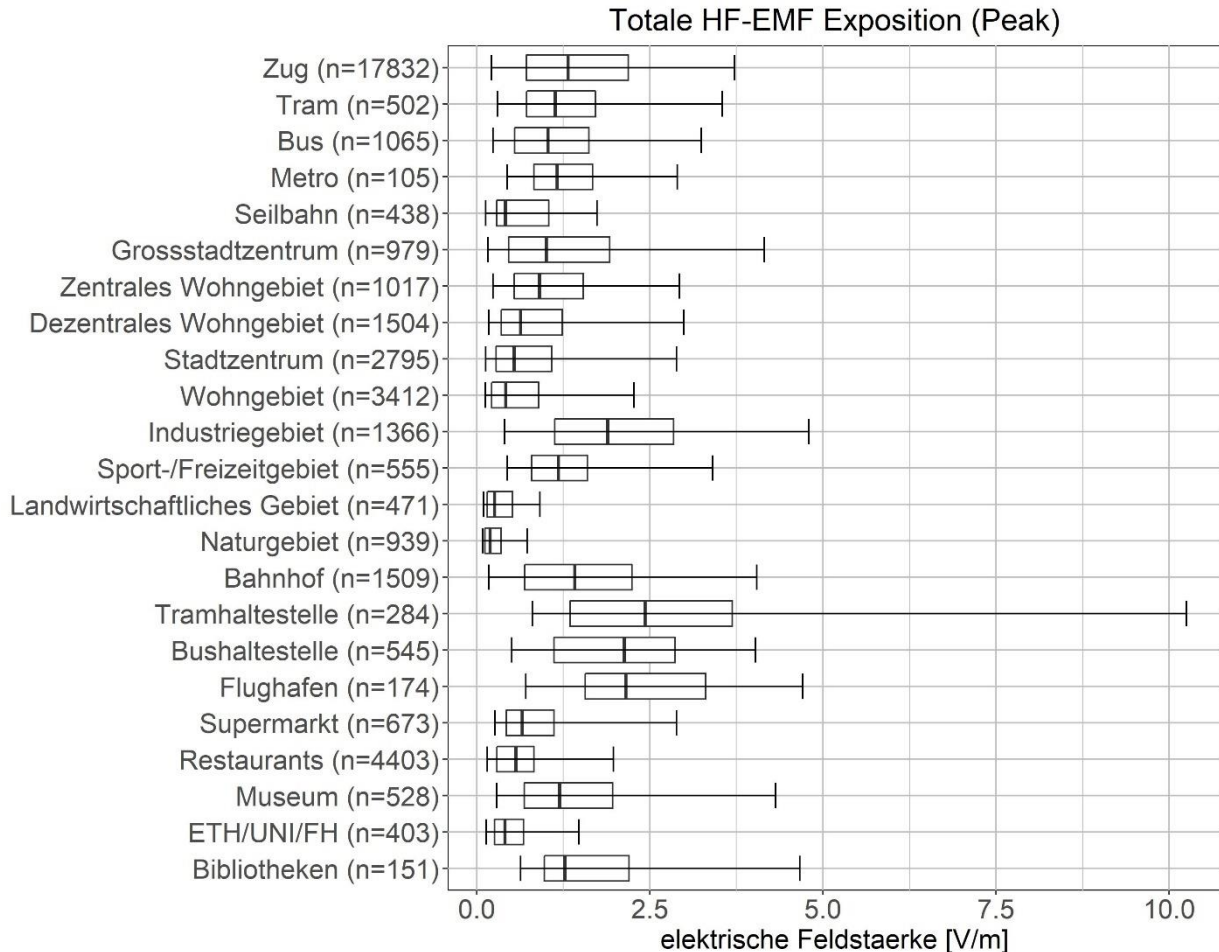


Abbildung 19: Streuung der Peak HF-EMF Messwerte der verschiedenen Messumgebungstypen. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kasten das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil pro Messumgebungstyp. "n" bezeichnet die Anzahl Datenpunkte pro Messumgebungstyp.

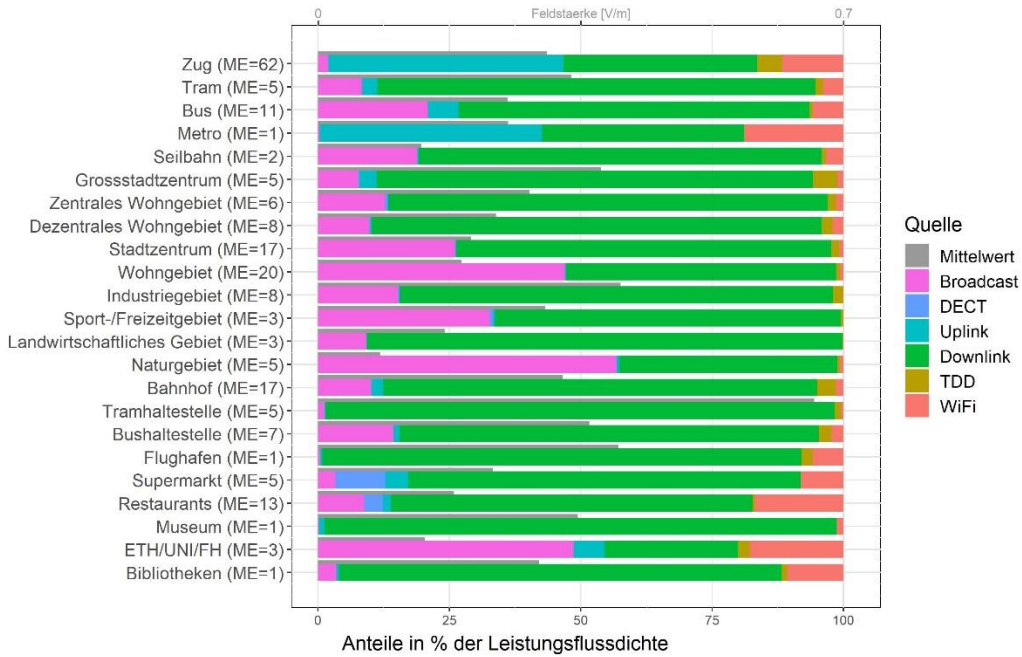
3.1.3 HF Exposition nach Quellentyp

Nachfolgend ist der Anteil der verschiedenen EMF-Quellen an der HF-Gesamtexposition dargestellt, aufgeteilt nach Messumgebungen. Abbildung 20 stellt die Anteile der A) RMS-Werte und B) Peak-Werte dar. Für die Darstellung wurden aus den Messdaten zuerst die Mittelwerte pro Messumgebung gebildet und anschliessend pro Messumgebungstyp über die einzelnen Messumgebungen gemittelt. Nur Messungen mit mindestens 5 Minuten Messdauer innerhalb der gleichen Messumgebung wurden berücksichtigt. Für die Mehrheit der Messumgebungen ist die Hauptexpositionsquelle der «Downlink» (Mobilfunkantennen). Bei der Metro ist der «Uplink» (Mobiltelefone) die Hauptexpositionsquelle und bei Naturgebiet und Hochschulen ist es der «Broadcast».

In Anhang III sind exemplarisch für die HF-RMS-Messdaten statistische Kenngrössen über die erfassten Messwerte aufgeschlüsselt nach dem Messumgebungstyp und den Dienstkategorien (Broadcast, Uplink, Downlink, TDD, WLAN) in Tabelle 17 bis Tabelle 21 aufgeführt.

A)

Anteil der verschiedenen Quellen an der hochfrequenten Gesamt-EMF



B)

Anteil der verschiedenen Quellen an der hochfrequenten Gesamt-EMF

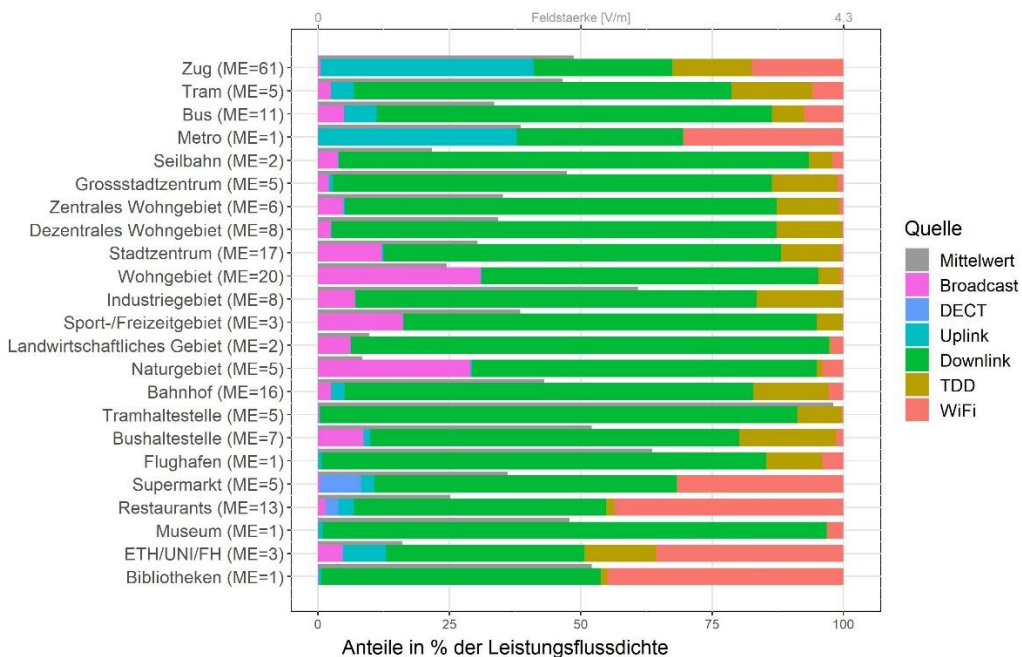


Abbildung 20: Untere x-Achse: Anteil der verschiedenen EMF Quellen an der Gesamt-HF-EMF, gemittelt über alle Messpunkte pro Messumgebungstyp: A) RMS-Werte, B) Peak-Werte. "ME" gibt die Anzahl der Messumgebungen mit mindestens 5 Minuten Messdauer an. Obere x-Achse: elektrische Feldstärke. Der Mittelwert entspricht dem Mittelwert der Gesamt-HF-EMF aus den Quellen pro Messumgebungstyp.

3.1.4 NF Exposition

Der Mittelwert der Summe der drei Hauptquellen der NF-MF Exposition (Eisenbahnstrom, Haushaltsstrom, Tramstrom) und der entsprechenden Oberwellen wurden für jeden Messumgebungstyp berechnet, wie in Abbildung 21 dargestellt. Die Mittelwerte für jeden Messumgebungstyp sind pro Messumgebung gemittelt und berücksichtigen nur Messungen mit mindestens 5 Minuten Messdauer. Die höchste mittlere NF-MF Exposition wurde mit einem Durchschnitt von 1.20 μT in Zügen gemessen, gefolgt von Bahnhöfen, Bus-, Tramhaltestellen und Tram. Die Streuung der Messwerte über alle Messungen für die NF Exposition (ohne Aggregation pro Messumgebung) kann Abbildung 22 entnommen werden.

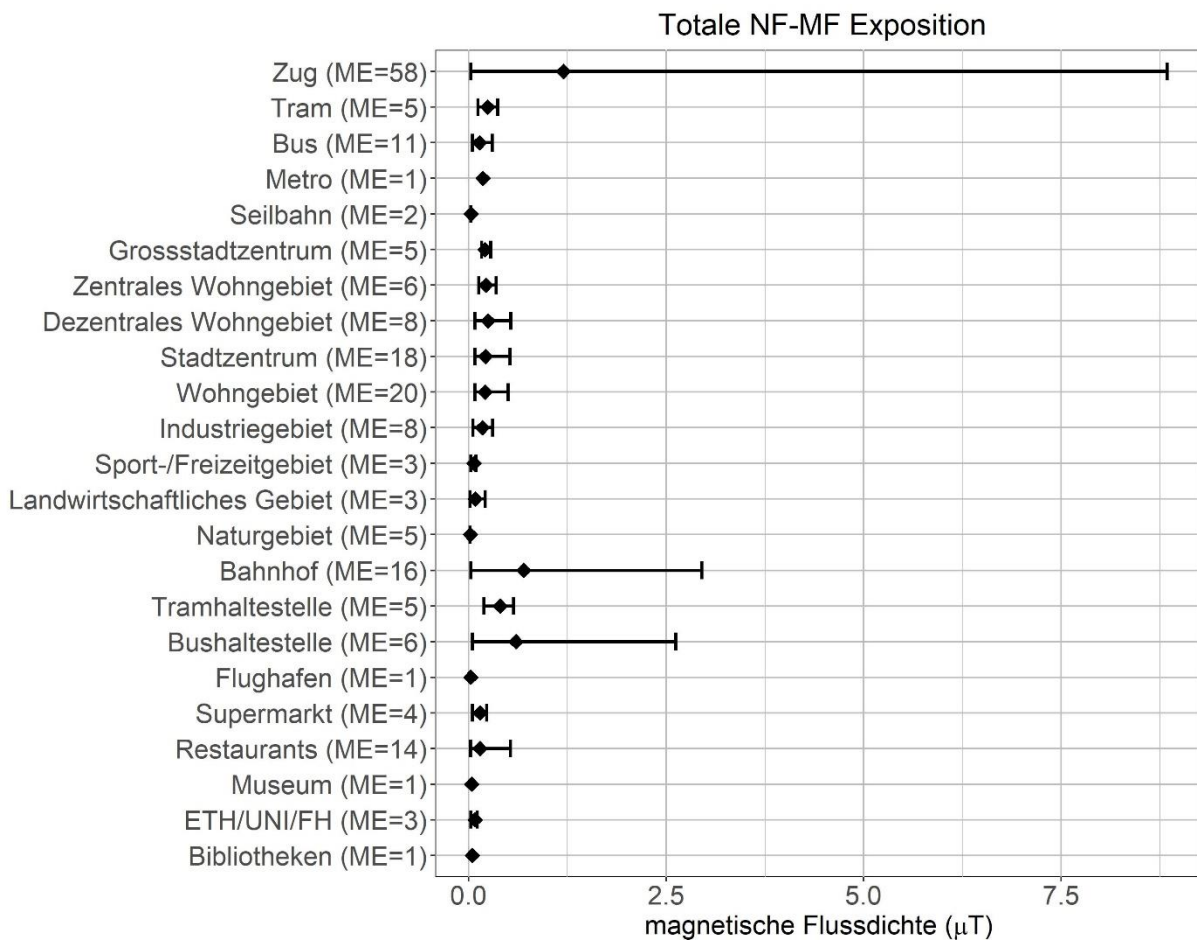


Abbildung 21: Vergleich der NF-MF der verschiedenen Messumgebungen. Die Raute zeigt jeweils den Mittelwert aller Messumgebungen pro Messumgebungstyp. Die Spannweite zeigt jeweils den tiefsten und höchsten Mittelwert pro einzelne Messumgebung. "ME" bezeichnet die Anzahl der enthaltenen Messumgebungen.

