



Stichprobenkonzept für Messungen der nicht- ionisierenden Strahlung mit Exposimetern

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

April 2015

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm und NIS, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Martin Röösl, Schweizerisches Tropen- und Public Health Institut

Autoren/Autorinnen: Martin Röösl, Milena Foerster, Kathrin Roser, Anna Schöni, Damiano Urbinello, Benjamin Struchen

Begleitung BAFU: Andreas Siegenthaler, Jürg Baumann

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

Abkürzungen und Begriffe

AIC	Akaike Informations-Kriterium; Das AIC ist ein Mass der relativen Qualität eines statistischen Modells für einen gegebenen Datensatz.
ARIMMORA	Advanced Research on Interaction Mechanisms of electromagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment, EU Projekt (www.arimmora-fp7.eu)
BAKOM	Bundesamt für Kommunikation
BfS	Bundesamt für Statistik
Cross-Talk	Übersprechen von anderen Frequenzbändern auf das zu messende Frequenzband bei frequenzselektiven HF-EMF Messungen.
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications, Standard für Schnurlostelefone
Downlink	Emissionen von Mobilfunkbasisstationen
EMDEX	Tragbares Messgerät zur NF-MF Messung
EME SPY	Tragbares Messgerät zur HF-EMF Messung
EMF	Elektromagnetisches Feld
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich)
EXPOM	Tragbares Messgerät zur HF-EMF Messung. Es gibt verschiedene Geräteversionen. Im Rahmen dieser Studie wurde die neueste Version EXPOM3 eingesetzt.
Exposimeter	Ein tragbares Messgerät, das die Exposition gegenüber HF-EMF aufzeichnet (der Begriff kann auch für NF-MF Messgeräte verwendet werden, ist aber dort nicht üblich). Der Begriff leitet sich vom Begriff Dosimeter ab. Da aber für NIS das biologisch relevante Dosismass nicht bekannt ist, wurde der Begriff Exposimeter eingeführt.
FM	Frequenzmodulation
GSM	Global System for Mobile Communications (2. Mobilfunkgeneration)
HERMES	Health effects related to mobile phone use in adolescents, Studie am Swiss TPH
HF-EMF	Hochfrequentes elektromagnetisches Feld; in diesem Bericht die Summe der hochfrequenten Felder, die mit den Exposimetern messtechnisch erfasst werden können.
Hz	Hertz, SI-Einheit für die Frequenz. $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ Megahertz (MHz): 10^6 Hz Gigahertz (GHz): 10^9 Hz
IFH	Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik an der ETH
LTE	Long Term Evolution (4. Mobilfunkgeneration)
Mikroumgebung	Definiertes Gebiet oder Ort, das eine für die Bevölkerung typische Expositionssituation repräsentiert. Jede Mikroumgebung wird einer bestimmten Kategorie zugewiesen (siehe „Typ von Mikroumgebung“).



NF-MF	Niederfrequentes Magnetfeld
NIS	Nicht-ionisierende Strahlung, in diesem Bericht als Synonym für EMF verwendet
Personenbezogene Messung	Eine Messung, bei der eine Person ein registrierendes Messgerät während einer gewissen Zeit in ihrem Alltag mit sich herumträgt.
Pfadmessung	Im Rahmen dieses Berichts bezeichnet dies eine Exposimetermessung, die durch instruiertes Personal in einer Mikroumgebung unter Einhaltung eines standardisierten Messprotokolls durchgeführt wird.
Pilot 2014	Im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführte EMF Messungen zwischen März und Juli 2014 für die vertiefte Untersuchung von Pfadmessungen mit Exposimetern.
Punktmessung	Eine Kurzzeitmessung an einem Ort, typischerweise nicht länger als 20 Minuten. Manchmal werden auch mehrere Messpunkte in einem Raum zu einer Punktmessung zusammengefasst. Das Messgerät wird nicht am Körper getragen.
QUALIFEX	Gesundheitsbezogene Lebensqualität und Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern: Eine prospektive Kohortenstudie, Studie im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes 57, nichtionisierende Strahlung und Gesundheit.
Swiss TPH	Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, engl. Swiss Tropical and Public Health Institute
TETRA	Funkdienst für Notfallorganisationen; Terrestrial Trunked Radio
Typ von Mikroumgebung	Typische Expositionssituation, beispielsweise Bahnhöfe, Einkaufszentren, Züge, Stadtzentren oder Wohnquartiere.
UKW	Ultrakurzwellen
UHF	Ultra High Frequency, meistens als Frequenzbandbezeichnung für TV-Signale verwendet (Frequenzbereich wird unterschiedlich definiert)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (3. Mobilfunkgeneration)
Uplink	Emissionen von Mobiltelefonen
V/m	Volt pro Meter; Mass für die elektrische Feldstärke
W/m ²	Watt pro Quadratmeter, Mass für die Leistungsflussdichte; in diesem Bericht wird meistens mW/m ² (Milliwatt pro Quadratmeter) verwendet.
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access, Drahtloser Breitbandanschluss an ein Fernmeldenetz
W-LAN	Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netzwerk (im 2.5 GHz Band, wenn nicht anders spezifiziert)
W-LAN5	Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netzwerk im 5GHz Band

Inhaltsverzeichnis

Impressum	i
Abkürzungen und Begriffe	ii
Zusammenfassung	vi
1 Hintergrund	1
2 Ziel	4
3 Methoden	5
3.1 Messgeräte	5
3.2 Publierte Daten	12
3.3 Pilotmessungen 2014	22
4 Messunsicherheiten	33
4.1 Allgemeines	33
4.2 Isotropie	33
4.3 Körperabschirmung	34
4.4 Cross-Talk	36
4.5 Vergleich EXPOM3 mit EME Spy 140	43
5 HF-EMF-Exposition	47
5.1 HF-EMF-Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen	47
5.2 Variation der HF-EMF-Exposition zwischen Mikroumgebungen vom gleichen Typ	54
5.3 Wiederholung von Exposimetermessungen auf demselben Messpfad	63
5.4 Variabilität der Exposition innerhalb einer Mikroumgebung	79
5.5 Einflussfaktoren auf Exposimetermessungen	88
6 Resultate für niederfrequente Felder	99
7 Diskussion	110
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	110
7.2 Stichprobenkonzept für Aussenmessungen und öffentliche Verkehrsmittel	112

7.3	Stichprobenkonzept für private Innenräume	117
8	Schlussfolgerung	123
9	Danksagung	123
10	Literaturverzeichnis	124

Zusammenfassung

Die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF) ist im heutigen Alltag unumgänglich und verändert sich mit der technischen Entwicklung laufend. Für die Untersuchung von möglichen Gesundheitsauswirkungen und für Risikoabschätzungen ist die Kenntnis der Expositionssituation der Bevölkerung unabdingbar. Zurzeit gibt es diesbezüglich grosse Wissenslücken und die Weltgesundheitsorganisation WHO erachtet deshalb die Untersuchung der hochfrequenten (HF)-EMF-Exposition in der Bevölkerung als eine Priorität in der EMF-Forschung.

In einer Konzept- und Machbarkeitsstudie von 2012 wurde eine ortsbezogene Erhebung mit instruiertem Personal als Bestandteil eines Monitorings von HF-EMF und niederfrequenten Magnetfeldern (NF-MF) empfohlen (Dürrenberger et al. 2012). Als Ort wird dabei nicht ein einzelner Ortspunkt verstanden, sondern eine sogenannte Mikroumgebung. Das kann beispielsweise ein Bahnhof, ein Einkaufszentrum, ein Dorf- oder Stadtquartier sein, das auf einer definierten Wegstrecke wiederholt mit einem Exposimeter vermessen wird (Mikroumgebungsexposimetrie).

Das Ziel dieser Studie ist einerseits, offene methodische Fragen im Zusammenhang mit der Mikroumgebungsexposimetrie im Rahmen eines Monitorings zu klären, und andererseits, einen Vorschlag für ein gesamtschweizerisches EMF-Monitoring mit Exposimetern inklusive eines Stichprobenkonzepts zu entwickeln. Dazu sind publizierte und vorhandene nicht publizierte Messdaten und Praxiserfahrungen aus dem In- und Ausland herangezogen worden.