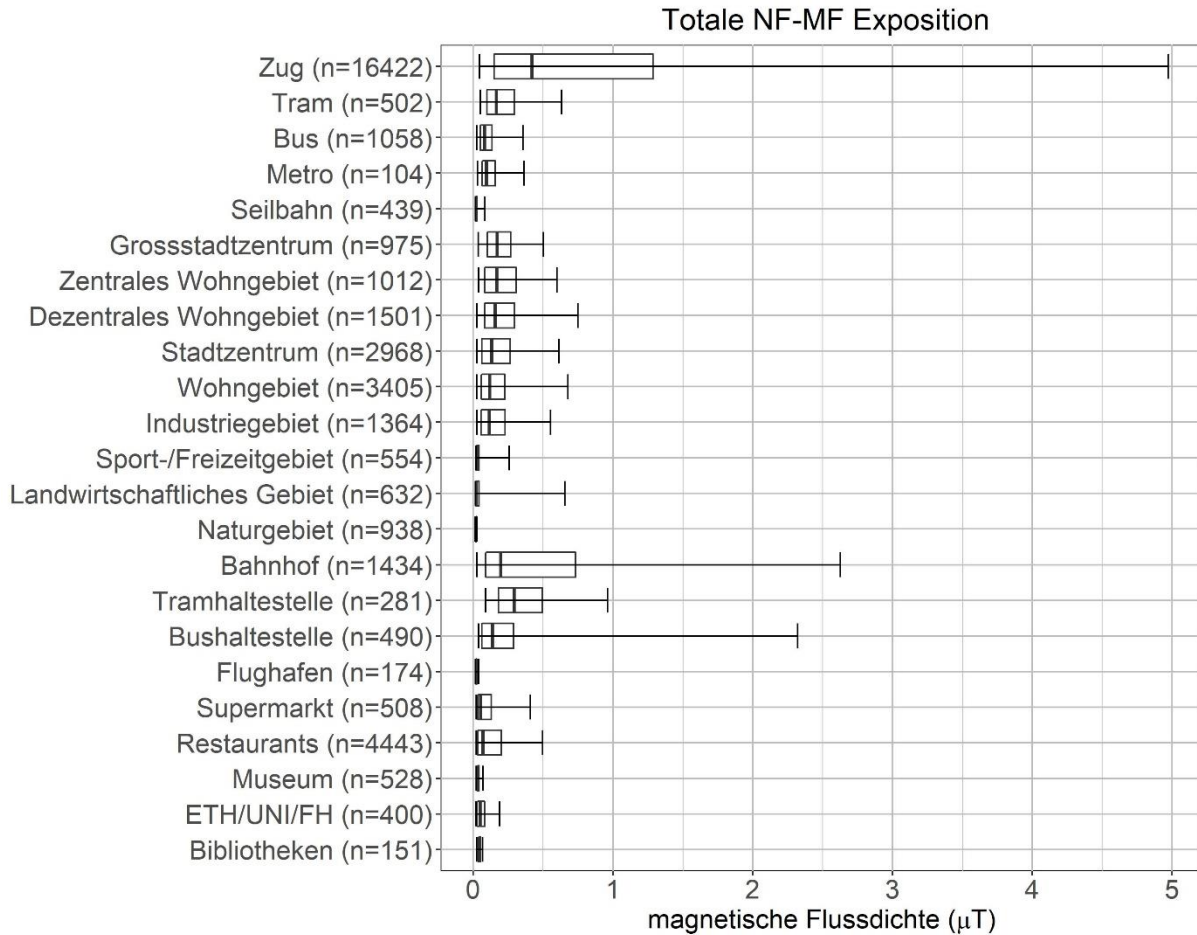


Abbildung 22: Streuung der NF-MF der verschiedenen Messumgebungstypen. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kasten das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil pro Messumgebungstyp. "n" bezeichnet die Anzahl Datenpunkte pro Messumgebungstyp.

Beim Vergleich von Abbildung 21 mit Abbildung 22 fällt auf, dass der höchste Mittelwert einer Messung im Zug über dem 95. Perzentil aller Messwerte in Zügen liegt. Dies lässt sich damit erklären, dass eine relativ kurze Messsequenz mit hoher Feldstärke in einem Zug zwar mit einem hohen Mittelwert in Abbildung 21 dargestellt wird, aber in der Gesamtheit aller Messungen oberhalb des 95. Perzentils liegt und damit in Abbildung 22 nicht abgebildet wird. Dies kann beispielsweise bei einer kurzen S-Bahn-Fahrt der Fall sein, welche einen hohen Anteil an Beschleunigungs- und Bremsphasen aufweist.

3.1.5 NF Exposition nach Quellentyp

Abbildung 23 stellt den Anteil der verschiedenen EMF-Quellen an der NF Exposition dar, aufgeteilt nach Messumgebungen. Für die Darstellung wurden aus den Messdaten zuerst die Mittelwerte pro Messumgebung gebildet und anschliessend pro Messumgebungstyp über die einzelnen Messumgebungen gemittelt.

Weil die Anreise zu den Routenmessungen ausschliesslich mit dem öffentlichen Verkehr erfolgte, befanden sich einige der aufgeführten Messumgebungstypen überproportional häufig in Bahnhofsnähe (z.B. Bushaltestellen oder Restaurants). Dementsprechend weisen solche Messumgebungstypen im Durchschnitt einen höheren Bahnstromanteil auf, als bei einer gänzlich zufälligen Auswahl von Messstandorten zu erwarten wäre.

Anteil der verschiedenen Quellen an der niederfrequenten Gesamt-EMF

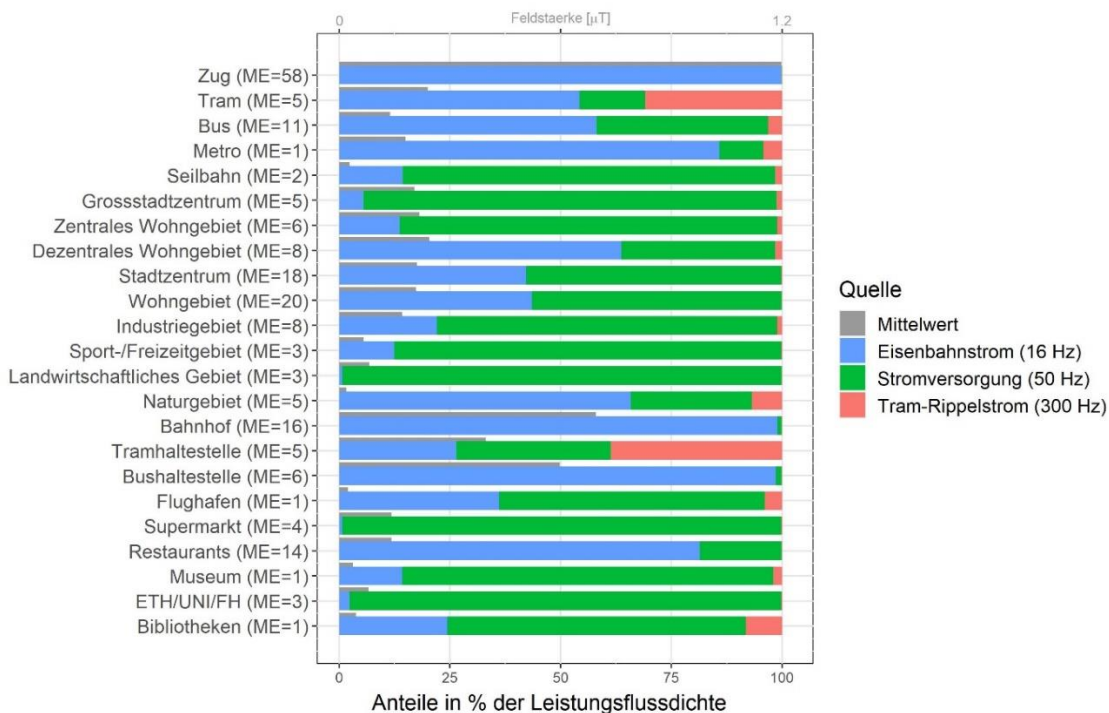


Abbildung 23: Untere X-Achse: Anteil der verschiedenen EMF-Quellen an der Gesamt-NF-MF (RMS), gemittelt über alle Messpunkte pro Messumgebungstyp. "ME" gibt die Anzahl der Messumgebungen mit mindestens 5 Minuten Messdauer an. Obere x-Achse: magnetische Feldstärke. Der Mittelwert entspricht dem Mittelwert der Gesamt-NF-MF aus den Quellen pro Messumgebungstyp.

3.1.6 Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts (IGW)

Die entsprechend der NISV-Summierungsvorschrift berechnete Ausschöpfung des Immissionsgrenzwertes ist in Abbildung 24 für Messpunkte mit mindestens 6 Minuten Messdauer dargestellt. Für die RMS HF-Daten wurde pro Messung ein gleitender quadratischer 6-min-Mittelwert gebildet. Pro Messzeitpunkt wurde anschliessend die Ausschöpfung des IGW über alle Frequenzbänder berechnet. Um die statistische Streuung der Grenzwertausschöpfung abzubilden, wurde keine weitere Zusammenfassung pro Messumgebungen oder NIS-Quelle gebildet, d.h. in der Grafik sind Messzeitpunkte einzeln

enthalten. Während bei den HF-Daten Messungen mit weniger als 6 min an Messdaten herausgefiltert wurden, sind bei NF-Daten alle Messungen enthalten, da für diese Frequenzen die NISV keine Mittelwertbildung vorsieht.

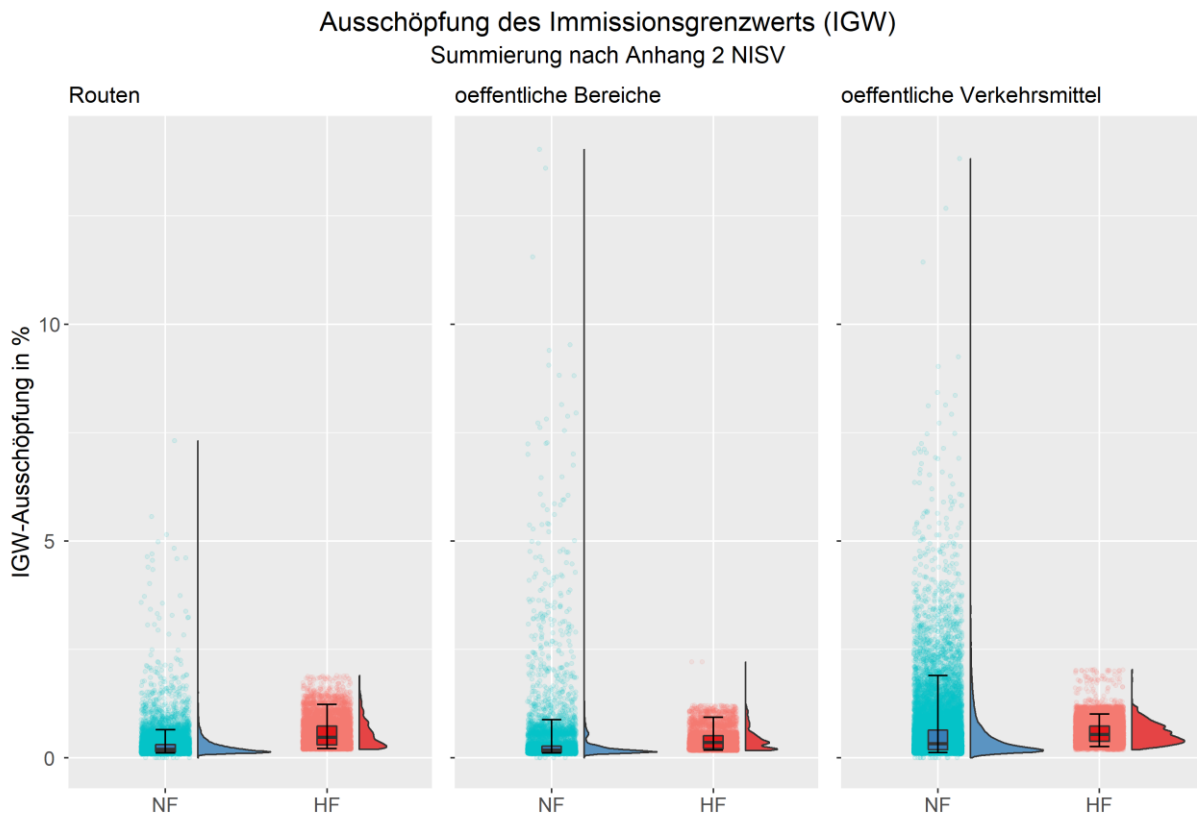
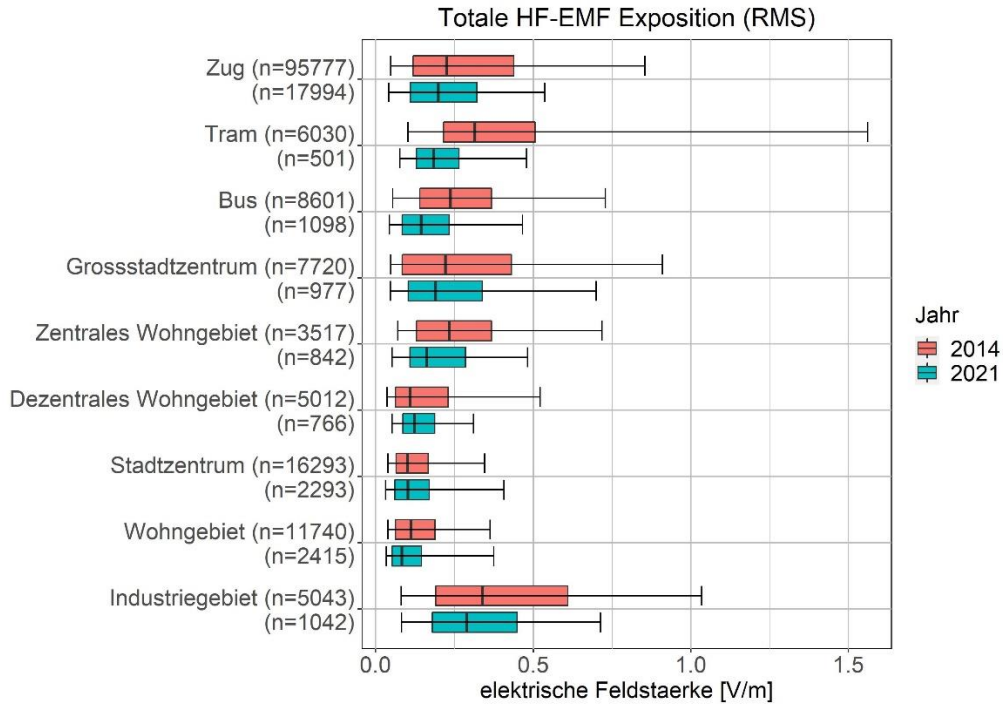


Abbildung 24: Statistische Verteilung der Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts über Messpunkte mit mindestens 6 Minuten Messdauer pro Messumgebung (ohne Mittelwertbildung). Die verschiedenen Frequenzen wurden nach der Summierungsvorschrift (NISV Anhang 2) addiert. In den Diagrammen sind links die einzelnen Messwerte (bei NF) bzw. die einzelnen 6-Minuten-Mittelwerte (bei HF) als Punkte dargestellt (Jitterplot). In der überlagerten Boxplot-Darstellung zeigt die Mittellinie den Median, die Kästen das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil der einzelnen Messwerte. Die jeweils rechts daneben dargestellten Kurven zeigen die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messwerte (bei NF) bzw. der 6-Minuten-Mittelwerte (bei HF). Die Skalierung des Diagramms ist auf die vorliegenden Werte begrenzt (maximale Ausschöpfung ca. 15%), um die Struktur der Werte sichtbar zu machen.