Zusätzlich wurden zwischen März und Juli 2014 als Pilotprojekt je zwei Mal Messungen mit zwei verschiedenen HF-EMF- und einem NF-MF-Exposimeter in 51 verschiedenen Mikroumgebungen und in öffentlichen Verkehrsmitteln (Tram, Zug, Bus) in der ganzen Schweiz durchgeführt. Diese Messungen – im Folgenden als *Pilot 2014* bezeichnet – zeigen, dass draussen die Hauptexpositionsbeiträge von Mobilfunkbasisstationen stammen. In öffentlichen Verkehrsmitteln spielt auch der Uplink (Emissionen von Mobiltelefonen) eine wichtige Rolle. W-LAN (wireless local area network, drahtloses Netzwerk) ist nur marginal vorhanden, obwohl in öffentlichen Verkehrsmitteln (z.B. Bus und Trams) oder öffentlichen Aussenplätzen in den letzten Jahren viele Hotspots eingerichtet wurden. Die HF-EMF-Exposition nimmt tendenziell mit zunehmender Urbanisierung zu. Relativ hoch ist sie auch in Industriegebieten und öffentlichen Verkehrsmitteln (besonders im Tram). Gering ist die HF-EMF-Exposition in ländlichen Wohngebieten und in Schulhäusern. Die niederfrequente Magnetfeldexposition (NF-MF) ist im Stadtzentrum und in Bussen am höchsten (ca. 0.3 μ T).

Innerhalb von zwei bis drei Monaten auf dem gleichen Messpfad wiederholte Messungen sind sehr gut replizierbar (Korrelation der gemittelten HF-EMF-Exposition zwischen der Erst- und Zweitmessung: 0.90). Der Vergleich der Messwerte zweier verschiedener Exposimeter-Modelle ergab eine gute Übereinstimmung (Korrelation der HF-EMF Mittelwerte pro Mikroumgebung von EME SPY 140 vs. EXPOM3: 0.98). Messtechnisch kritisch ist der Cross-Talk, das heisst das Übersprechen von anderen Frequenzbändern auf das zu messende Frequenzband. Betroffen davon sind insbesondere die Frequenzbänder für DECT (Schnurlostelefon) und W-LAN5. Da deren Anteile draussen aber gering sind, ist die Messung der gesamten NIS-Exposition bei Aussenmessungen kaum beeinflusst. Die Tageszeit und der Wochentag hatten kaum einen Einfluss auf das Messergebnis. Bevölkerungsdichte, beziehungsweise Bebauungsdichte sind die Haupteinflussfaktoren auf NF-MF- und HF-EMF-Expositionen. Für letztere ist zusätzlich die Dichte von Mobilfunkbasisstationen in einem Gebiet relevant.

Die Studie zeigt, dass die Durchführung eines qualitativ guten Monitorings von EMF mit tragbaren Geräten möglich ist und ein solches wichtige Erkenntnisse über die EMF-Exposition der Allgemeinbevölkerung liefert. Für ein zukünftiges Monitoring wird empfohlen, auf Messungen draussen, in öffentlichen Verkehrsmitteln, öffentlich zugänglichen Innenräumen und Wohnungen zu fokussieren. Dabei wird für Wohnungen ein anderes Vorgehen vorgeschlagen als für das Monitoring draussen und in öffentlichen Verkehrsmitteln.

Für die Messungen draussen und in öffentlichen Verkehrsmitteln wird die Mikroumgebungsexposimetrie durch instruiertes Personal mit dem EXPOM3 für HF-EMF und mit dem EMDEX Gerät für NF-MF empfohlen. In der ganzen Schweiz sind unter der Berücksichtigung von Bebauungs- und Bevölkerungsdichte, dem Standort von EMF emittierenden Anlagen und von anderen geographischen Charakteristika rund 140 Mikroumgebungen in 30-35 Gemeinden zu definieren, die einmal pro Jahr auf einem definierten Messpfad während 15 bis 30 Minuten vermessen werden. Die Anreise zu und zwischen den Messgebieten erlaubt die Erfassung der Exposition in öffentlichen Verkehrsmitteln sowie an Bahnhöfen und Haltestellen.

Für das Monitoring in Wohnungen wird empfohlen, in einer Stichprobe von Wohnzimmern mit einem frequenzselektiven Messgerät für HF-EMF und einem Messgerät für NF-MF Punktmessungen während ca. 10 Minuten durch eine Fachperson durchzuführen. Ergänzend können in den Wohnungen auch 24-Stunden Messungen an einem Messpunkt durchgeführt werden. Dazu sollen etwa 150 bis 200 Wohnungen zufällig ausgewählt werden. Neben den Messungen werden die Bewohner mit einem schriftlichen Fragebogen über expositionsrelevante Verhaltensweisen befragt. Das erlaubt die integrative Abschätzung der

gesamten persönlichen EMF-Exposition durch Umweltexpositionen und selbst genutzte Geräte. Da eine solche Erhebung relativ aufwendig ist, wird empfohlen, sie nur alle drei bis fünf Jahre durchzuführen.

1 Hintergrund

Die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF) ist im heutigen Alltag unumgänglich. Wo Strom fließt, entstehen niederfrequente (NF) elektrische und magnetische Felder. Drahtlose Kommunikationsgeräte wie Mobil- oder Schnurlostelefone emittieren hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF). Weltweit ist mittlerweile die Anzahl von Mobiltelefonverträgen etwa gleich gross wie die Weltbevölkerung. Auch die technische Entwicklung verläuft rasant: In den 1980er Jahren wurde das Natel („Nationales Autotelefon“) in der Schweiz eingeführt, zurzeit wird schon die vierte Generation (4G, LTE) ausgebaut. Diese rasche Veränderung wirft natürlich Fragen nach den gesundheitlichen Auswirkungen auf. Voraussetzung, um mögliche gesundheitliche Wirkungen untersuchen oder abschätzen zu können, ist die Kenntnis der Expositionssituation der Bevölkerung. Zurzeit ist darüber sehr wenig bekannt und die raschen technischen Veränderungen haben zur Folge, dass Messungen relativ schnell veraltet sind. Die Weltgesundheitsorganisation WHO erachtet deshalb die Untersuchung der HF-EMF-Exposition in der Bevölkerung als eine Priorität in der EMF-Forschung (van Deventer et al. 2011).

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) beabsichtigt, ein nationales Monitoring der Immissionen nichtionisierender Strahlung (NIS) aufzubauen. Dieses soll statistische Aussagen darüber machen, wie sich die Immissionen über die Bevölkerung verteilen, von welchen Quellen/Technologien sie stammen und wie sich diese Verteilungen im Laufe der Jahre entwickeln. Die Ergebnisse sollen für die Schweizer Bevölkerung in ihrem täglichen Lebensumfeld repräsentativ sein.

Als Vorbereitung wurde in den Jahren 2011/12 eine Konzept- und Machbarkeitsstudie erstellt (Dürrenberger et al. 2012). In Kapitel 6 dieser Konzeptstudie sind die Möglichkeiten und Grenzen eines Monitorings mithilfe von personengetragenen Exposimetern beschrieben. Die Autoren empfahlen als Bestandteil eines Monitorings eine ortsbezogene Erhebung mit solchen Exposimetern durch instruiertes Personal. Als Ort wird dabei nicht ein einzelner Ortspunkt verstanden, sondern eine sogenannte Mikroumgebung. Das kann beispielsweise ein Bahnhof, ein Einkaufszentrum oder ein Dorf- oder Stadtquartier sein, das auf einer definierten Wegstrecke wiederholt mit einem Exposimeter vermessen wird.

Der Vorteil von Messungen mit tragbaren Exposimetern ist, dass man die Strahlenexposition im Alltag messen kann, dort also, wo sich Leute normalerweise aufhalten. Insbesondere kann man innerhalb von kurzer Zeit eine Vielzahl von Messwerten an verschiedenen Orten

erheben (Messintervall im Sekundenbereich). Aufgrund dieser grossen Datenmenge haben Ungenauigkeiten in einzelnen Messwerten wenig Einfluss auf das Gesamtergebnis, solange Messwerte nicht systematisch unter- oder überschätzt werden. Da nicht bekannt ist, welche Parameter der Exposition biologisch am relevantesten sind, sind eine Vielzahl möglicher Expositionsmasse von Interesse, die aus Exposimetermessungen extrahiert werden können (z.B. mittlere Exposition, Expositionszeit über einem gewissen Schwellenwert oder die Schwankungen in der Stärke der Exposition).

In den letzten Jahren wurden in mehreren Ländern Studien durchgeführt, bei denen Exposimeter für personenbezogene Messungen eingesetzt wurden (Bolte und Eikelboom 2012, Frei et al. 2009b, Juhasz et al. 2011, Radon et al. 2006, Viel et al. 2009b). Dabei füllten die Probanden ein Aktivitätstagebuch aus, so dass anschliessend alle Messwerte einer Aktivität bzw. einem Ort zugeordnet werden konnten. Diese Studien erlaubten es, Daten im Wohnbereich und anderen Innenräumen (Schulen, Arbeitsplätze) zu sammeln, die sonst für Messungen nicht einfach zugänglich sind. Solche Messungen sind jedoch für die Probanden aufwendig und stellen hohe Ansprüche an die Einhaltung der Messvorgaben. Im Vergleich zu solchen Probandenmessungen kann bei einer ortsbezogenen Erhebung mit geschultem Personal das Messprotokoll genauer umgesetzt und kontrolliert werden. Die Messungen können beispielsweise zur gleichen Tageszeit und am gleichen Wochentag wiederholt werden. Es kann auch verlangt werden, dass die Person, die die Messungen durchführt, das eigene Mobiltelefon ausschaltet, so dass die Messung davon ungestört ist und sichergestellt werden kann, dass die Messwerte ausschliesslich von Fernfeldquellen stammen, was bei Probandenerhebungen ein aufwändigeres Unterfangen wäre. Im Vergleich zur reinen Propagationsmodellierung kann bei der ortsbezogenen Erhebung mit tragbaren Messgeräten auch die Exposition von nicht fix installierten Sendern berücksichtigt werden (z.B. von W-LAN Hotspots oder Mobiltelefonen anderer Leute) oder von kleinen Mobilfunkbasisstationen (Pico- und Femtozellen), die keinem Bewilligungsverfahren unterliegen und für die deshalb Inputdaten für Modellierungen kaum zur Verfügung stehen würden. Solche Quellen spielen möglicherweise in der Zukunft eine zunehmende Bedeutung für die Exposition der Bevölkerung.

Für dieses Messverfahren konnte in einer ersten Studie gezeigt werden, dass die Ergebnisse über mehrere Wochen und zu verschiedenen Tageszeiten und Wochentagen gut reproduzierbar sind und sich somit grundsätzlich eignen, um längerfristige Trends festzustellen (Urbiniello et al. 2014a). Bevor dieser Ansatz aber für ein Monitoring in einem grösseren Rahmen implementiert werden kann, sind weitere Grundsatzfragen zu klären und Grundsatzentscheidungen zu fällen. So war aufgrund der bisherigen Messreihen in lediglich vier

Städten unklar, wie repräsentativ die Messungen auf einer Strecke für die Exposition der betreffenden Mikroumgebungen tatsächlich waren. Unklar war auch, welche Typen von Mikroumgebungen für ein solches Monitoring zu berücksichtigen sind, wie stark die Messresultate von verschiedenen Mikroumgebungen vom gleichen Typ variieren, und wie diese für eine repräsentative Aussage auszuwählen sind. Im Weiteren sind Fragen der Messgenauigkeit zu klären, damit bestimmt werden kann, mit welchen Geräten, in welcher Art und wie häufig solche Messungen durchgeführt werden müssen, um so Aussagen über die räumliche Verteilung und zeitliche Veränderung der HF-EMF-Exposition machen zu können.

2 Ziel

Die vorliegende Studie hat folgende Ziele:

1. Beschreibung der Limitationen und technischen Fortschritte der gängigen Hochfrequenz-Exposimeter und Darstellung von praktischen Erfahrungen.
2. Erarbeitung eines Vorschlages für ein standardisiertes Vorgehen für die Messungen an Aussenplätzen, in öffentlichen Verkehrsmitteln und Innenräumen. Dieser enthält alle Aspekte der konkreten Durchführung der Messungen (insb. instrumentelle Einstellungen, Messdauer, Vorkehrungen zur Vermeidung von Verfälschungen der Immissionen durch die Messperson, Vermeidung von Störungen durch körpernahe Emittenten, allfällige weitere Vorsichtsmassnahmen) sowie Aspekte der Datenanalyse.
3. Entwicklung eines Vorschlags für ein gesamtschweizerisches NIS-Monitoring mit der oben beschriebenen Exposimeter-Methode inklusive Vorschlag für die einzuschliessenden Typen von Mikroumgebungen.
4. Erarbeitung eines detaillierten Stichprobenkonzepts zur Auswahl von Mikroumgebungen unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der EMF-Exposition mit dem Ziel, für jeden vorgeschlagenen Typ von Mikroumgebungen eine gesamtschweizerisch repräsentative Verteilungsfunktion der Immissionen zu erhalten.

3 Methoden

Für die Entwicklung des Mess- und Stichprobenkonzepts sind publizierte und vorhandene nicht publizierte Messdaten und Praxiserfahrungen aus dem In- und Ausland herangezogen worden (siehe Kapitel 3.2). Zur Schliessung von bestehenden Wissenslücken wurden zusätzliche Messungen durchgeführt (siehe Kapitel 3.3). Es werden alle Immissionen (hoch- und niederfrequente EMF) eingeschlossen, die mit den heute erhältlichen Exposimetern erfasst werden können.

3.1 Messgeräte

Im Folgenden werden die in der Forschung am häufigsten verwendeten Geräte kurz beschrieben. Nicht weiter diskutiert wird ein Messgerät von Maschek, das v.a. in der Anfangsphase der HF-EMF Forschung verwendet wurde (Radon et al. 2006). Das Gerät misst nicht isotrop, was zur Folge hat, dass die Einstrahlungsrichtung auf das Exposimeter die Messung beeinflusst. Insbesondere, wenn das Exposimeter nicht am Körper getragen wird (z.B. in der Nacht), sind die Messungen deshalb fehlerbehaftet. Zudem hat das Gerät eine schlechte Differenzierung zwischen Uplink und Downlinkbändern im Mobilfunkbereich (Heinrich et al. 2011).

3.1.1 EME SPY

Die Exposimeter vom Typ EME Spy 120 (Abbildung 1) bzw. EME SPY 121 (SATIMO, Courtaboeuf, Frankreich, www.satimo.fr) erlauben die separate Messung von 12 verschiedenen Frequenzbändern zwischen dem Radio UKW Band (ab 88 MHz) und dem WLAN-Band (bis 2.5 GHz) (Tabelle 1). Insbesondere kann bei den drei Mobilfunkbändern GSM900 (Global System for Mobile Communications (2. Mobilfunkgeneration)), GSM1800 und UMTS (Universal Mobile Telecommunications System (3. Mobilfunkgeneration)) jeweils zwischen der Strahlung von der Basisstation (Downlink) und dem Mobiltelefon (Uplink) unterschieden werden. Die Nachweisgrenze liegt für jedes Frequenzband bei 0.05 V/m. Die Antenne des Exposimeters ist isotrop und misst in allen drei Richtungen des Raumes gleichmässig (Abweichung von der Isotropie im Bereich von 1-2 dB).



Abbildung 1: Portables Messgerät des Typs EME Spy 120 (links) und EME Spy 140 (rechts).

Tabelle 1: Überblick über die technischen Spezifikationen der EME SPY Geräte (*abhängig vom Frequenzband; †theoretische Speicherkapazität, welche möglicherweise nicht erreicht wird wegen fehlender Batteriekapazität; ‡ in der Schweiz wird vorwiegend TETRAPOL (Polycom) im Frequenzbereich 380 – 383 sowie 390 - 393 MHz genutzt. Es besteht die Möglichkeit, dass für lokale Tetrapol-Netze Frequenzen ausserhalb von 380-400 MHz genutzt werden, Faktenblatt TETRAPOL BAKOM).

Band	Frequenz [MHz]	Beschreibung	EME SPY 120/121	EME SPY 140
FM	88-108	Radio UKW	ja	ja
TV3	174-223	TV Sender	ja	ja
Tetra/Tetrapol [†]	380-400	Mobilfunk für Rettungsdienste	ja	ja
TV4/5	470-830	TV Sender	ja	ja
Uplink 900	880-915	Emissionen vom Mobiltelefon	ja	ja
Downlink 900	925-960	Emissionen von der Mobilfunkbasisstation	ja	ja
Uplink 1800	1710-1785	Emissionen vom Mobiltelefon	ja	ja
Downlink 1800	1805-1880	Emissionen von der Mobilfunkbasisstation	ja	ja
DECT	1880-1900	Schnurlostelefon	ja	ja
Uplink 1900	1920-1980	Emissionen vom Mobiltelefon	ja	ja
Downlink 2100	2110-2170	Emissionen von der Mobilfunkbasisstation	ja	ja
W-LAN	2400-2500	Wireless Local Area Network	ja	ja
WIMAX	3400-3800	Worldwide Interoperability for Microwave Access	nein	ja
W-LAN5	5150-5850	W-LAN im 5 GHz Band	nein	ja
Eigenschaften:				
Sensitivitätsbereich (V/m)			0.05 – 10	0.005/0.05 [†] -5
Messintervall			4 – 255s	4 – 255s
Speicherkapazität (Anzahl Messwerte)			12,540	80,000 [†]
Grösse (L x H x B in mm)			193 x 96x 70	169 x 79 x46
Gewicht (in g)			450	400
Marker (um Ereignisse zu markieren)			nein	ja

Mittlerweile gibt es ein Nachfolgemodell (EME SPY 140). Mit dem EME SPY 140 können noch zwei zusätzliche Frequenzbänder gemessen werden: WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access; 3400 – 3800 MHz) und W-LAN5 (5150 – 5850 MHz) (Tabelle 1). Die Sensitivität wurde für die meisten Frequenzbänder erhöht und die Nachweisgrenzen liegen bei 0.005 V/m für die Mobilfunkbänder und das 2.5 GHz W-LAN Band, 0.1 V/m für TETRA/TETRAPOL (Terrestrial Trunked Radio), TV4 & 5, 0.02 V/m für TV3, WiMAX, W-LAN5 und 0.05 V/m für UKW Radio. Es kann auch mit einem Echtzeitmonitor bestellt werden, so dass man die Messdaten unmittelbar anschauen kann.