3.1.7 Vergleich mit Messdaten von 2014

Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der Messungen von 2021 mit den Messungen von 2014 (Röösli M. F. M., 2015) in den gleichen Mikroumgebungen für A) die totale und B) die Mobilfunk HF-EMF Exposition. Es fällt auf, dass die Werte 2021 geringer sind als 2014. Der Vergleich wurde für die gesamte HF-EMF und für die quadratische Summe aller Mobilfunk-Frequenzbänder durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass es einerseits Unterschiede in den gemessenen Frequenzbändern gibt, andererseits werden heute (2021) mehr Frequenzbänder für den Mobilfunk eingesetzt als 2014. Der Vergleich berücksichtigt alle Mobilfunk-Frequenzen in den Daten von 2021, um eine mögliche Verschiebung der Sendeleistung auf neue Frequenzen mitzuberechnen. Eine Gegenüberstellung der in den beiden Messkampagnen gemessenen Frequenzbänder ist in Anhang IV zu finden.

A)



B)

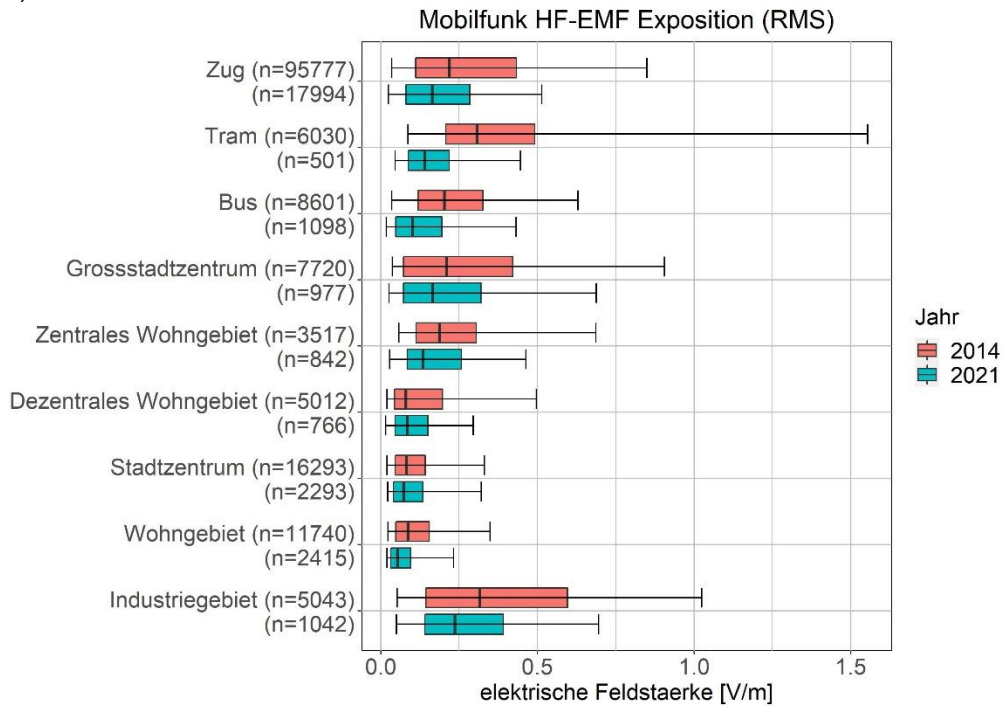


Abbildung 25: Vergleich der A) Totale B) Mobilfunk HF-EMF Exposition pro Messumgebungstyp für die Messungen von 2021 mit den Messungen von 2014. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kästen das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil pro Messumgebungstyp. "n" bezeichnet die Anzahl Datenpunkte pro Messumgebungstyp.

3.2 Spotmessungen

Bis zur Erstellung des Berichts (Stand 18.03.2022) konnten 4 Spotmessungen durchgeführt werden. Die Datengrundlage erlaubt daher noch keine Aussagen über die statistische Verteilung der Belastung in Wohnungen. Die dargestellten Abbildungen entsprechen den aktuell vorliegenden Messdaten und werden mit dem Ausbau der Datengrundlage aktualisiert.

3.2.1 Gesamte HF-Exposition

Die Streuung der Messwerte über alle Messungen (ohne Aggregation pro Messort) ist in Abbildung 26 (RMS-Effektivwerte) und Abbildung 27 (Peak-Werte) dargestellt. Die Daten sind nach der massgebenden NIS-Quelle und der Spot-Teilmessung gruppiert.

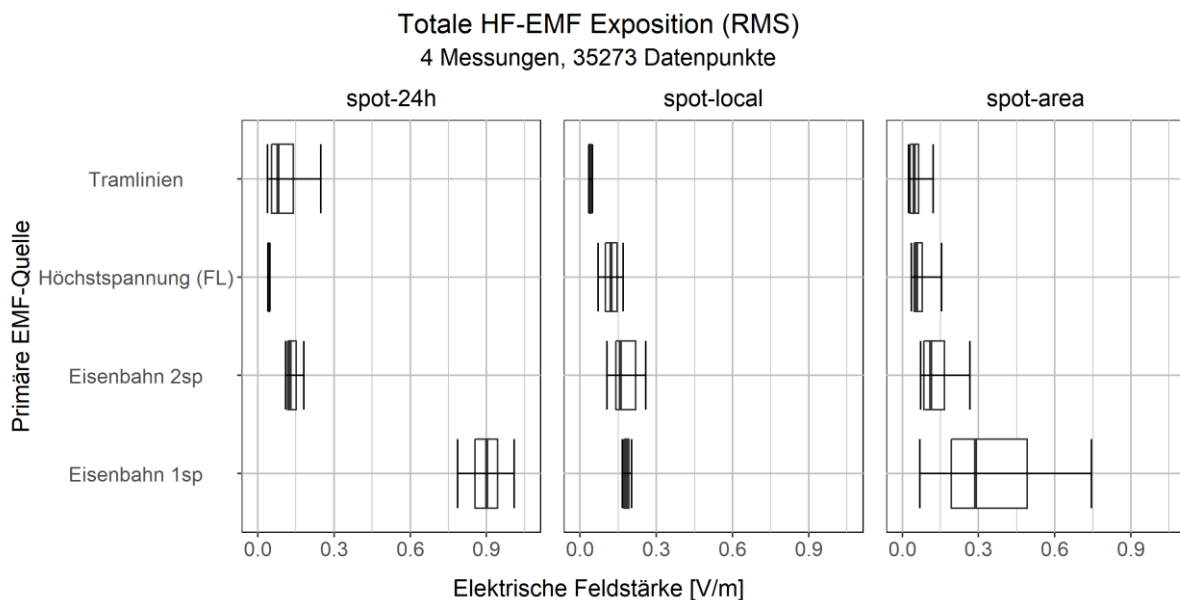


Abbildung 26: Streuung der RMS HF-EMF Messwerte der Spotmessungen, aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kasten das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil.

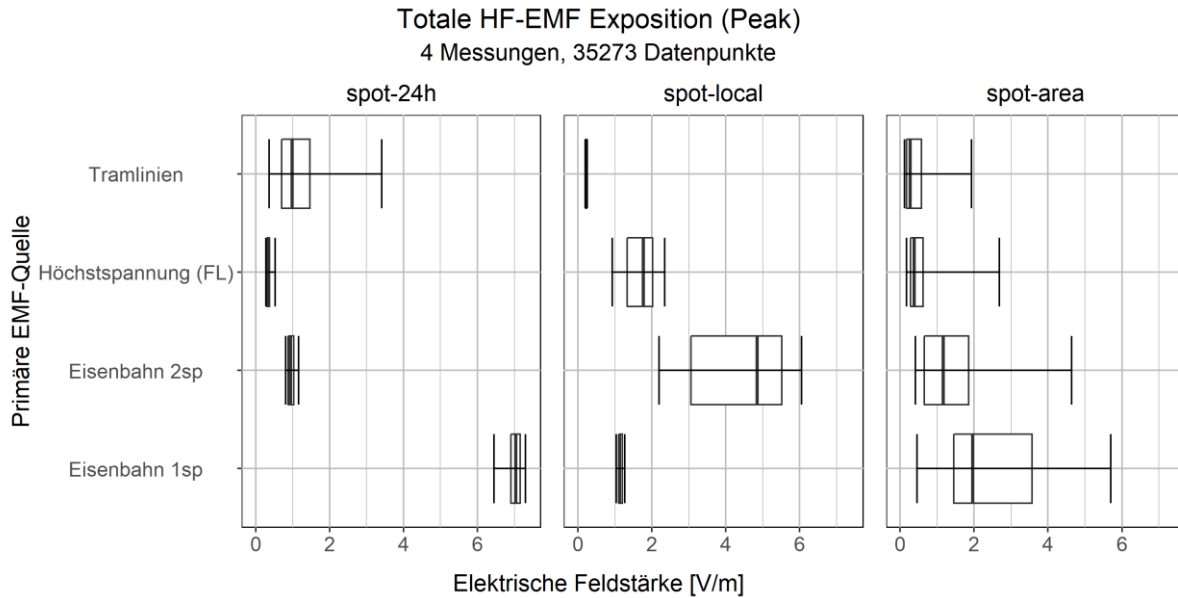


Abbildung 27: Streuung der Peak HF-EMF Messwerte der Spotmessungen, aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kästen das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil.

3.2.2 Gesamte NF-Exposition

Die Streuung der Messwerte über alle Messungen (ohne Aggregation pro Messort) kann Abbildung 28 entnommen werden. Die Daten sind nach der massgebenden NIS-Quelle und der Spot-Teilmessung gruppiert.

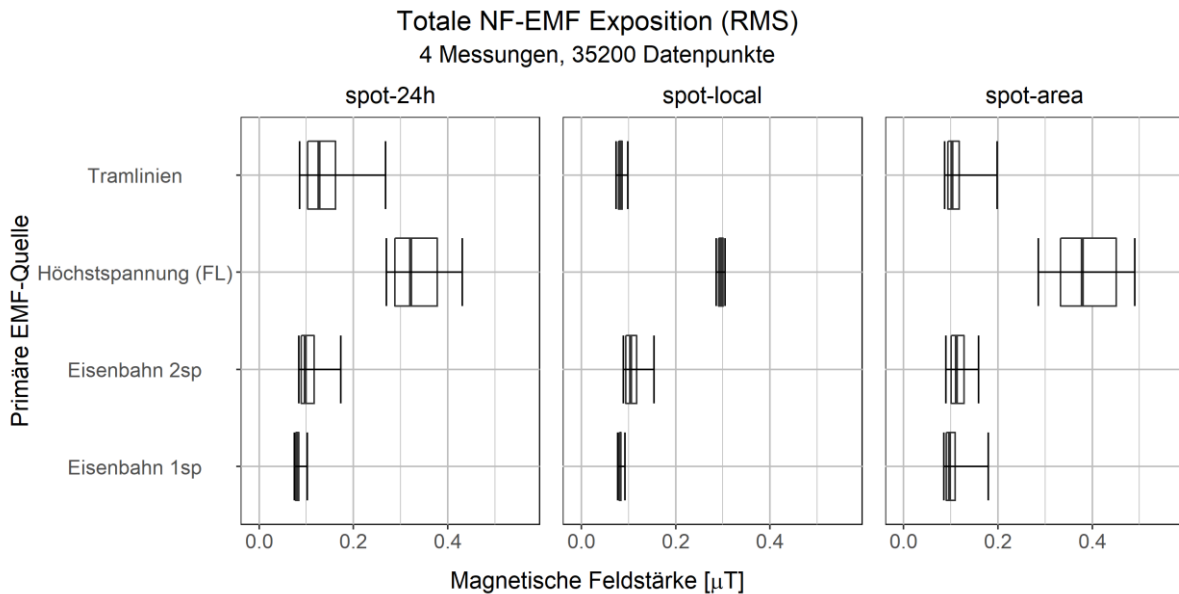


Abbildung 28: Streuung der RMS NF-EMF Messwerte der Spotmessungen, aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Die Mittellinie zeigt den Median, die Kästen das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil.