Das EME SPY hat sich als Messinstrument bewährt und in der Anwendung innerhalb der EMF-Forschung etabliert (siehe Kapitel 3.2.6). Das EME SPY 120 wurde in mehreren Studien am Schweizerischen Tropen- und Public Health Institut (Swiss TPH) eingesetzt. Im Rahmen dieser Projekte wurde das Exposimeter umfassend evaluiert (Lauer et al. 2012). Wie bei allen Exposimetern ist dabei der „Cross-Talk“ benachbarter Frequenzbänder ein Problem, das insbesondere zwischen GSM1800, DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) und UMTS auftritt (siehe Kapitel 4.2). Um Cross-Talk zwischen Up- und Downlink-Mobilfunkbändern zu minimieren, beruht das Messkonzept beim EME SPY 120 auf einer Kombination von physikalischer Filterung und einem numerischen Algorithmus. Beim numerischen Algorithmus wird von ca. 20 Messwerten eines Messzyklus von rund 4s die Verteilung der Maximal- und Minimalwerte bestimmt und anhand deren Verhältnisse geschlossen, wie viel Uplink- und wie viel Downlinkexposition vorhanden ist. Es zeigt sich, dass dadurch die Messgenauigkeit stark von der Slotkonfiguration abhängt (Lauer et al. 2012). Dieses Messprinzip stellt insbesondere für die Zukunft ein Problem dar, wenn verschiedene Technologien (GSM, UMTS, LTE (Long Term Evolution)) dieselben Frequenzbänder benutzen. Aus diesem Grund kann das EME SPY 120 für die Zukunft nicht mehr empfohlen werden. Beim EME SPY 140 wurde das Messverfahren verändert und die Messung wird mit einem „Root-Mean-Square“-Detektor durchgeführt. Damit ist zu erwarten, dass die Messung in einem Frequenzband unabhängig von der Signalcharakteristik ist.

3.1.2 EXPOM

Das EXPOM wurde am Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik (IFH) der ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) Zürich entwickelt (Lauer et al. 2011) mit dem Ziel, die technischen Limitierungen der bisherigen Exposimeter (Empfindlichkeit; Diskriminierung verschiedener Funkdienste) zu minimieren (siehe <http://www.fieldsatwork.ch/>). Eine erste Geräteversion wurde in der HERMES (Health effects related to mobile phone use in

adolescents) Studie für personenbezogene Messungen eingesetzt. Das Gerät wurde daraufhin weiter entwickelt und seit Anfang 2014 gibt es das Modell EXPOM3 (Abbildung 2).



Abbildung 2: EXPOM3 Gerät

Die Messmethodik des EXPOM3 beruht auf einem „Root-Mean-Square“-Detektor (Tabelle 2). Es misst 16 verschiedene Frequenzbänder zwischen Radio UKW (ab 88 MHz) und dem 5 GHz W-LAN Band (bis 5.875 GHz). Integriert ist ein GPS und das Gerät besitzt einen Ereignismarker. Dieser kann bei speziellen Situationen gedrückt werden, z.B. um den Beginn und das Ende einer Messung an einem bestimmten Ort im Datensatz zu kennzeichnen.

Mit vollgeladener Batterie kann das Gerät rund 12 Stunden betrieben werden. Maximal kann alle 3 Sekunden ein Messwert gespeichert werden. Das Gerät kann via Bluetooth mit einem Mobiltelefon kommunizieren, so dass die Daten auch in Echtzeit visualisiert werden können. Dabei werden Bluetooth und die Messung alternierend betrieben, damit keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Es ist zu beachten, dass das EXPOM3 auch Werte unterhalb der spezifizierten Nachweisgrenze ausgibt (Tabelle 2). Diese Werte können unter Umständen einen grossen relativen Fehler haben. Dennoch ist zu erwarten, dass sie bei einer langen Messreihe eine bessere Abschätzung der wahren Exposition erlauben, als wenn man die Werte auf die Nachweisgrenze anheben oder auf 0 setzen würde (Rösli et al. 2008). Aus diesem Grund sind in diesem Bericht alle Summenstatistiken mit diesen Werten berechnet.

Die Messsoftware hat einen Algorithmus implementiert, mit welchem aus der Korrelation der Messwerte zwischen den verschiedenen Bändern eine Cross-Talk Korrektur durchgeführt werden kann (siehe Kapitel 4.4).

Tabelle 2: Überblick über die technischen Spezifikationen des EXPOM3 Messgerätes.

Detektionsmethode	Bandselektive 'True-RMS' Detektion, Integrationsintervall: 0.3 s		
Gemessener Frequenzbereich	Frequenzband	Untere und obere Frequenzgrenze, Bandbreite	Sensitivitätsbereich
	UKW Radio	87.5-108 MHz, 20.5 MHz	0.02 V/m-5 V/m
	DVB-T	470-790 MHz, 320 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Downlink 800	791-821 MHz, 30 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Uplink 800	832-862 MHz, 30 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Uplink 900	880-915 MHz, 35 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Downlink 900	925-960 MHz, 35 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Uplink 1800	1710-1785 MHz, 75 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Downlink 1800	1805-1880 MHz, 75 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	DECT	1880-1900 MHz, 20 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Uplink 1900	1920-1980 MHz, 60 MHz	0.003 V/m-5 V/m
	Downlink 2100	2110-2170 MHz, 60 MHz	0.003 V/m-5 V/m
	W-LAN	2400-2485 MHz, 85 MHz	0.005 V/m-5 V/m
	Uplink 2600	2500-2570 MHz, 70 MHz	0.003 V/m-5 V/m
	Downlink 2600	2620-2690 MHz, 70 MHz	0.003 V/m-5 V/m
	WiMax 3.5	3400-3600 MHz, 200 MHz	0.003 V/m-5 V/m
W-LAN5	5150-5875 MHz, 725 MHz	0.05 V/m-5 V/m	
Isotropieabweichung	ca. \pm 3 dB		
Messrate:	3 bis 6555 Sekunden (in 0.5 Sekunden-Schritten einstellbar)		
Batterie:	Integrierte aufladbare Lithium-Ionen Batterie. max. Ladezeit: <3 h		
Messdauer:	> 12 h Stunden kontinuierliche Messung, abhängig vom Einschalten des GPS und Bluetooth		
Speicherkapazität:	4 GB SD Speicherkarte für 50 Millionen Messwerte		
Kommunikation:	Echtzeit Datenstreaming via Bluetooth oder über Kabel an einen PC mittels USB Anschlusses		
Positionsmarkierung:	Integriertes GPS Modul zur örtlichen Registrierung von jedem Messwert		
Zeitsynchronisation:	Integrierte Uhr (real time clock, RTC) mit Backup Batterie		
Stromversorgung:	16-24V DC, max 1000mA		
Grösse:	16 cm x 8 cm x 2.5-5 cm		
Gewicht:	ca. 300 g		

3.1.3 Mehrfachantennen-Exposimeter (MAE)

Ein neuartiges Exposimeter wurde kürzlich von der Universität Ghent/iMinds in Belgien entwickelt (Thielens et al. 2013). Dabei werden für jedes Frequenzband drei bis vier Antennen an verschiedenen Orten am Körper getragen, um so den Einfluss des Körpers auf das Messergebnis zu minimieren (siehe Abbildung 3). Idealerweise wird das Messgerät mit

der Person, die es trägt, im Labor kalibriert. Ein weiterer Vorteil des Mehrfachantennen-Exposimeters (im Englischen als „Personal Distributed Meter“, kurz PDM, bezeichnet) ist neben der Minimierung des Körpereinflusses, dass die Grösse der Antenne für jedes zu messende Frequenzband optimiert wird (keine Breitbandantenne), was zu deutlich genaueren Messergebnissen führt und den Cross-Talk zwischen benachbarten Frequenzbändern erheblich reduziert, da das zu messende Frequenzband physikalisch besser abgegrenzt werden kann. So waren in einer Pilotmessung kleinste Variationen beim Vorbeigehen an einem Fenster in einem Gebäude oder ein Stockwerkwechsel in den Daten deutlich ersichtlich (siehe Abbildung 4). Die Nachweisgrenze für Messungen liegt im Bereich von 0.001 V/m, also rund 5 Mal tiefer als beim EXPOM3 oder EME SPY 140. Zudem ist zu erwarten, dass bei Messungen mit dem MAE im Vergleich zu anderen Exposimetern mit der gleichen Sensitivität der Anteil an Messungen unterhalb der Nachweisgrenze zusätzlich reduziert ist, weil immer eine Messantenne auf der dem Sender zugewandten Körperseite angebracht ist. Damit können auch tiefe Werte registriert werden, die auf der vom Sender abgewandten Körperseite unterhalb der Nachweisgrenze wären.



Abbildung 3: Mehrfachantennen Exposimeter (Personal Distributed Exposure Meter)

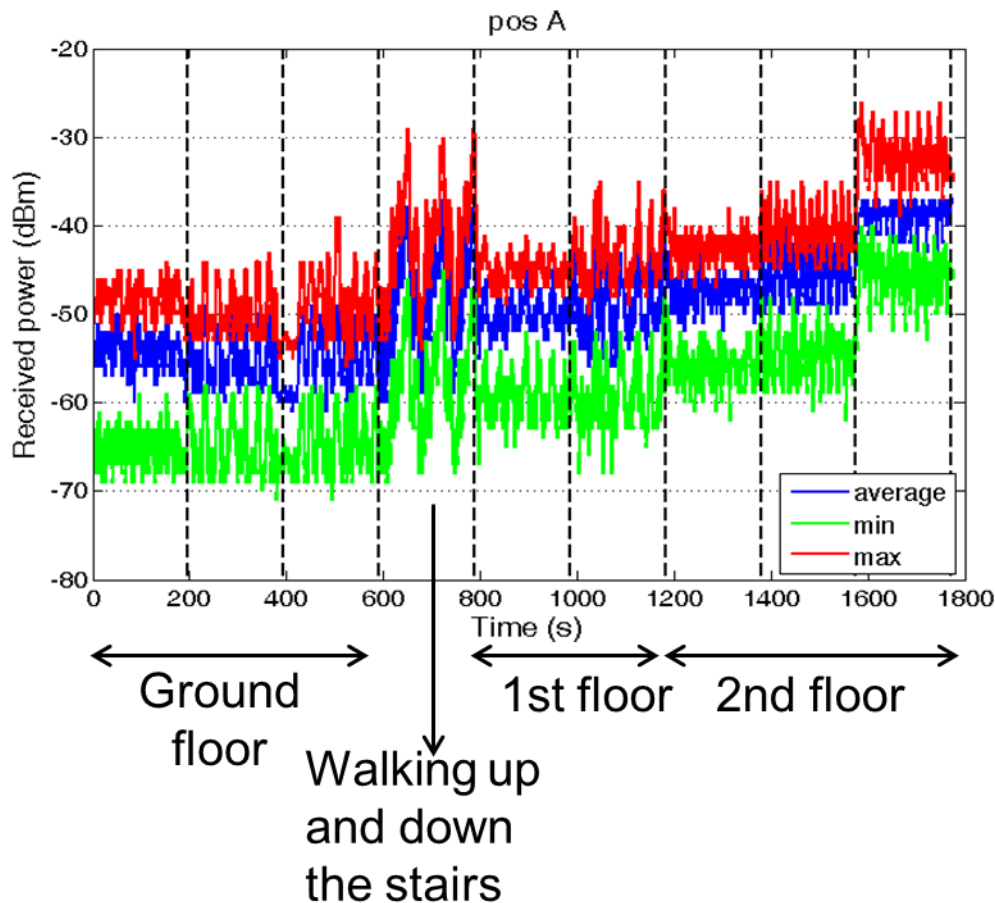


Abbildung 4: Beispiel einer Pilotmessung mit dem MAE.

Der Nachteil des Gerätes ist, dass es relativ empfindlich und kompliziert in der Handhabung und daher für Probandenuntersuchungen ungeeignet ist. Der Einsatz mit Fachpersonen ist aber kein Problem. Jedoch hängt das Messergebnis von der Physiognomie der Messperson ab, so dass es idealerweise am Körper der Messperson kalibriert werden sollte. Im Moment gibt es erst einen Prototyp für ein Frequenzband (GSM900 Downlink). Es ist geplant, das MAE für weitere Frequenzbänder zu erweitern und ein Konzept zu entwickeln, um zwischen Quellen am Körper und Fernfeldquellen zu unterscheiden. Letzteres sollte theoretisch möglich sein, wenn man die Unterschiede der gleichzeitigen Messwerte der drei Antennen analysiert.

3.1.4 Portable NF-MF Geräte

Bereits seit vielen Jahren werden tragbare Geräte für die Messung von NF-MF eingesetzt. Am populärsten sind die EMDEX II Geräte für den Frequenzbereich von 40 - 800 Hz sowie die EMDEX LITE Geräte für den Frequenzbereich 10 - 1000 Hz (Herstellerangabe siehe <http://www.enertech.net/html/recordmeters.html>). In der Schweiz wurden EMDEX Geräte im

Rahmen einer Bevölkerungsmessstudie in den Jahren 1993 und 1994 eingesetzt (Stratmann et al. 1995). Zudem wurden sie in der TransExpo Studie (siehe Kapitel 3.2.3) und in der ARIMMORA Studie (siehe Kapitel 3.2.4) verwendet.

Ein anderes Gerät zur Messung von Gleichstrom und NF-MF wird zurzeit in der Schweiz entwickelt (<http://www.fieldsatwork.ch/index.php?page=products>). Erfahrungen mit diesem Produkt liegen noch nicht vor

3.2 Publierte Daten

Im Folgenden sind die Datenerhebungen, die in diesen Bericht einfließen, kurz beschrieben. Es wird erläutert, ob es sich um eine personenbezogene Messstudie mit Freiwilligen handelt, um Punktmessungen (z.B. einige Minuten in Wohnungen) oder um eine ortsbezogene Erhebung (Pfadmessung), bei der die Messung von einem Studienassistenten durchgeführt wird. Weiter werden der Kontext, der Zeitraum der Datenerhebung, das verwendete Messgerät und die Grösse des Datensets dargestellt.

3.2.1 QUALIFEX

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 57 (Nichtionisierende Strahlung und Umwelt) wurde zwischen 2007 und 2010 die epidemiologische Studie QUALIFEX (Gesundheitsbezogene Lebensqualität und Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern: Eine prospektive Kohortenstudie) durchgeführt. Im QUALIFEX Projekt wurde der Frage nachgegangen, wie stark die Bevölkerung im Alltag HF-EMF ausgesetzt ist und ob es einen Zusammenhang zwischen der Exposition und unspezifischen Beschwerden, wie z.B. Kopfschmerzen oder Schlafstörungen gibt (Frei et al. 2012, Mohler et al. 2012, Rösli et al. 2010). Das QUALIFEX Projekt war weltweit eines der ersten Projekte überhaupt, in dem tragbare Messgeräte für die Messung von HF-EMF eingesetzt wurden.

Die persönliche Strahlenexposition wurde bei 166 Studienteilnehmern über den Zeitraum einer Woche gemessen. Die Teilnehmer füllten dabei ein Aktivitätstagebuch aus, das in die Bereiche „zu Hause“, „Arbeitsplatz“, „Unterwegs“, und „Sonstiges“ eingeteilt war (zu jedem dieser Bereiche gab es zusätzlich detailliertere Unterkategorien). Ausserdem wurden die Studienteilnehmer gebeten zu notieren, wann sie ein Mobil- oder Schnurlostelefon benutzten. Um möglichst die ganze Bandbreite von möglichen Expositionssituationen abzudecken, wurde ein Teil der Studienteilnehmer, die potentiell stark durch Mobilfunkbasisstationen oder Rundfunksender exponiert waren, telefonisch angefragt, ob sie an der Studie teilnehmen möchten. Die restlichen 131 Studienteilnehmer waren vorwiegend

Personen, die sich über unsere Homepage für die Teilnahme anmeldeten. Durch die Rekrutierung motivierter Studienteilnehmender sollte sichergestellt werden, dass eine hohe Datenqualität erzielt werden kann, da die Teilnahme für die Probanden ziemlich aufwändig war. Mithilfe der Messungen und der Angaben in einem zusätzlichen Expositionsfragebogen wurden daraufhin expositionsrelevante Faktoren und Verhaltensweisen identifiziert und daraus ein Prädiktionsmodell entwickelt (Frei et al. 2009a). Dieses Modell wurde in einem weiteren Schritt für die Expositionsbestimmung von rund 1500 zufällig ausgewählten Personen aus dem Raum Basel eingesetzt, die mit Fragebogen zu expositions- und gesundheitsrelevanten Faktoren befragt wurden.