3.2.3 HF-Exposition nach Quellentyp

Nachfolgend ist der Anteil der verschiedenen EMF-Quellen an der HF-Gesamtexposition dargestellt, aufgeteilt nach dem primären Quellentyp, welcher für die Auswahl des Standorts für die Spotsmessung massgebend war. Abbildung 29 stellt die Anteile der RMS-Werte dar, in Abbildung 30 sind Verhältnisse der Peak-Werte dargestellt. Für die Darstellung wurden aus den Messdaten zuerst die Mittelwerte pro Messung gebildet und anschliessend pro primärem Quellentyp über die einzelnen Messungen gemittelt. Dabei werden die Mittelwerte wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben mit der Leistungsflussdichte gebildet. Da aktuell erst eine Messung pro Quellentyp vorliegt, entsprechen die Balkendiagramme jeweils einer Messung.

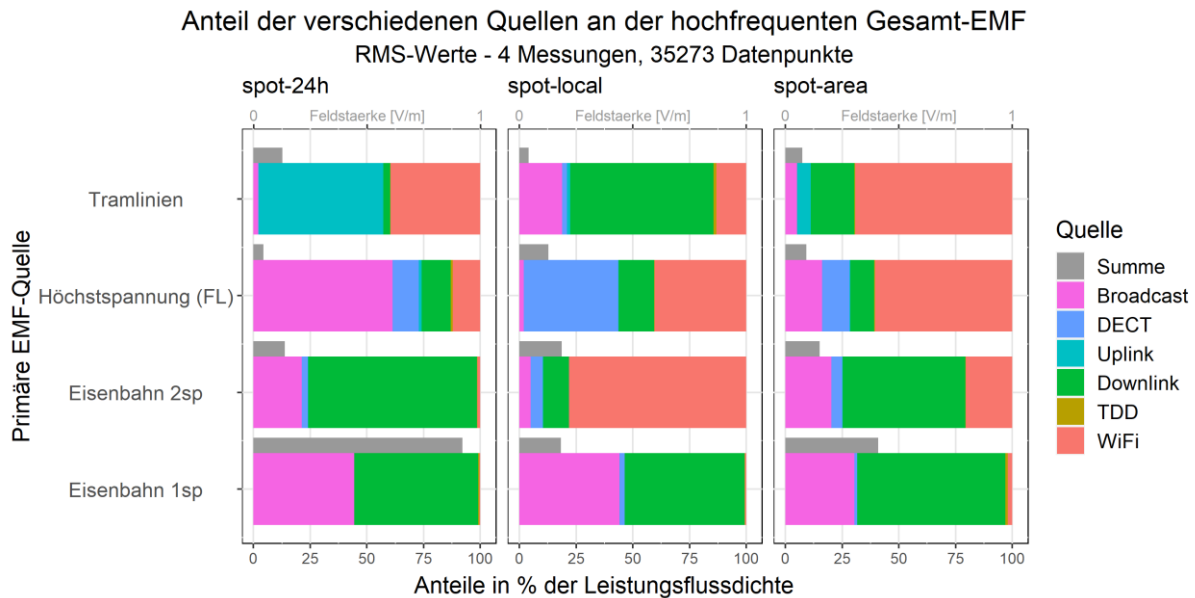


Abbildung 29: Untere X-Achse: Anteil der verschiedenen Quellen an der Gesamt-HF-EMF (RMS), gemittelt über alle Messpunkte pro Messung und aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Obere x-Achse: elektrische Feldstärke. Die Summe entspricht dem Mittelwert der Gesamt-NF-MF aus den Quellen.

Anteil der verschiedenen Quellen an der hochfrequenten Gesamt-EMF
 Peak-Werte - 4 Messungen, 35273 Datenpunkte

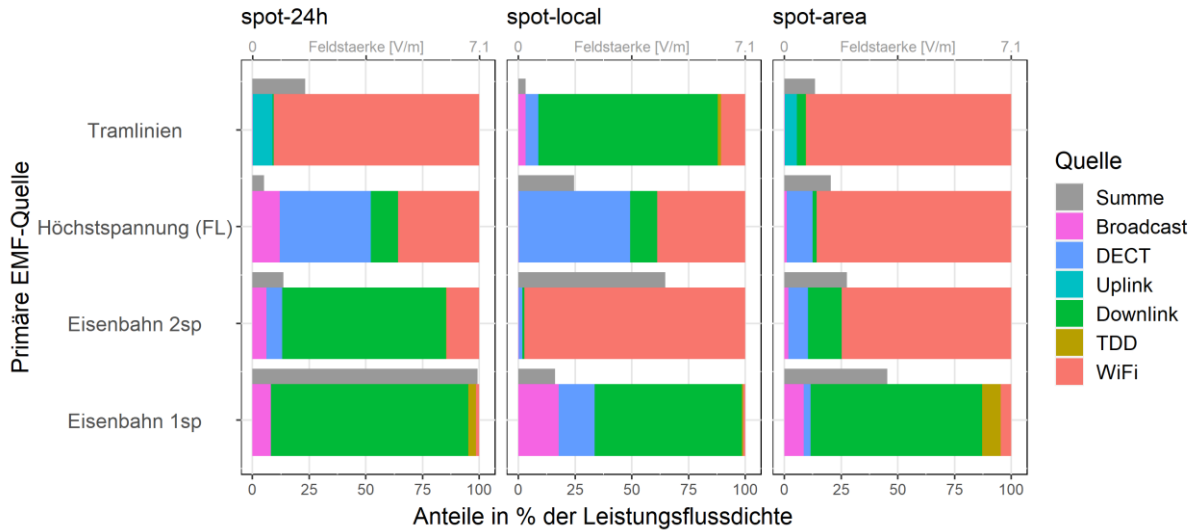


Abbildung 30: Untere x-Achse: Anteil der verschiedenen Quellen an der Gesamt-HF-EMF (Peak), gemittelt über alle Messpunkte pro Messung und aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Obere x-Achse: elektrische Feldstärke. Die Summe entspricht dem Mittelwert der Gesamt-HF-EMF aus den Quellen.

3.2.4 NF-Exposition nach Quellentyp

In Abbildung 31 ist der Anteil der verschiedenen Magnetfeld-Quellen an der NF-Gesamtexposition dargestellt, aufgeteilt nach dem primärem Quellentyp, welcher für die Auswahl des Standorts für die Spotmessung massgebend war. Für die Darstellung wurden aus den Messdaten zuerst die Mittelwerte pro Messung gebildet und anschliessend pro primärem Quellentyp über die einzelnen Messungen gemittelt. Da aktuell erst eine Messung pro Quellentyp vorliegt, entspricht das Balkendiagramm einer Messung.

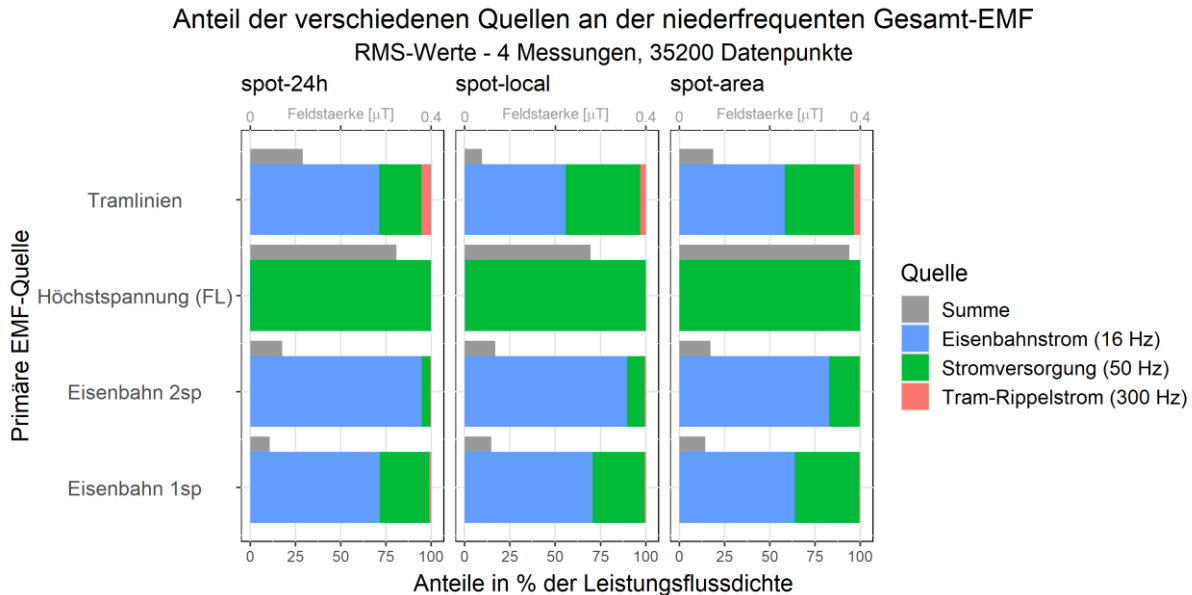


Abbildung 31: Untere x-Achse: Anteil der verschiedenen Quellen an der Gesamt-NF-MF (RMS), gemittelt über alle Messpunkte pro Messung und aufgeteilt nach Teilmessung (24h, local, area) und der primären EMF-Quelle in der Umgebung des Messstandorts. Beim Haushaltsstrom und Tramstrom sind neben der Grundfrequenz auch die ersten beiden Oberwellen berücksichtigt. Obere x-Achse: magnetische Feldstärke. Die Summe entspricht dem Mittelwert der Gesamt-NF-EMF aus den Quellen.

3.2.5 Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts

Die entsprechend der NISV-Summierungsvorschrift berechnete Ausschöpfung des Immissionsgrenzwertes ist in Abbildung 32 für alle Datenpunkte dargestellt. Für die HF-Daten wurde pro Messung ein gleitender quadratischer 6-min-Mittelwert gebildet. Pro Messzeitpunkt wurde anschliessend die Ausschöpfung des IGW über alle Frequenzbänder berechnet. Um die statistische Streuung der Grenzwertausschöpfung abzubilden, wurde keine weitere Zusammenfassung pro Messort oder NIS-Quelle gebildet, d.h. in der Grafik sind alle Messzeitpunkte einzeln enthalten.

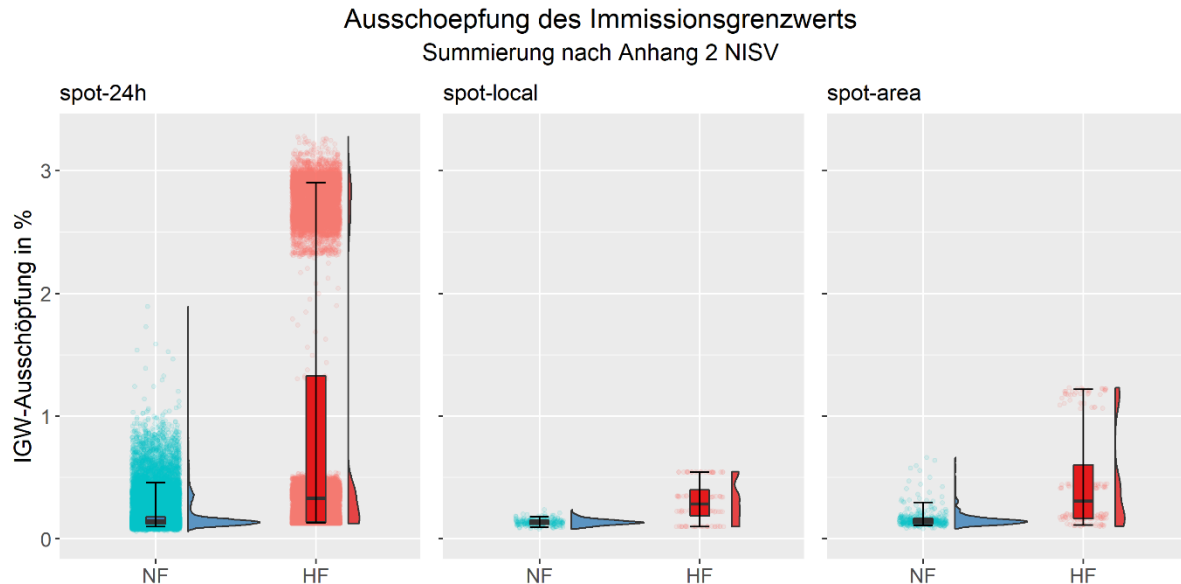


Abbildung 32: Statistische Verteilung der Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts über alle Messpunkte (ohne Mittelwertbildung). Die verschiedenen Frequenzen wurden nach der Summierungsvorschrift (NISV Anhang 2) addiert. In den Diagrammen sind links die einzelnen Messwerte (bei NF) bzw. die einzelnen 6-Minuten-Mittelwerte (bei HF) als Punkte dargestellt (Jitterplot). In der überlagerten Boxplot-Darstellung zeigt die Mittellinie den Median, die Kästen das 25. und 75. Perzentil und der Bereich das 5. und 95. Perzentil der einzelnen Messwerte. Die jeweils rechts daneben dargestellten Kurven zeigen die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messwerte (bei NF) bzw. der 6-Minuten-Mittelwerte (bei HF). Die Skalierung des Diagramms ist auf die vorliegenden Werte begrenzt (maximale Ausschöpfung ca. 3%), um die Struktur der Werte sichtbar zu machen.

3.2.6 Verteilung der Messorte für Spotmessungen

Die Verteilung der mit Stand Q1/2022 durchgeführten Spotmessungen und der Standortvorschläge bezüglich der massgebenden NIS-Quellen ist in Tabelle 9 aufgeführt. Tabelle 10 listet die Gebäudetypen auf, in denen Spotmessungen durchgeführt wurde. Abbildung 33 zeigt die Lage der erfolgten Spotmessungen in der Schweiz. Eine umfassende Auflistung aller Messorte inkl. der dazu gehörenden Mikroumgebungen ist in Anhang VI zu finden.

Tabelle 9: Verteilung der Messorte und Standortvorschläge für Spotmessungen mit Angabe der Einflussperimeters, Stand Q1/2022. Bei Eisenbahnlinien in Tunneln wurde aus Machbarkeitsgründen kein fixer Perimeter definiert.