Tabelle 3: Überblick über die Qualifex Messungen

Name	Studententyp	Messgerät	Zeitraum	Datensatz	Bemerkungen
Qualifex	personenbezogen mit Tagebuch	EMF SPY 120, Messinterv all 90s	2007	Kontinuierliche Messungen (Messdauer: 1 Woche; ca. 7000 Messwerte pro Person) von 198 Personen	32 Personen doppelt gemessen
Schlafzimmer-Qualifex	Punktmessung	Narda 3000	2007	7 Messpunkte in 144 Schlafzimmern, jeweils 30 s pro Messpunkt	

Expositionsdaten aus der QUALIFEX-Studie sind in folgenden Artikeln publiziert: Rösli et al. (2008), Frei et al. (2009b), Frei et al. (2009a), Mohler et al. (2009), Frei et al. (2010), Bürgi et al. (2010), Joseph et al. (2010), Joseph et al. (2012), Lauer et al. (2012) und Lauer et al. (2013).

3.2.2 Basel Monitoring (inkl. Ghent, Brüssel und Amsterdam)

Das Basel Monitoring besteht aus verschiedenen Messkampagnen, die zwischen 2010 und 2012 in Basel, Ghent, Brüssel und Amsterdam durchgeführt wurden.

Die längste Datenreihe wurde zwischen Mai 2010 und April 2012 in Basel gemessen und wird im Folgenden als Langzeitmessung bezeichnet. Die Messungen fanden monatlich, vorzugsweise in der ersten Monatswoche, an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt, jeweils mittwoch- und donnerstagmorgens, in verschiedenen Mikroumgebungen an Aussenplätzen, in öffentlichen Verkehrsmitteln und in Innenräumen (Tabelle 4). Die Datenerhebung erfolgte gemäss einer standardisierten Messprozedur mit einer definierten Messabfolge in den einzelnen Mikroumgebungen sowie in vorgegebenen Zeitspannen. Das Exposimeter wurde

in einer Tasche positioniert, welche am Rücken getragen wurde. Es wurde sichergestellt, dass bei der Durchführung der Messung kein eingeschaltetes Mobiltelefon mitgetragen wurde.

Tabelle 4: Übersicht über die Typen von Mikroumgebungen, welche in der Langzeitmessung miteinbezogen wurden. Die Zahlen in Klammern bei den Aussenplätzen beziehen sich auf die Messpfade in Abbildung 5.

Aussenplätze	Öffentliche Verkehrsmittel	Innenräume
Zentrales Wohngebiet (1)	Interregional-Zug	Bahnhof
Dezentrales Wohngebiet (2)	S-Bahn	Flughafen
Stadtzentrum (3)	Bus	Einkaufszentren
Kleinstadt (4)	Tram	

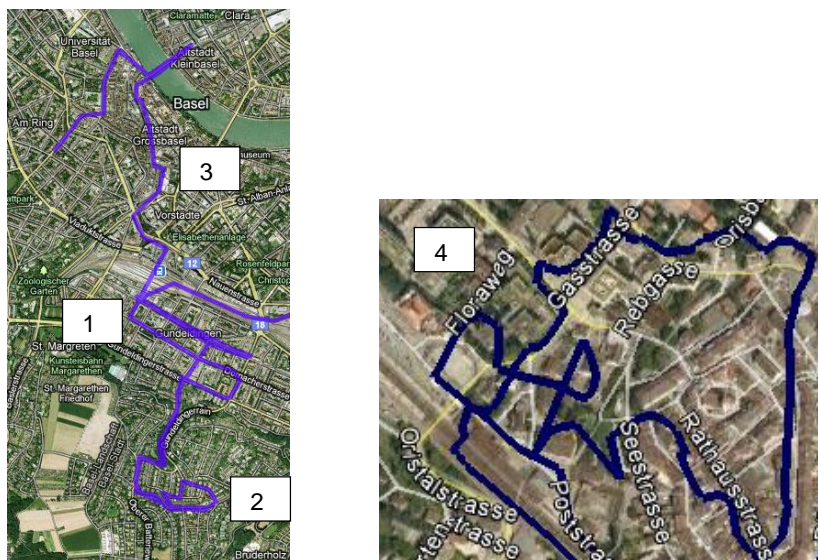


Abbildung 5: Messpfade in Basel (links) und Liestal (rechts).

Zwischen April 2011 und März 2012 wurden in der gleichen Art Messungen in Ghent (jeweils mittwochs) und Brüssel (jeweils donnerstags), vorzugsweise in der dritten Woche des Monats, durchgeführt. Dabei wurden mit zwei Ausnahmen die gleichen Typen von Mikroumgebungen eingeschlossen: In Belgien wurden keine Messungen in S-Bahn Zügen durchgeführt, sondern lediglich Messungen in Interregional-Zügen. Zudem existiert in Brüssel kein Tram-Netz, aus diesem Grunde wurden stattdessen Messungen in der unterirdischen Metro durchgeführt.

In einer weiteren Messkampagne, im Folgenden als Vertiefungsmessung bezeichnet, wurden zwischen November 2010 und Januar 2011 alle zwei Wochen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen (jeweils mittwochs und donnerstags) in fünf verschiedenen Quartieren in Basel und Amsterdam Messungen entlang definierter Pfade durchgeführt (Tabelle 5). In Basel wurden diese Pfad-Messungen ein Jahr später in der gleichen Zeitspanne wiederholt. Dabei wurde die zeitliche Abfolge der Messungen in den Quartieren von Messtag zu Messtag um eine Position rotiert, so dass jedes Quartier zu verschiedenen Tageszeiten gemessen wurde. Im Gegensatz zu der Langzeitmessung wurde das Exposimeter bei dieser Erhebung in einem Meter Abstand zum Körper und in einer Höhe von rund einem Meter positioniert, um eine mögliche Körperabschirmung zu vermeiden. Wie bei der Langzeitmessung wurde sichergestellt, dass bei der Messung kein eingeschaltetes Mobiltelefon mitgetragen wurde.

Tabelle 5: Messgebiete der Vertiefungsmessung.

Typ der Mikro- umgebung	Nummer	Quartier in Basel	Quartier in Amsterdam
Dezentrales Wohngebiet 1	1	Im Langen Loh	Sloterplas
Dezentrales Wohngebiet 2	2	Byfangweg	Plesmanlaan
Zentrales Wohngebiet	3	Gundeldingen	Albert Cuyppstraat
Stadtzentrum	4	Barfüsserplatz/Marktplatz/ Rheingasse	Leidseplein
Geschäfts- und Messegebiet	5	Messeplatz	Zuidas

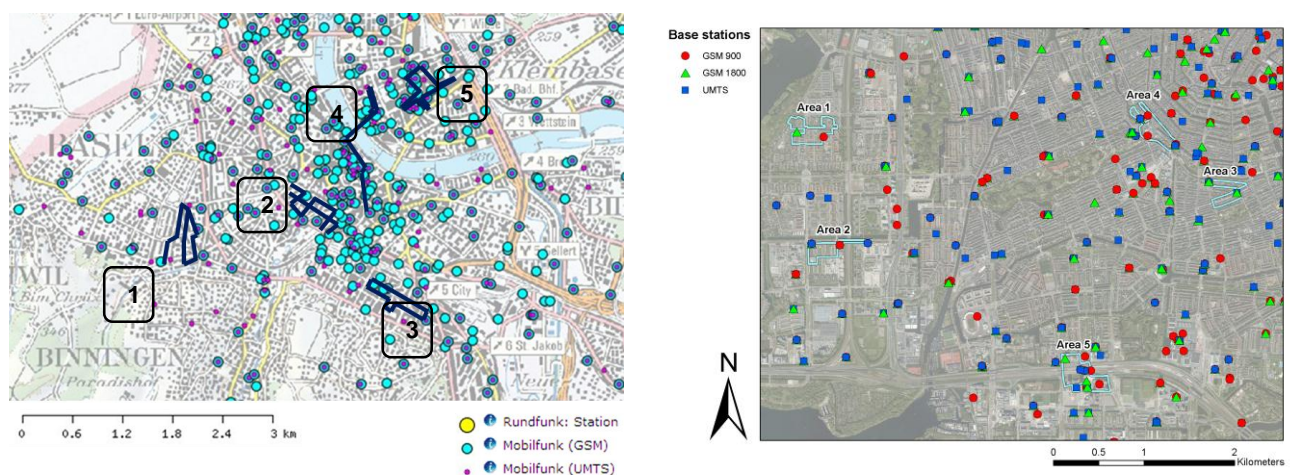


Abbildung 6: Übersicht der berücksichtigten Quartiere in Basel (links) und Amsterdam (rechts) in der Vertiefungsmessung.

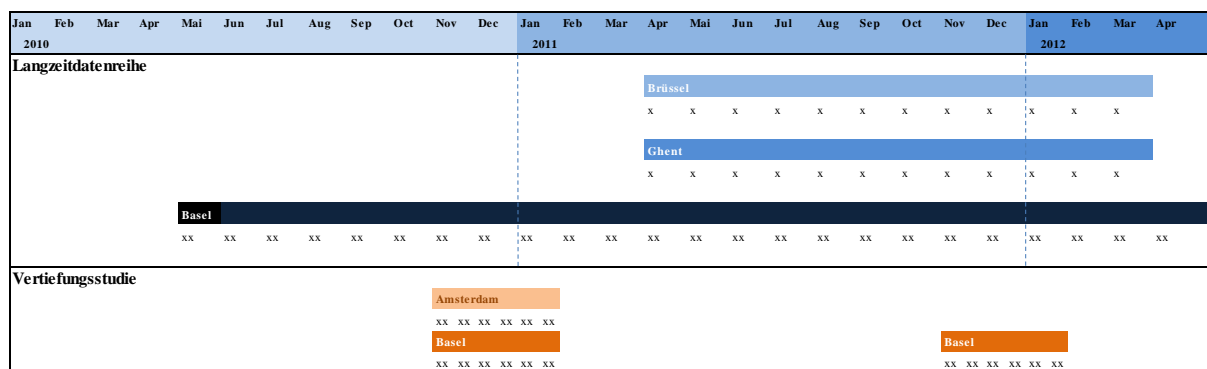


Abbildung 7: Überblick über die Messungen des Basel Monitorings (Jeder Messtag ist mit einem „X“ bezeichnet.)

Tabelle 6: Überblick über die Monitoring Messungen in Basel

Erhebung	Studientyp	Messgerät	Zeitraum	Daten	Bemerkungen
Langzeitmessungen	Pfadmessung	EME SPY 120 (Messintervall: 4s) EMDEX (Messintervall: 3s)	Mai 2010-April 2012	Aussenplätze, Innenräume und öffentliche Verkehrsmittel (siehe Tabelle 4) in Basel, Gent und Brüssel (10-50 min pro Mikroumgebung)	In Ghent und Brüssel erst ab April 2011 bis März 2012
Vertiefungsmessungen	Pfadmessung	EME SPY 120 (Messintervall: 4s)	Nov 2010-Jan 2011 (15-30 Min pro Mikroumgebung)	Nur an Aussenplätzen: städtische Wohngebiete (3), Stadtzentrum, Messegebiet, in Basel und Amsterdam (15-30 Min pro Mikroumgebung)	In Basel Messungen wiederholt zwischen November 2011 und Januar 2012. In Amsterdam wurden die Messungen mit dem Exposimeter EME Spy 140 durchgeführt.

Daten aus dem Basler Monitoring sind in folgenden Artikeln publiziert: Beekhuizen et al. (2013), Urbinello et al. (2014a), Urbinello et al. (2014a), Urbinello et al. (2014b) und Rösli et al. (2014).

3.2.3 TransExpo

Im Rahmen des internationalen TransExpo Projekts wurde in der Schweiz die Durchführbarkeit einer Studie zu Kinderleukämie in Zusammenhang mit der Exposition durch niederfrequente magnetische Felder von Transformatoren in Gebäuden untersucht. In Zürich wurde in Zusammenarbeit mit dem Zürcher Elektrizitätswerk EWZ in 18 Wohnhäusern mit

eingebauten Transformatoren die Exposition durch NF-MF in verschiedenen Wohnungen des Gebäudes untersucht (z.B. Wohnungen direkt neben/über Transformatoren im Vergleich zu Wohnungen weiter entfernt vom Transformator, aber im selben Gebäude). Als Messgeräte dienten 10 EMDEX II Geräte, wobei bei einer Messung jeweils mit 5 bis 6 Geräten in einer Wohnung während ungefähr 10 Minuten gleichzeitig gemessen wurde. Vier Geräte wurden in den Ecken der Räume jeweils einen Meter von der Wand entfernt auf einer Plastikröhre in 50 cm Höhe ab Boden platziert. Zusätzlich wurde in der Mitte des Raumes eine Messung in 50 cm Höhe durchgeführt und im Schlafzimmer wurde jeweils ein sechstes Gerät in der Mitte des Bettes platziert. Von allen Geräten wurde jeweils der Mittelwert pro Raum berechnet und der Wohnungsmittelwert wurde aus den Mittelwerten aller gemessenen Räume abgeleitet (Küche, Wohnzimmer, Schlafzimmer, Büros und Arbeitszimmer). Zusätzlich wurde ein Messgerät während 24 Stunden im Transformatorenraum deponiert.

Tabelle 7: Überblick über die TransExpo Messungen

Name	Studientyp	Messgerät	Zeitraum	Datenset	Bemerkungen
Transexpo	Punktmessungen in Wohnungen	EMDEX II (Messintervall 3 s)	Apr. – Aug. 2009	Daten von allen Wohnräumen von 18 Wohnhäusern mit Transformatoren in Zürich	Messdauer pro Raum ca. 10 Min an 5-6 Messpunkten

Daten aus dem Schweizer Teil von Transexpo sind in Röögli et al. (2011) publiziert.

3.2.4 ARIMMORA

Im Rahmen der EU Studie ARIMMORA (Advanced Research on Interaction Mechanisms of electromagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment, <http://arimmora-fp7.eu/>) wurde mit Hilfe von EMDEX II Geräten die Magnetfeldexposition von Kindern (6 -12 Jahre) in der Schweiz und in Italien gemessen. Es wurden sowohl personenbezogene Messungen (24-72 h) als auch stationäre Messungen im Schlafzimmer (ca. 24 h) durchgeführt. Ziel der Studie war es, die Kenntnisse über die Magnetfeldexposition von Kindern zu verbessern. In beiden Ländern wurden jeweils drei Gruppen à je 25 Kinder untersucht. Die erste Gruppe umfasste Kinder, die näher als 200 m von einer Hochspannungsleitung entfernt wohnen oder zur Schule gehen. Zur zweiten Gruppe gehörten Kinder, die in einem Haus mit einem Transformator wohnen. Die dritte Gruppe war eine Vergleichsgruppe mit Kindern, bei denen keines der obigen Charakteristika zutraf. Um allfällige saisonale Unterschiede zu erfassen, wurde wenn möglich bei jedem Teilnehmer zwei Mal gemessen; in der warmen und in der kalten Jahreszeit (definiert nach dem Zeitpunkt der Umstellung auf Sommer- bzw. Winterzeit).

Tabelle 8: Überblick über die Arimmora Messungen

Name	Studientyp	Messgerät	Zeitraum	Datenset	Bemerkungen
Arimmora	personenbezogen	EMDEX II	Apr. 2012 - Dez. 2013	Messungen von 172 Studienteilnehmern, davon 159 mit Messungen in beiden Jahreszeiten	Messdauer pro Teilnehmer 24 - 72h
Arimmora	Schlafzimmer- messungen	EMDEX II	Apr. 2012 - Dez. 2013	Messungen von 155 Studienteilnehmern, davon 88 in beiden Jahreszeiten	Messdauer pro Teilnehmer: 24h

Daten aus Arimmora sind in Rösli et al. (2014) publiziert.

3.2.5 HERMES

Im Rahmen der HERMES-Studie (Health Effects Related to Mobile Phone use in AdolescentS) wird der Einfluss der NIS-Exposition auf Verhalten, Kognition, Emotion und Gesundheit von Jugendlichen untersucht. In einer ersten Phase wurden im Jahr 2012 rund 400 Schüler im 7. und 8. Schuljahr von Innerschweizer Schulen rekrutiert. Neben der Durchführung von kognitiven Tests und dem Ausfüllen von Gesundheitsfragebogen hat eine Stichprobe von 100 Jugendlichen an personenbezogenen HF-EMF Messungen teilgenommen. Dabei trugen die Teilnehmenden im Alltag während ca. 72 Stunden das EXPOM (1. Geräteversion) mit sich und füllten ein Aktivitätstagebuch aus. Bei den Schulbesuchen wurde jeweils mit einem EME SPY eine Punktmessung im Schulzimmer durchgeführt (ca. 20 - 120 Minuten).

Tabelle 9: Überblick über die Hermes Messungen

Name	Studientyp	Messgerät	Zeitraum	Datenset	Bemerkungen
HERMES	Schulhaus- messungen	EME SPY 120 (Messintervall: 4 s)	Mai 2013- Apr. 2014	Punktmessungen im Schulzimmer während 20-120 Minuten	Messgerät während der Messung nicht verschoben

3.2.6 Weitere Studien im Ausland

Im Ausland wurde eine Reihe von weiteren Messstudien durchgeführt, deren Resultate im Kapitel 5 für die Beantwortung von spezifischen methodischen Fragen herangezogen werden (Tabelle 10). Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über diese Studien gegeben.