Parameter Quelle	Perimeter	Anzahl Projekt	Anzahl Vorschläge	Anzahl gemessen
Mobilfunk klein	50	10	3	0
Mobilfunk mittel	100	10	3	0
Mobilfunk gross	150	10	3	0
Radio/TV bis 10 kW	100	5	1	0
Radio/TV >10 bis 50 kW	500	5	0	0
Radio/TV 50 bis 200 kW	2000	5	0	0
Höchstspannungsleitungen 220 /380kV (Freileitung)	200	7	2	1
Höchstspannungsleitungen 220 /380 kV (Erdleitung)	50	3	0	0
Hochspannungsleitungen 36-150kV (Freileitung)	100	5	0	0
Hochspannungsleitungen 1-36kV (Freileitung)	50	5	0	0
Hochspannungsleitungen 240/400V (Freileitung)	20	5	0	0
Unterwerke	200	2	0	0
Trafostationen	20	3	0	0
Eisenbahnlinien einspurig	50	7	4	1
Eisenbahnlinien doppelspurig	100	10	4	1
Eisenbahnlinien in Tunnel doppelspurig	-	3	0	0
Tramlinien	20	5	1	1
Total		100	21	4

Tabelle 10: Verteilung der Gebäudetypen mit durchgeführten Spotmessungen, Stand Q1/2022.

Gebäudetyp	Anzahl Messungen
Einfamilienhaus	2
Mehrfamilienhaus	1
Mit Gewerbe/Industrie	0
Bauernhaus	1

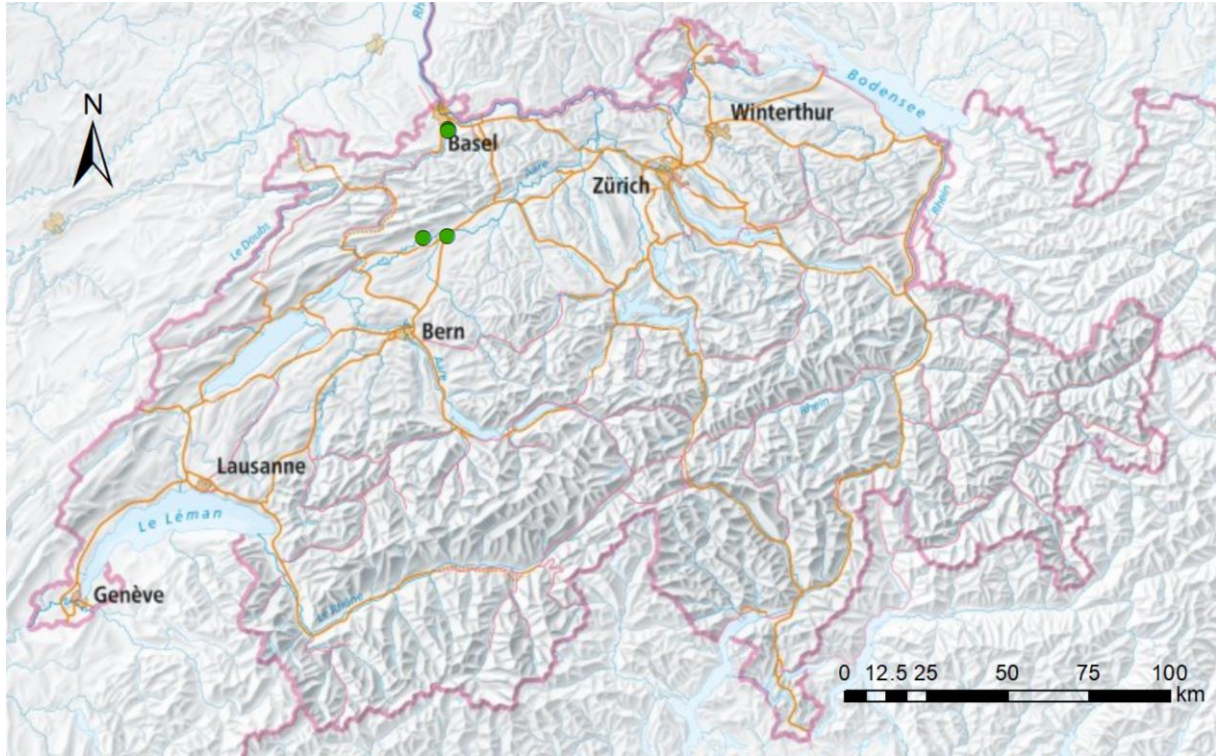


Abbildung 33: Karte der Standorte von durchgeführten Spotmessungen.

3.3 Stationäre Dauermessungen

Für die Stationären Dauermessungen läuft aktuell (Stand 18.03.2022) eine Testmessung am Standort von FaW in Zürich. Im Verlauf des zweiten Quartals 2022 werden die ersten definitiven Messorte mit den Messgeräten für die Stationären Dauermessung ausgerüstet.

3.3.1 Messorte Stationäre Dauermessungen

Die Messorte, an denen Stationäre Dauermessungen durchgeführt werden, sind in Tabelle 11 und Abbildung 34 aufgeführt.

Tabelle 11: Standorte für die Stationären Dauermessungen.

Messstandort	Standortgemeinde
Fields at Work - ETH Zentrum ET Gebäude	8032 Zürich
Swiss TPH - neues Gebäude	4123 Allschwil
G+P - Aarau	5000 Aarau
G+P - Deitingen	4543 Deitingen
G+P - Neuchâtel	2000 Neuchâtel

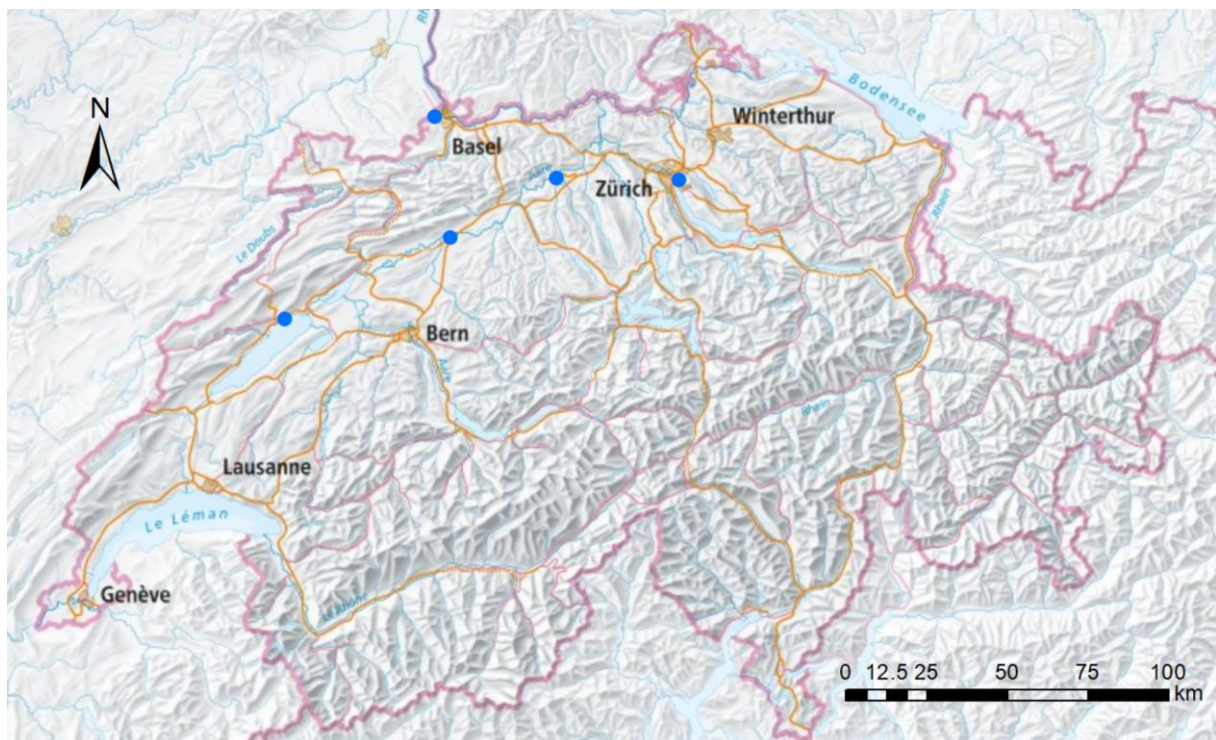


Abbildung 34: Karte der ausgewählten Standorte für die Stationären Dauermessungen (blaue Punkte).

4. Diskussion

Als primäres Ziel für das Jahr 2021 standen die Ausarbeitung des Messkonzeptes, die Etablierung der Messverfahren und der Aufbau der Messdateninfrastruktur im Vordergrund. Bis zur Erstellung dieses Berichts konnten mit allen vorgesehenen Messverfahren erfolgreich Daten erhoben werden (im Fall der Stationären Dauermessungen erst an einem Teststandort). Insgesamt konnten damit seit Beginn der Messkampagne 453'959 Messzeitpunkte aufgezeichnet werden (Stand Datenbank am 18.03.2022), was bei 35 gemessenen Frequenzbändern insgesamt gut 15 Mio. Messwerten entspricht. Aus technischer Sicht konnte damit der Nachweis erbracht werden, dass die gewählte Methodik für die Erfassung und Verarbeitung der Daten entsprechend dem Messkonzept geeignet ist. In den Folgejahren werden mit wachsender Datengrundlage laufend weitere, quantitative Analysen der Messdaten möglich.

Die im ersten Jahr der Datenerhebungen gemessenen Feldstärken erreichten in öffentlich zugänglichen Bereichen maximal rund 15% des Immissionsgrenzwerts, in den allermeisten Fällen lagen sie im tiefen einstelligen Prozentbereich. In den bisher vermessenen Privatwohnungen lag die maximale Ausschöpfung des Immissionsgrenzwerts unter 4%. Die Anzahl der in Wohnungen durchgeführten Messungen liegt bei 4 von den geplanten 100.

Die HF-EMF RMS Messwerte der Routenmessungen für Wohnquartiere und für öffentlich zugängliche Bereiche sind mit Mittelwerten von 0.1 bis 0.7 V/m (vgl. Abbildung 16) ähnlich hoch wie bei vergleichbaren Studien im Ausland (Jalilian H., 2019) (Sagar S., 2018). So lagen bei 26 Messstudien, welche zwischen 2015 und 2018 hauptsächlich in europäischen Ländern durchgeführt wurden, die mittleren Expositionen für verschiedene Mikroumgebungen draussen zwischen 0.07 und 1.27 V/m. In Innenräumen lagen die Mittelwerte zwischen 0.04 und 0.76 V/m und in öffentlichen Verkehrsmitteln zwischen 0.14 und 0.69 V/m. In Frankreich wurde in den Jahren 2014, 2017 und 2020 an über 1000 Rathausplätzen HF-EMF-Messungen mit einer Breitbandsonde sowie separat für die Downlinkbänder durchgeführt (Agence Nationale des Fréquences, 2020). Der Median der gesamten HF-EMF-Immissionen lag 2020 in urbanen Gebieten bei 0.34 V/m und in ländlichen Gebieten bei 0.15 V/m. Für Downlink lag der Median in urbanen Gebieten bei 0.30 V/m und in ländlichen Gebieten bei 0.05 V/m Die arithmetischen Mittelwerte lagen für HF-EMF in urbanen Gebieten bei 0.62 V/m (Downlink: 0.53 V/m) und in ländlichen Gebieten bei 0.54 V/m (Downlink: 0.10 V/m). Die Werte in Frankreich sind tendenziell höher als bei den Messungen aus der Schweiz. Das liegt mit grosser Wahrscheinlichkeit auch daran, dass Rathausplätze typischerweise zentral gelegen sind, während die Messungen der vorliegenden Studie ein breiteres Gebiet abdecken.

In Bezug auf die NF-EMF Messungen gibt es weniger internationale Vergleichsstudien. Die Messwerte sind jedoch vergleichbar mit personenbezogenen³ Messungen der Exposition an Personen, welche 2012/13 in der Schweiz und Italien gemacht wurden (Struchen B., 2016). Ähnliche Werte wurden in den 90er Jahren auch durch das PSI in einer umfassenden Messstudie erhoben (Buwal Bulletin 3/95).

Die gesamten gemessenen HF-EMF-Immissionen sowie die gemessenen Immissionen von Mobilfunkbasisstationen sind mit einer Messkampagne in der Schweiz aus dem Jahr 2014 (Rööfli M. F. M., 2015)

³ „Personenbezogene Messungen“ bezeichnen ein Messverfahren, bei dem eine Person Messgeräte über einen gewissen Zeitraum (typischerweise einige Tage) mit sich trägt und die Immissionen in ihrem individuellen Alltag erfasst. Im Gegensatz dazu werden bei den Routenmessungen die Messgeräte zwar auch von einer Person mitgeführt, aber die Messung erfolgt entlang einer ausgewählten Route anstatt im individuellen Alltag.

vergleichbar. Gemäss Abbildung 25 scheinen die HF-EMF-Immissionen in den meisten Mikroumgebungen leicht tiefer zu sein, was allerdings statistisch noch nicht verifiziert ist. In Stadtzentren sind die Werte gleichgeblieben. Beim Vergleich der totalen HF-EMF ist zu berücksichtigen, dass zwischen 2014 und 2021 mehrere Frequenzbänder anderen technischen Anwendungen zugewiesen bzw. neue Frequenzbänder vergeben wurden und in den beiden Messperioden deshalb unterschiedliche Frequenzbänder gemessen wurden. Beim Vergleich der Mobilfunk-Frequenzen wurden alle jeweils genutzten Frequenzbänder berücksichtigt, um eine mögliche Verschiebung der Sendeleistung auf neue Frequenzen zu erfassen.

Ein möglicher Grund für leicht tiefere bzw. gleichgebliebene Werte der mittleren Immissionen zwischen 2014 und 2021 trotz zunehmendem Mobilfunk-Datenverkehr ist die Entwicklung hin zu dynamischeren und effizienteren Sendetechnologien: während 2014 die 2G-Technologie noch weit verbreitet und 4G erst im Aufkommen war, bot Ende 2021 nur noch Sunrise 2G-Dienste an und 5G ist vielerorts verfügbar. Auch der Anteil von 3G hat sich seither auf Kosten des effizienteren 4G reduziert. Die modernen Mobilfunkstandards ermöglichen, dass Mobilfunkantennen die Sendeleistung in Abhängigkeit des Daten-/Gesprächsverkehrs reduzieren, wenn diese zur Deckung der Nachfrage nicht erforderlich ist. Damit ist es möglich, dass die zeitlich und geographisch gemittelten Immissionen abnehmen, auch wenn die übertragene Datenmenge zunimmt. Dass die Einführung von effizienteren Technologien die Zunahme der Datennutzung in Bezug auf die Exposition kompensieren, wurde bisher auch schon bei personenbezogenen Messstudien in der Schweiz festgestellt. So war die Höhe der persönlichen HF-EMF Exposition im Jahr 2015 etwas tiefer als bei einer vergleichbaren Studie im Jahr 2007/2008, obwohl das mobile Datenvolumen um den Faktor 400 zugenommen hatte (Rösli M. D. S., 2019). Die Abnahme war vor allem auf eine Reduktion der Exposition durch Emissionen von Schnurlostelefonen zurückzuführen. Jedoch wurde für die Exposition gegenüber Downlink zwischen 2007/08 und 2015 eine leichte Zunahme festgestellt. Dies deckt sich auch mit der oben erwähnten französischen Messstudie. In urbanen Gebieten lag der Median für Downlink 2014 bei 0.23 V/m, 2017 bei 0.27 V/m und 2020 bei 0.30 V/m. In ländlichen Gebieten veränderte sich der Downlink kaum (2014: 0.06 V/m, 2017: 0.05 V/m und 2020: 0.05 V/m). In Bezug auf die gesamte HF-EMF Exposition nahm der Median in städtischen Gebieten zwischen 2014 und 2020 von 0.25 V/m auf 0.34 V/m zu und in ländlichen Gebieten von 0.13 V/m auf 0.15 V/m. Da bei der Schweizer Messstudie im Jahr 2014 (Rösli M. F. M., 2015) das Messverfahren nicht komplett identisch war, kann nicht vollkommen ausgeschlossen werden, dass dies einen Einfluss auf den beobachteten zeitlichen Trend hat. Eine Interpretation dieser Unterschiede ist daher noch verfrüht und die Unterschiede sind verglichen mit der totalen Messunsicherheit klein, um eindeutige Zuordnungen für die Ursachen der Unterschiede machen zu können. Die Daten der Folgejahre werden nun besser mit den Messwerten von 2021 vergleichbar sein, weil die Messungen im gleichen Verfahren durchgeführt werden.

4.1 Repräsentativität der Daten

Ziel der Messungen ist, Daten zu erheben, welche repräsentativ für die Exposition der Bevölkerung sind. Das bedeutet, dass dort gemessen wird, wo sich Leute im Alltag auch tatsächlich aufhalten. Dabei handelt es sich um Wohngebiete, öffentliche Plätze sowie das öffentliche Verkehrssystem inklusive Haltestellen und öffentlich zugängliche Innenräume (z.B. Supermärkte, Restaurants, Museen). Die Repräsentativität der ausgewählten Gemeinden und Mikroumgebungen wurde mithilfe von Geoinformationssystemen quantitativ analysiert, indem charakteristische Grössen für die Gemeinden bzw. Mikroumgebungen und für die gesamte Schweiz berechnet und miteinander verglichen wurden. Beispielsweise

lässt sich vergleichen, wie gross der Anteil der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung innerhalb aller Mikroumgebungen sowie innerhalb der gesamten Schweiz ist. Solche Analysen werden auch in Zukunft periodisch im Rahmen der Planung der Mikroumgebungen durchgeführt und ermöglichen eine laufende Kontrolle über die Repräsentativität der gewählten Mikroumgebungen sowie Korrekturen an vorgesehenen Mikroumgebungen, um die Repräsentativität der Gesamtmenge der Mikroumgebungen sicherzustellen. Auf Messungen an Arbeitsplätzen wird bewusst verzichtet, weil an diesen eine hohe Streuung erwartet wird, sodass eine repräsentative Datenerhebung sehr schwierig bzw. nur mit sehr umfangreichen Stichproben zu erreichen wäre.

Die Durchführung von Routenmessungen während 15 min in den Mikroumgebungen hat die Einschränkung, dass systematische Schwankungen der Immissionen im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf nicht innerhalb einer Mikroumgebung erfasst werden können. Diese Schwankungen sind aber im Allgemeinen systematisch und werden im Rahmen dieses Projekts zukünftig mit den stationären Dauermessungen erfasst. Typischerweise sind die Immissionen am Tag höher als in der Nacht, jedoch mit relativ geringen Unterschieden in den Stundenwerten zwischen 8:00 und 20:00. Die Konzeptstudie hat gezeigt, dass Routenmessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten keine systematischen Verzerrungen ergeben (Röösli M. F. M., 2015).

Bei Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln ist der Zeitpunkt jedoch sehr einflussreich. Während den Hauptverkehrszeiten sind die HF-EMF-Immissionen deutlich höher als zu Zeiten, wenn die Verkehrsmittel nur schwach besetzt sind, denn zu diesen tragen die Uplink-Immissionen der mobilen Geräte von Mitreisenden relativ viel bei (vgl. Abbildung 20). Im Vergleich zu früheren Studien sind die gemessenen Immissionen in den öffentlichen Verkehrsmitteln in der vorliegenden Studie eher tiefer. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei der Anreise zu den Messgebieten und bei der Verschiebung zwischen den Gebieten häufig öffentliche Verkehrsmittel ausserhalb der Spitzenzeiten benutzt wurden.

Bei personenbezogenen Messstudien zur Exposition an Personen scheint der Anteil an Reisen während der Hauptverkehrszeiten eher höher zu sein (Birks L.E., 2018). Bei Messungen in Innenräumen wurde nach Möglichkeit das übliche Verhaltensmuster der Bevölkerung berücksichtigt. So wurden Messungen in Restaurants während der „Mittagspitze“ (Mobilfunk, Stromversorgung) durchgeführt und können deshalb als repräsentativ angenommen werden. Nicht repräsentativ ist allerdings die bevorzugte Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln und damit der Aufenthalt in öffentlichen Bereichen in Bahnhofsnähe. In diesen Messumgebungen dürfte der Anteil des Eisenbahnstrom-Magnetfelds überproportional stark sein. Für die allgemeinen Messstrecken innerhalb der Mikroumgebungen trifft diese Einschränkung aber nicht zu.

Für die Auswahl der Spotmessungen wurde ein anderer Ansatz gewählt, um Repräsentativität zu erhalten, als bei den Routenmessungen. Wie im Methodenteil erläutert, hätte eine Zufallsauswahl den Nachteil, dass Situationen mit hoher Exposition, welche selten sind, bei der relativ geringen Anzahl von ausgewählten Wohnhäusern verpasst würden. Damit könnten keine Aussagen über typische Situationen gemacht werden, wenn jemand in der Nähe von einer externen Quelle wohnt. Es wurden darum gezielt nach Wohnungen gesucht, die von einer sogenannt primären NIS-Quelle besonders betroffen sind. Die Auswahl dieser primären NIS-Quellen für die Standortsuche erfolgte mittels Geoinformationssystemen, die Auswahl der Wohnungen in deren Umgebung wurde mithilfe von Luftbildern und öffentlich zugänglichen Fotoaufnahmen (Google StreetView) gemacht. Dabei werden Gebäude mit gut erkennbarer Nutzung (Wohngebäude oder Gewerbe) und eindeutigen Gebäudegrenzen bevorzugt. Damit repräsentiert eine Wohnung in Bezug auf die primäre Quelle eine typische Hochbelastungssituation. Für weitere, se-

kundäre NIS-Quellen kann die Auswahl als näherungsweise zufällig angenommen und damit als repräsentativ betrachtet werden. Für interne Quellen und das Wohnerverhalten ist die Auswahl zwar gänzlich zufällig, aber die individuelle Streuung kann sehr gross sein, sodass bei einer Stichprobengrösse von 100 Wohnungen die Unsicherheit relativ gross ist und seltene Innenraumquellen auch verpasst werden können. Diesbezüglich wird interessant sein, ob sich nach Erhebung aller Daten in der Verteilung der Immissionen aus internen Quellen über alle Wohnungen eine klare Struktur erkennen lässt. Im Moment ist die Anzahl der durchgeführten Spotmessungen noch zu klein für separate Auswertungen. In Zukunft ist aber geplant, jeweils eine Auswertung für Hochbelastungssituationen und für repräsentative Situationen zu machen.

Die Standorte der stationären Dauermessungen sind nicht repräsentativ für die Gesamtfläche der Schweiz. Zweck der Messungen ist aber nicht die räumliche Verteilung, sondern die Erfassung der zeitlichen Entwicklung der NIS-Immissionen an einzelnen Standorten. Es wird angenommen, dass die Messungen dafür repräsentativ sind, weil einerseits keine Vergleichsdaten zur Validierung verfügbar sind und weil andererseits die Standorte diesbezüglich rein zufällig ausgewählt sind (es liegen keine Informationen über beispielsweise Neu- oder Umbauprojekte von Mobilfunkantennen oder Stromleitungen in der Nähe der Messstandorte vor). Wenn eine Repräsentativität für die Gesamtfläche der Schweiz angestrebt werden soll, müsste die Anzahl der Standorte auf der Ebene der Kantone erhöht werden.

Zusammenfassend zeigen die ersten Ergebnisse, dass das gewählte Messkonzept dienlich ist, die typische NIS-Situation in der Umwelt zu charakterisieren. Die gemessenen Werte lagen deutlich unter den Immissionsgrenzwerten, welche in Bezug auf die gesundheitlichen Wirkungen massgebend sind. Insgesamt wird das Verständnis zur NIS Exposition im Alltag mit diesen und den zukünftig zu erwarteten Resultaten deutlich verbessert.

5. Literaturverzeichnis

- Agence Nationale des Fréquences. (2020). *Etude de l'exposition*. France:
<https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/20210716-campagne-mairies-2020.pdf>.
- Birks L.E., S. B.-B.-Z. (2018). Spatial and temporal variability of personal environmental exposure to radio frequency electromagnetic fields in children in Europe. *Environment International*, S. 117: 204–214.
- Bundesamt für Statistik. (2012). *Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie*.
- Eeftens M., D. S. (2020). A real-world quality assessment study in six ExpoM-RF measurement devices. *Environmental Research*, S. 182:109049.
- Eeftens M., S. B. (2018). Dealing with crosstalk in electromagnetic field measurements of portable devices. *Bioelectromagnetics*, S. 39(7): 529-538.
- Jalilian H., E. M. (2019). Public exposure to radiofrequency electromagnetic fields in everyday microenvironments: An updated systematic review for Europe. *Environmental Research*, S. 176:108517.
- JCGM, J. C. (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. JCGM.
- Röösli M., D. S. (2019). Mobilkommunikation und Gesundheit: Wie stark werden wir bestrahlt? *Hausarzt Praxis*, S. 14 (2): 41-44.
- Röösli M., F. M. (2015). *Stichprobenkonzept für Messungen der nichtionisierenden Strahlung mit Exposimetern*. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/externestudien-berichte/stichprobenkonzeptfuermessungendernichtionisierendenstrahlungmit.pdf>.
- Sagar S., A. S. (2018). Comparison of radiofrequency electromagnetic field exposure levels in different everyday microenvironments in an international context. *Environment International*, S. 114: 297-306.
- Struchen B., L. I. (2016). Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, S. 26(6):586-596.

6. Datenquellen

Tabelle 12: Für die Planung der Messstrecken und Messstandorte verwendete Datensätze mit deren Bezugsquellen und Lizenz.

Informationen	Quelle	Lizenz
Standorte Mobilfunkantennen	geo.admin.ch	Öffentlich
Standorte Rundfunksender	geo.admin.ch	Öffentlich
Koordinaten Hochspannungsleitungen	<ul style="list-style-type: none"> - Swissgrid AG - Axpo Grid AG - Primeo Energie - Groupe E SA - openinframap.org 	Mit Datennutzungsvereinbarung oder öffentlich
Koordinaten Eisenbahnlinien	geo.admin.ch (SwissTLM3D)	Öffentlich
Gemeindetypologie BFS	BFS-Atlas	Öffentlich
Gemeindetypologie ARE	geo.admin.ch	Öffentlich
Bauzonen	geo.admin.ch	Öffentlich
Landschaftstypologie	geo.admin.ch	Öffentlich
Gemeindegrenzen	geo.admin.ch	Öffentlich
CORINE Land Cover	wsl.ch	Öffentlich
Gebäude- und Wohnungsregister (GWS) (enthält Informationen zur Bevölkerung)	BFS	Datennutzungsvertrag
Gebäude- und Wohnungsstatistiken (GWS)	BFS	Datennutzungsvertrag

Anhang

I Glossar

Tabelle 13: Glossar

Bezeichnung	Beschreibung
AC	Alternating Current: Wechselstrom
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
DAB	Digital Audio Broadcasting: digitaler Übertragungsstandard für Hörfunk.
DC	Direct Current: Gleichstrom
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications: Standard für Funkkommunikation, hauptsächlich für Schnurlostelefone eingesetzt.
DL	Downlink: Datenfluss von der Mobilfunkantenne zum Mobiltelefon
ELF	Extremely low Frequency: Frequenzbereich von 3-30 Hz (gem. Definition der Internationalen Fernmeldeunion). Im vorliegenden Bericht wird der Begriff stellvertretend für alle Frequenzen unterhalb von 100 kHz verwendet.
EMF	Electromagnetic Field: Sammelbegriff für elektromagnetische Felder und Wechselwirkungen davon.
FFT	Fast Fourier transform: Sammelbegriff für mathematische Verfahren zur Signalkonversion zwischen Zeit- und Frequenzraum.
FM	Frequenzmodulation: Verfahren zum Aufbringen eines Nutzsymbols auf ein Trägersignal mittels Veränderungen der Frequenz des Trägersignals.
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System: Satellitenbasierter Standortbestimmungsdienst
HF	Hochfrequenz, im vorliegenden Bericht als Synonym zu RF verwendet.
IGW	Immissionsgrenzwert
ISM	Industrial, Scientific and Medical band: Lizenzfreie Frequenzbereiche, welche für eine Vielzahl technischer Geräte genutzt werden (z.B. Bluetooth, WiFi, Mikrowellenofen).
ME	Micro Environment / Mikroumgebung
MySQL	Datenbankverwaltungssystem von Oracle
NF	Niederfrequenz, im vorliegenden Bericht als Synonym zu ELF verwendet.
NIS	Nichtionisierende Strahlung
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PAM/PAMR	Professional mobile radio: Funkkommunikationssysteme
Peak	Spitzenwert (Maximum)
Polycom	Schweizer Funknetzwerk auf Basis von Tetrapol, offizielles nationales Funksystem der Behörden für Polizei, Rettungsdienste usw.
R	Freie Programmiersprache für Statistikanwendungen
RF	Radio frequency: nicht eindeutig definierter Frequenzbereich (hauptsächlich) im MHz- und GHz-Bereich, der für die meisten Kommunikationstechnologien genutzt wird.
RMS	root mean square: mathematischer Effektivwert für die Feldstärke von Wechselfeldern.
TDD	Time-division duplexing: Übertragungsverfahren, bei dem der Datenfluss zwischen zwei Geräten (z.B. Mobiltelefon und Mobilfunkantenne) in beide Richtungen (Up- und Downlink) zeitversetzt mit der gleichen Frequenz erfolgt.
Tetrapol	Digitales Funksystem, welches für das Anwendungsgebiet öffentliche Sicherheit entwickelt wurde.

Bezeichnung	Beschreibung
TV	Television: Fernsehdienste
UL	Uplink: Datenfluss vom Mobiltelefon zur Mobilfunkantenne
WiFi	Firmenkonsortium für die Zertifizierung von WLAN-Geräten, im allgemeinen Sprachgebrauch als Synonym für WLAN verwendet.
WLAN	Wireless Local Area Network: lokale drahtlose Netzwerke

II Liste der Standortgemeinden von Mikroumgebungen

Mikroumgebungen

Tabelle 14: Liste der Standortgemeinden mit der gesamten Anzahl Mikroumgebungen pro Gemeinde und aufgeteilt nach Typ von Mikroumgebung im Freien.

Gemeinde	Naturgebiet	Landwirtschaftliches Gebiet	Sport-/Freizeitgebiet	Industriegebiet	Wohngebiet	Stadtzentrum	Dezentrales Wohngebiet	Zentrales Wohngebiet	Grossstadtzentrum	Total
Aarau	1			1			1	1	1	5
Basel										0
Bioggio					1	1				2
Brienz					1	1				2
Duebendorf			1	1	2	1				5
Duggingen										0
Frick				1	1	1				3
Graenichen					2	1				3
Grellingen					1	1				2
Gstaad					1	1				2
Laufenburg	1				1	1				3
Lausanne	1						2	1	1	5
Lugano							1	1	1	3
Lungern		1			1	1				3
Montreux										0
Muenchenstein	1		1	1	2	1				6
Nesslau		1			1	1				3
Neuchatel							2	1	1	4
Reinach					1	1				2
Ruemlang				1	1	1				3
Seewen		1			1	1				3
Spiez										0
Saint-Blaise					1	1				2
Wattwil				1	1	1				3
Yverdon										0
Zuerich			1	2			2	2	1	8
Zweisimmen	1				1	1				3
Total	5	3	3	8	20	17	8	6	5	75

Messumgebungen in Innenräumen / öffentlichen Bereichen

Tabelle 15: Liste der Standortgemeinden mit der gesamten Anzahl Mikroumgebungen pro Gemeinde und aufgeteilt nach Typ von Mikroumgebung in Innenräumen bzw. öffentlichen Bereichen.

Gemeinde	Bibliothek	ETH/UNI/FH	Museum	Restaurants	Supermarkt	Flughafen	Bushaltestelle	Tramhaltestelle	Bahnhöfe	Total
Aarau									2	2
Basel									1	1
Bioggio									1	1
Brienz				1	1					2
Duebendorf				1	1					2
Duggingen				1						1
Frick							1			1
Graenichen										0
Grellingen				1					1	2
Gstaad									1	1
Laufenburg				1						1
Lausanne			1	1			1		1	4
Lugano				1	1		1		1	4
Lungern										0
Montreux				1					1	2
Muenchenstein				1	1					2
Nesslau									1	1
Neuchatel	1	1					2	1	0	5
Reinach				1						1
Ruemlang										0
Seewen										0
Spiez									2	2
Saint-Blaise										0
Wattwil					1		1			2
Yverdon									1	1
Zuerich		2		2		1		4	4	13
Zweisimmen				1					1	2
Total	1	3	1	13	5	1	7	5	17	53

III Kenngrössen HF-RMS-Messdaten

Die Quantile sind ohne Aggregation pro Messumgebung angegeben. Die Mittelwerte für jeden Messumgebungstyp sind pro Messumgebung gemittelt.

Tabelle 16: Statistische Kenngrössen (in V/m) der gesamten HF-EMF-Exposition (RMS).

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.041	0.11	0.199	0.321	0.536	62	0.305
Tram	501	0.077	0.129	0.184	0.264	0.479	5	0.337
Bus	1098	0.043	0.084	0.144	0.234	0.466	11	0.252
Metro	105	0.089	0.144	0.189	0.253	0.463	1	0.253
Seilbahn	439	0.029	0.056	0.082	0.156	0.243	2	0.138
Grosstadtzentrum	977	0.047	0.103	0.19	0.338	0.7	5	0.377
Zentrales Wohngebiet	1015	0.055	0.116	0.18	0.289	0.483	6	0.281
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.055	0.097	0.135	0.222	0.464	8	0.237
Stadtzentrum	2797	0.031	0.062	0.108	0.187	0.424	17	0.204
Wohngebiet	3413	0.034	0.055	0.091	0.176	0.405	20	0.191
Industriegebiet	1366	0.09	0.198	0.301	0.449	0.716	8	0.403
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.091	0.162	0.246	0.347	0.527	3	0.303
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.026	0.048	0.066	0.097	0.264	3	0.169
Naturgebiet	940	0.027	0.035	0.052	0.087	0.15	5	0.083
Bahnhof	1582	0.058	0.146	0.252	0.352	0.599	17	0.326
Tramhaltestelle	284	0.132	0.214	0.388	0.546	1.492	5	0.661
Bushaltestelle	544	0.124	0.214	0.329	0.451	0.623	7	0.361
Flughafen	174	0.151	0.235	0.306	0.463	0.701	1	0.4
Supermarkt	670	0.031	0.057	0.093	0.169	0.452	5	0.233
Restaurants	4409	0.024	0.046	0.104	0.167	0.348	13	0.181
Museum	529	0.046	0.114	0.188	0.312	0.711	1	0.346
ETH/UNI/FH	403	0.031	0.056	0.086	0.111	0.231	3	0.142
Bibliotheken	151	0.124	0.162	0.195	0.322	0.561	1	0.294

Tabelle 17: Statistische Kenngrößen (in V/m) der HF-EMF-Exposition (RMS) durch Rundfunk:
 Bänder 01-0098M-fm, 02-0202M-dab, 03-0385M-poly, 04-0423M-ism, 05-0453M-pmr, 06-0508M-tv,
 07-0584M-tv, 08-0660M-tv.

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.008	0.01	0.014	0.026	0.075	62	0.042
Tram	501	0.028	0.049	0.069	0.11	0.196	5	0.097
Bus	1098	0.013	0.035	0.05	0.084	0.184	11	0.115
Metro	105	0.008	0.009	0.01	0.014	0.024	1	0.014
Seilbahn	439	0.019	0.037	0.045	0.064	0.115	2	0.06
Grossstadtzentrum	977	0.014	0.03	0.043	0.07	0.154	5	0.104
Zentrales Wohngebiet	1015	0.016	0.042	0.063	0.11	0.209	6	0.101
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.018	0.038	0.052	0.075	0.139	8	0.074
Stadtzentrum	2797	0.011	0.017	0.037	0.069	0.218	17	0.104
Wohngebiet	3413	0.015	0.024	0.039	0.079	0.289	20	0.131
Industriegebiet	1366	0.018	0.037	0.08	0.141	0.35	8	0.157
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.037	0.065	0.119	0.197	0.373	3	0.173
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.01	0.015	0.03	0.05	0.087	3	0.051
Naturgebiet	940	0.015	0.021	0.03	0.064	0.121	5	0.062
Bahnhof	1582	0.012	0.024	0.031	0.078	0.206	17	0.104
Tramhaltestelle	284	0.037	0.051	0.055	0.074	0.127	5	0.073
Bushaltestelle	544	0.02	0.042	0.051	0.128	0.227	7	0.137
Flughafen	174	0.013	0.017	0.023	0.027	0.034	1	0.024
Supermarkt	670	0.008	0.009	0.013	0.018	0.067	5	0.042
Restaurants	4409	0.009	0.012	0.023	0.039	0.112	13	0.054
Museum	529	0.007	0.009	0.009	0.012	0.016	1	0.011
ETH/UNI/FH	403	0.012	0.015	0.024	0.042	0.109	3	0.099
Bibliotheken	151	0.042	0.042	0.043	0.045	0.071	1	0.055

Tabelle 18: Statistische Kenngrößen (in V/m) der HF-EMF-Exposition (RMS) durch Mobilfunkantennen (Downlink):
 Bänder 11-0771M-dl, 12-0809M-dl, 15-0943M-dl, 16-1480M-sdl, 18-1843M-dl, 21-2145M-dl, 25-2657M-dl.

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.007	0.028	0.088	0.186	0.442	62	0.185
Tram	501	0.023	0.07	0.124	0.206	0.429	5	0.308
Bus	1098	0.007	0.022	0.071	0.181	0.429	11	0.206
Metro	105	0.023	0.04	0.065	0.138	0.343	1	0.157
Seilbahn	439	0.018	0.04	0.058	0.137	0.215	2	0.121
Grossstadtzentrum	977	0.02	0.063	0.158	0.293	0.663	5	0.343
Zentrales Wohngebiet	1015	0.029	0.089	0.145	0.261	0.463	6	0.257
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.018	0.052	0.097	0.203	0.462	8	0.22
Stadtzentrum	2797	0.02	0.04	0.073	0.141	0.365	17	0.173
Wohngebiet	3413	0.017	0.032	0.057	0.109	0.285	20	0.137
Industriegebiet	1366	0.053	0.155	0.245	0.394	0.695	8	0.366
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.032	0.061	0.135	0.265	0.515	3	0.246
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.007	0.025	0.046	0.08	0.262	3	0.16
Naturgebiet	940	0.007	0.013	0.023	0.052	0.106	5	0.053
Bahnhof	1582	0.051	0.122	0.209	0.296	0.559	17	0.296
Tramhaltestelle	284	0.106	0.181	0.36	0.538	1.489	5	0.651
Bushaltestelle	544	0.063	0.166	0.282	0.419	0.589	7	0.323
Flughafen	174	0.108	0.222	0.293	0.432	0.682	1	0.382
Supermarkt	670	0.006	0.009	0.029	0.091	0.396	5	0.201
Restaurants	4409	0.005	0.008	0.036	0.127	0.334	13	0.15
Museum	529	0.036	0.1	0.181	0.308	0.71	1	0.342
ETH/UNI/FH	403	0.008	0.017	0.037	0.068	0.144	3	0.072
Bibliotheken	151	0.082	0.135	0.167	0.284	0.546	1	0.27

Tabelle 19: Statistische Kenngrössen (in V/m) der HF-EMF-Exposition (RMS) durch Mobiltelefone (Uplink):
 Bänder 09-0718M-ul, 13-0847M-ul, 14-0898M-ul, 17-1748M-ul, 20-1957M-ul, 23-2535M-ul.

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.005	0.019	0.05	0.127	0.373	62	0.204
Tram	501	0.005	0.008	0.018	0.04	0.117	5	0.057
Bus	1098	0.005	0.007	0.019	0.042	0.129	11	0.061
Metro	105	0.021	0.058	0.101	0.168	0.322	1	0.165
Seilbahn	439	0.005	0.005	0.005	0.006	0.01	2	0.006
Grossstadtzentrum	977	0.005	0.006	0.009	0.016	0.065	5	0.069
Zentrales Wohngebiet	1015	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015	6	0.01
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.005	0.005	0.005	0.01	0.016	8	0.01
Stadtzentrum	2797	0.005	0.005	0.005	0.006	0.012	17	0.008
Wohngebiet	3413	0.005	0.005	0.005	0.005	0.011	20	0.009
Industriegebiet	1366	0.005	0.005	0.006	0.011	0.025	8	0.015
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.005	0.005	0.005	0.006	0.039	3	0.016
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	3	0.006
Naturgebiet	940	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006	5	0.006
Bahnhof	1582	0.005	0.01	0.021	0.041	0.114	17	0.049
Tramhaltestelle	284	0.006	0.008	0.01	0.013	0.038	5	0.031
Bushaltestelle	544	0.007	0.012	0.017	0.027	0.069	7	0.039
Flughafen	174	0.011	0.015	0.019	0.027	0.042	1	0.026
Supermarkt	670	0.005	0.006	0.012	0.026	0.1	5	0.049
Restaurants	4409	0.005	0.005	0.009	0.015	0.04	13	0.022
Museum	529	0.005	0.005	0.008	0.018	0.067	1	0.036
ETH/UNI/FH	403	0.006	0.01	0.016	0.028	0.066	3	0.035
Bibliotheken	151	0.01	0.01	0.011	0.012	0.024	1	0.021

Tabelle 20: Statistische Kenngrößen (in V/m) der HF-EMF-Exposition (RMS) durch TDD-Mobilfunkdienste:
 Bänder 10-0748M-td, 24-2593M-td, 26-3475M-nr, 27-3605M-nr, 28-3735M-nr.

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.004	0.004	0.005	0.008	0.058	62	0.066
Tram	501	0.004	0.007	0.014	0.031	0.075	5	0.041
Bus	1098	0.004	0.004	0.005	0.012	0.036	11	0.019
Metro	105	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	1	0.004
Seilbahn	439	0.004	0.005	0.006	0.008	0.023	2	0.011
Grossstadtzentrum	977	0.004	0.004	0.012	0.029	0.102	5	0.081
Zentrales Wohngebiet	1015	0.004	0.005	0.011	0.032	0.071	6	0.036
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.004	0.004	0.006	0.028	0.049	8	0.034
Stadtzentrum	2797	0.004	0.004	0.006	0.013	0.043	17	0.025
Wohngebiet	3413	0.004	0.004	0.005	0.009	0.029	20	0.017
Industriegebiet	1366	0.005	0.01	0.023	0.042	0.124	8	0.056
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.005	0.007	0.01	0.017	0.037	3	0.02
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.004	0.004	0.004	0.005	0.008	3	0.005
Naturgebiet	940	0.004	0.004	0.004	0.005	0.008	5	0.006
Bahnhof	1582	0.005	0.008	0.018	0.049	0.137	17	0.062
Tramhaltestelle	284	0.02	0.031	0.042	0.08	0.134	5	0.073
Bushaltestelle	544	0.004	0.019	0.028	0.048	0.116	7	0.056
Flughafen	174	0.017	0.034	0.044	0.065	0.099	1	0.058
Supermarkt	670	0.004	0.004	0.004	0.005	0.01	5	0.006
Restaurants	4409	0.004	0.004	0.004	0.008	0.023	13	0.012
Museum	529	0.004	0.004	0.005	0.005	0.007	1	0.005
ETH/UNI/FH	403	0.004	0.004	0.009	0.027	0.031	3	0.021
Bibliotheken	151	0.027	0.028	0.029	0.03	0.041	1	0.031

Tabelle 21: Statistische Kenngrößen (in V/m) der HF-EMF-Exposition (RMS) durch WLAN:
 Bänder 22-2438M-wifi, 29-5200M-wifi, 30-5325M-wifi, 31-5450M-wifi, 32-5575M-wifi, 33-5700M-wifi,
 34-5825M-wifi, 35-5950M-wifi.

Mikroumgebungen	Anzahl Messwerte	05. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	Anz. ME	Mittelwert
Zug	17994	0.007	0.023	0.054	0.109	0.214	62	0.105
Tram	501	0.008	0.015	0.029	0.058	0.135	5	0.067
Bus	1098	0.006	0.008	0.015	0.04	0.09	11	0.061
Metro	105	0.031	0.064	0.082	0.117	0.188	1	0.11
Seilbahn	439	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	2	0.026
Grossstadtzentrum	977	0.007	0.011	0.018	0.038	0.072	5	0.04
Zentrales Wohngebiet	1015	0.007	0.01	0.014	0.026	0.066	6	0.033
Dezentrales Wohngebiet	1504	0.006	0.007	0.009	0.06	0.07	8	0.034
Stadtzentrum	2797	0.005	0.006	0.008	0.011	0.057	17	0.018
Wohngebiet	3413	0.006	0.006	0.007	0.009	0.054	20	0.016
Industriegebiet	1366	0.006	0.006	0.007	0.01	0.02	8	0.013
Sport-/Freizeitgebiet	554	0.006	0.006	0.006	0.007	0.008	3	0.007
Landwirtschaftl. Gebiet	633	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	3	0.006
Naturgebiet	940	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	5	0.007
Bahnhof	1582	0.007	0.012	0.023	0.039	0.081	17	0.04
Tramhaltestelle	284	0.012	0.016	0.023	0.053	0.061	5	0.045
Bushaltestelle	544	0.008	0.015	0.028	0.067	0.097	7	0.055
Flughafen	174	0.04	0.048	0.054	0.071	0.128	1	0.097
Supermarkt	670	0.015	0.022	0.03	0.047	0.127	5	0.066
Restaurants	4409	0.008	0.014	0.024	0.043	0.101	13	0.074
Museum	529	0.016	0.024	0.031	0.041	0.067	1	0.039
ETH/UNI/FH	403	0.012	0.02	0.037	0.061	0.085	3	0.06
Bibliotheken	151	0.06	0.061	0.066	0.078	0.207	1	0.096

IV Vergleich der HF-EMF Frequenzbänder von 2014 und 2021

Tabelle 22: Vergleich der Frequenzbänder, in denen im vorliegenden Bericht (2021) und bei einer ähnlichen Messkampagne im Jahr 2014 (Rössli M. F. M., 2015) gemessen wurde. Im Bericht verglichen wurden die Gesamtbelastung mit allen Bändern, die 2014 und 2021 festgelegt wurden, sowie die Belastung durch "Mobilfunk". Die in den beiden Messkampagnen als Mobilfunk klassifizierten Bänder sind in der Tabelle grau hinterlegt.

Bandnr. (2021)	Beschreibung (2021)	Mittenfrequenz 2021 (MHz)	Bandbreite 2021 (MHz)	Mittenfrequenz 2014 (MHz)	Bandbreite 2014 (MHz)
1	FM Radio	97.75	35	97.75	20.5
2	DAB/DAB+	202	75	-	-
3	Polycom / TETRAPOL	385	35	-	-
4	TETRAPOL, amateur, ISM 433	422.5	35	-	-
5	PMR/PAMR (Betriebsfunk)	452.5	35	-	-
6	Broadcasting CH (1)	507.5	75	630	320
7	Broadcasting CH (2)	583.5	75		
8	Broadcasting CH (3)	659.5	75		
9	Mobile 700 UL (CH)	718	35		
10	Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35		
11	Mobile 700 DL (CH)	770.5	35		
12	Mobile 800 downlink	808.5	35	806	30
13	Mobile 800 uplink	847	35	847	30
14	Mobile 900 uplink	897.5	35	897.5	35
15	Mobile 900 downlink	942.5	35	942.5	35
16	Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	-	-
17	Mobile 1800 uplink	1747.5	75	1747.5	75
18	Mobile 1800 downlink	1842.5	75	1842.5	75
19	DECT	1897.5	35	1890	20
20	Mobile 2100 uplink	1957	75	1950	60
21	Mobile 2100 downlink	2145	75	2140	60
22	ISM 2.4 GHz	2438	100	2442.5	85
23	Mobile 2600 uplink	2535	75	2535	70
24	Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	-	-
25	Mobile 2600 downlink	2657	75	2655	70
26	Mobile 3500 (1)	3475	100	-	-
27	Mobile 3500 (2)	3605	100		
28	Mobile 3500 (3)	3735	100		
29	WiFi 5 GHz (1)	5200	100	5512.5	725
30	WiFi 5 GHz (2)	5325	100		
31	WiFi 5 GHz (3)	5450	100		
32	WiFi 5 GHz (4)	5575	100		
33	WiFi 5 GHz (5)	5700	100		
34	WiFi / SRD 5.8 GHz (1)	5825	100		
35	WiFi / SRD 5.8 GHz (2)	5950	100	-	-

V Liste der ausgewählten Gemeinden für Messungen

Tabelle 23: Liste der 70 ausgewählten Gemeinden für die Routen- und Spotmessungen (Stand 22.04.2022)

	Gemeinde	Kanton	Gemeindetypologie gemäss BFS
1	Basel	BS	Kernstadt einer grossen Agglomeration (111)
2	Bern	BE	
3	Geneve	GE	
4	Lausanne	VD	
5	Zuerich	ZH	
6	Allschwil	BL	Städtische Arbeitsplatzgemeinde einer grossen Agglomeration (112)
7	Duebendorf	ZH	
8	Freienbach	SZ	
9	Liestal	BL	
10	Muenchenstein	BL	Städtische Wohngemeinde einer grossen Agglomeration (113)
11	Bettingen	BS	
12	Kehrsatz	BE	
13	Lausen	BL	
14	Pully	VD	
15	Zufikon	ZH	Kernstadt einer mittelgrossen Agglomeration (121)
16	Aarau	AG	
17	Bienne	BE	
18	Fribourg	FR	
19	Lugano	TI	
20	Luzern	LU	
21	Neuchatel	NE	
22	Solothurn	SO	
23	St. Gallen	SG	
24	Winthertur	ZH	Städtische Arbeitsplatzgemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (122)
25	Bioggio	TI	
26	Herisau	AR	
27	Neuhausen am Rheinflall	SH	Städtische Wohngemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (123)
28	Evilard	BE	
29	Graenichen	AG	
30	Ipsach	BE	
31	Nidau	BE	
32	Saint-Blaise	NE	Städtische Tourismusgemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (134)
33	Zermatt	VS	
34	Appenzell	AR	Städtische Industriegemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (136)
35	Glarus	GL	
36	Reinach	AG	
37	Rossemaison	JU	
38	Visp	VS	

	Gemeinde	Kanton	Gemeindetypologie gemäss BFS
39	Wattwil	SG	
40	Cheseaux-Noreaz	VD	Städtische Dienstleistungsgemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (137)
41	Delemont	JU	
42	Schwyz	SZ	
43	Yverdon	VD	
44	Ruemlang	ZH	Periurbane Industriegemeinde hoher Dichte (216)
45	Belp	BE	Periurbane Dienstleistungsgemeinde hoher Dichte (217)
46	Hergiswil	NW	
47	Deitingen	SO	Periurbane Industriegemeinde mittlerer Dichte (226)
48	Erstfeld	UR	
49	Grellingen	BL	
50	Selzach	SO	
51	Grolley	FR	Periurbane Dienstleistungsgemeinde mittlerer Dichte (227)
52	Walchwil	ZG	
53	Chatillon	JU	Periurbane Agrargemeinde geringer Dichte (235)
54	Tecknau	BL	Periurbane Industriegemeinde geringer Dichte (236)
55	Seewen	BE	Periurbane Dienstleistungsgemeinde geringer Dichte (237)
56	Unterbaech	VS	
57	Brienz	BE	Tourismusgemeinde eines ländlichen Zentrums (314)
58	Gstaad (Saanen)	BE	
59	Frick	AG	Industriegemeinde eines ländlichen Zentrums (316)
60	Langnau in Emmental	BE	Dienstleistungsgemeinde eines ländlichen Zentrums (317)
61	Bowil	BE	Ländliche zentral gelegene Agrargemeinde (325)
62	Gonten	AI	
63	Diessenhofen	TG	Ländliche zentral gelegene Industriegemeinde (326)
64	Laufenburg	AG	
65	Ruete	AI	
66	Nesslau	SG	Ländliche zentral gelegene Dienstleistungsgemeinde (327)
67	Disentis	GR	Ländliche periphere Tourismusgemeinde (334)
68	Escholzmatt-Marbach	LU	Ländliche periphere Agrargemeinde (335)
69	Lungern	OW	Ländliche periphere Mischgemeinde (338)
70	Zweisimmen	BE	

VI Liste der Standorte von Spotmessungen

Tabelle 24: Liste der Spotmessungen mit Standortgemeinde und Mikroumgebungs-ID sowie der Gebäudekategorie (GKAT) aus dem GWS-Gebäuderegister.

Spot-ID	Gemeinde	Primäre Quelle	Haustyp	GKAT
spot_002	Muenchenstein	Höchstspannungsleitungen 220 /380kV (Freileitung)	EFH	1021
spot_003	Muenchenstein	Tramlinien	MFH	1030
spot_019	Solothurn	Eisenbahnliesen einspurig	EFH	1021
spot_021	Deitingen	Eisenbahnliesen doppelstpurig	Bauernhaus	1025

VII Crosstalk-Korrektur

Tabelle 25: Verringerung der gesamten HF-EMF-Exposition nach Crosstalk-Korrektur. Die unkorrigierten und korrigierten Mittelwerte, der Prozentsatz der Reduktion und die absoluten Differenzen zwischen den unkorrigierten und korrigierten Mittelwerten nach Messumgebungstyp für RMS- und Peak-Werte.

Messumgebungstyp	RMS						Peak					
	Anzahl Messwert	Anzahl Messungen	Unkorrigierter Mittelwert [V/m]	Korrigierter Mittelwert [V/m]	Mittlere Reduktion [%]	Mittlere Reduktion [V/m]	Anzahl Messwerte	Anzahl Messungen	Unkorrigierter Mittelwert [V/m]	Korrigierter Mittelwert [V/m]	Mittlere Reduktion [%]	Mittlere Reduktion [V/m]
Zug	17994	62	0.308	0.305	1.0	0.003	17832	61	2.104	2.091	0.6	0.013
Tram	500	5	0.339	0.337	0.6	0.002	501	5	2.01	2.002	0.4	0.008
Bus	1046	10	0.236	0.233	1.3	0.003	1013	10	1.418	1.401	1.2	0.017
Metro	105	1	0.255	0.253	0.8	0.002	105	1	1.665	1.659	0.4	0.006
Seilbahn	439	2	0.138	0.138	0.0	0.000	438	2	0.934	0.932	0.2	0.002
Grossstadtzentrum	977	5	0.385	0.377	2.1	0.008	979	5	2.088	2.039	2.3	0.049
Zentrales Wohngebiet	1015	6	0.285	0.281	1.4	0.004	1017	6	1.525	1.512	0.9	0.013
Dezentrales Wohngebiet	1504	8	0.240	0.237	1.3	0.003	1504	8	1.485	1.477	0.5	0.008
Stadtzentrum	2796	17	0.212	0.204	3.8	0.008	2794	17	1.332	1.304	2.1	0.028
Wohngebiet	3411	20	0.194	0.191	1.5	0.003	3410	20	1.064	1.052	1.1	0.012
Industriegebiet	1365	8	0.408	0.403	1.2	0.005	1365	8	2.644	2.618	1.0	0.026
Sport-/Freizeitgebiet	553	3	0.305	0.303	0.7	0.002	554	3	1.679	1.655	1.4	0.024
Landwirtschaftliches Gebiet	633	3	0.169	0.169	0.0	0.000	471	2	0.426	0.419	1.6	0.007
Naturgebiet	939	5	0.083	0.083	0.0	0.000	938	5	0.361	0.359	0.6	0.002
Bahnhof	1582	17	0.330	0.326	1.2	0.004	1509	16	1.863	1.85	0.7	0.013
Tramhaltestelle	284	5	0.663	0.661	0.3	0.002	284	5	4.223	4.215	0.2	0.008
Bushaltestelle	494	6	0.383	0.379	1.0	0.004	495	6	2.391	2.376	0.6	0.015
Flughafen	174	1	0.407	0.400	1.7	0.007	174	1	2.767	2.736	1.1	0.031

Messumgebungstyp	RMS						Peak					
	Anzahl Messwert	Anzahl Messungen	Unkorrigierter Mittelwert [V/m]	Korrigierter Mittelwert [V/m]	Mittlere Reduktion [%]	Mittlere Reduktion [V/m]	Anzahl Messwerte	Anzahl Messungen	Unkorrigierter Mittelwert [V/m]	Korrigierter Mittelwert [V/m]	Mittlere Reduktion [%]	Mittlere Reduktion [V/m]
Supermarkt	669	5	0.239	0.233	2.5	0.006	672	5	1.586	1.553	2.1	0.033
Restaurants	4408	13	0.183	0.181	1.1	0.002	4402	13	1.094	1.083	1.0	0.011
Museum	529	1	0.347	0.346	0.3	0.001	528	1	2.062	2.057	0.2	0.005
ETH/UNI/FH	403	3	0.143	0.142	0.7	0.001	403	3	0.695	0.694	0.1	0.001
Bibliotheken	151	1	0.295	0.294	0.3	0.001	151	1	2.241	2.24	0.0	0.001