In Frankreich wurden 398 Personen aus Besançon und Lyon eingeladen, während 24 Stunden an einer personenbezogenen Messstudie mit Aktivitätstagebuch teilzunehmen (Viel et al. 2009a, Viel et al. 2009b). Es wurden gezielt Personen aus der Stadt, der

Agglomeration und aus ländlichen Gebieten rekrutiert. Die Auswahl der Probanden erfolgte zufällig aus einer Liste von einer Bauerngesundheitsversicherung (ländliche Probanden), aus der Angestelltenliste von Gemeinden (Stadt und Agglomeration Besançon) oder unter Universitätsspitalangestellten (Stadt und Agglomeration Lyon). Zusätzlich wurden 34 Probanden angefragt, das Messgerät während einer Woche statt nur 24 Stunden zu tragen (Viel et al. 2011).

An einer ungarischen personenbezogenen Exposimeterstudie beteiligten sich 21 Probanden (Thuróczy et al. 2008). Die meisten waren Angestellte des Forschungsinstituts des Autors. Die Probanden trugen das Exposimeter während 24 Stunden und füllten ein Aktivitätstagebuch aus. Bei der Auswertung wurden der Anteil von Messwerten oberhalb der Nachweisgrenze (0.05 V/m) angegeben. Mittelwerte für alle Messwerte oberhalb der Nachweisgrenze wurden ebenfalls berechnet, sind aber nicht aussagekräftig, da das Weglassen der tiefen Messwerte zu einer systematischen Überschätzung der Exposition führt. In einer Nachfolgeuntersuchung wurden personenbezogene Messungen während 24 Stunden bei 31 Primarschullehrern, bei 50 Kindergärtnerinnen und bei 51 Büroangestellten durchgeführt (Juhasz et al. 2011).

In einer holländischen Studie wurden 3000 zufällig ausgewählte Probanden eingeladen, an einer Exposimeterstudie teilzunehmen (Bolte und Eikelboom 2012). Von den 909 Personen, die zusagten, wurden 140 Personen berücksichtigt, was in 98 analysierbaren 24h Datensätzen resultierte. Die Messgeräte wurden von den Forschenden nochmals kalibriert und die Messwerte mit diesen Kalibrationsfaktoren zusätzlich korrigiert. Die Faktoren lagen je nach Band zwischen 0.82-1.71 auf die elektrische Feldstärke bezogen (Bolte et al. 2011). Insgesamt wurden 39 verschiedene Aktivitäten erhoben (z.B. Schlafen, Staubsaugen, Einkaufen, Kirchenbesuch, Velo oder Zug Fahren). Die Probanden trugen auch ein GPS mit sich, dessen Daten in erster Linie für die Plausibilitätskontrolle der Aktivitätstagebucheinträge verwendet wurden.

Im Rahmen einer deutschen epidemiologischen Studie wurden in 1384 Haushalten zwischen März und August 2006 Messungen mit einem EME SPY 120 durchgeführt (Breckenkamp et al. 2012). Es wurde jeweils während 5 Minuten an vier verschiedenen Positionen in der Nähe des Bettkissens gemessen. Pro Haushalt und Frequenzband wurden 280 Messpunkte gesammelt.

Tabelle 10: Überblick über Messstudien aus dem Ausland.

Referenz	Studientyp	Messgerät	Zeitraum	Datenset	Bemerkungen
Viel et al. (2009a), (Viel et al. 2009b)	Personenbezogen mit Aktivitätstagebuch	EME SPY 120, Messintervall 13 s	Dez. 2005-Sept 2006	24h Messungen von 377 Personen (ca. 6500 Messwerte pro Person)	Personen aus der Stadt und Agglomeration sind Angestellte von Gemeinden und Universitätsspital. Ländliche Studienteilnehmende: „Agricultural Health Insurance plan roll“
Viel et al. (2011)	personenbezogen mit Aktivitätstagebuch	EME SPY 120, Messintervall 91s	Dez. 2005-Sept 2006	Messungen von 34 Personen während einer Woche (ca. 7000 Messwerte pro Person)	dito
Thuróczy et al. (2008)	personenbezogen mit Aktivitätstagebuch	Antennessa DSP-090, Messintervall 15s	Jun.-Jul 2005	24 h Messungen von 21 Probanden (ca. 6000 Messwerte pro Person)	nur Anteil der Messungen oberhalb der Nachweisgrenze
Bolte und Eikelboom (2012)	personenbezogen mit Aktivitätstagebuch	EME SPY 121, Messintervall 10 s	Ab 2009 Probanden selektiert	24 h Messungen von 98 Probanden (ca 12'000 Messpunkte pro Person)	
Breckenkamp et al. (2012)	Punktmessungen im Schlafzimmer	EME SPY 120, Messintervall: 4s	2006	20 Minuten pro Schlafzimmer von 1384 Haushalten (280 Messpunkte pro Person)	
Markakis und Samaras (2013)	Punktmessung in Innenräumen	EME SPY 121 und Narda SRM-3000	2010-2012	40 Innenräume in Thessaloniki: Schlafzimmer, Wohnzimmer, Büros, Schulen	Messgerät jeweils beim lokalen Feldstärke-Maximum innerhalb des Raumes aufgestellt.
(Tomitsch et al. 2010), Tomitsch und Dechant (2012)	Kurzzeitmessungen in Schlafzimmern: statisch, NF, IF, und HF-EMF	Spektrum Analysator (MT8220A, Anritsu, Morgan Hill, CA)	2006 und 2009	226 Wohnungen	Follow-up in 130 identischen Wohnungen und 83 Probanden die gezügelt haben (neue Wohnungen)
Estenberg und Augustsson (2014)	Mobiles Messsystem auf Auto	FSL 6; Rohde und Schwarz, München, D	2012	8 Gemeinden/Städte	

Zwischen Juli 2010 und Januar 2012 wurden in Thessaloniki in 40 Innenräumen während 3 Tagen Messungen mit einem EME SPY 121 sowie eine Punktmessung mit einem NARDA SRM-3000 (Markakis und Samaras 2013) durchgeführt. Dabei wurde jeweils mit der Schwenkmethode mit einem Breitbandgerät das lokale Maximum im Raum gesucht und das Exposimeter dort platziert. Die frequenzspezifischen Messungen wurden jeweils an 11 Punkten im Raum durchgeführt (beim örtlichen Maximum, in der Raummitte, bei den Fenstern jeweils auf verschiedenen Höhen: 1.1, 1.5. und 1.7 m). Es wurde sowohl die zeitliche Variabilität wie auch die Quellenzusammensetzung analysiert. In einer weiteren Publikation wurden 26 Innenraummessungen in Griechenland mit 29 Messungen in Belgien verglichen (Vermeeren et al. 2013). Wahrscheinlich handelt es sich dabei um die oben genannten griechischen Messungen. Es wurde jeweils das Raummaximum berücksichtigt.

In einer österreichischen Studie wurden 226 Teilnehmende aus sogenannten „Gesunden Gemeinden“ für eine EMF Messstudie ausgewählt (Tomitsch et al. 2010, Tomitsch und Dechant 2012). Diese „Gesunden Gemeinden“ haben zum Ziel, Ernährung sowie Umweltsanliegen zu berücksichtigen. 154 Haushalte stammten aus ländlichen Gebieten, 56 aus kleineren Städten (<10'000 Einwohner) und 16 aus grösseren Städten. Die Messungen wurden 2006 durchgeführt und im Jahr 2009 bei den gleichen Probanden wiederholt, was dazu führte, dass 130 Messungen in den gleichen Wohnungen durchgeführt wurden und 83 in anderen Wohnungen bei Probanden, die in der Zwischenzeit umgezogen waren. Das elektrostatische Feld wurde mit einem EFM022 von Kleinwächter (Deutschland) gemessen. Niederfrequente Felder mit 3D-EFM, ROM elektronik Deisenhausen, der Zwischenfrequenzbereich mit ME3851A, Gigahertz Solutions, Langenzenn und HF-EMF mit dem Spektrum Analysator MT8220A, Anritsu, Morgan Hill. Für NF- und HF-EMF wurde je eine Kurzzeitmessungen in der oberen Hälfte des Betts am Tag durchgeführt, sowie während der Nacht (22:00-6:00) unter dem Bett. HF-EMF wurde mit der Schwenkmethode im Max-Hold Modus gemessen, um das örtliche Maximum zu registrieren.

In Schweden wurde ein Messsystem für HF-EMF (30 MHz-3 GHz) auf ein Auto montiert und damit ländliche und städtische Gebiete während des Tages zwischen 8:00-18:30 abgefahren (Esterberg und Augustsson 2014). Damit ist es gelungen, innerhalb von einem Tag das gesamte Strassennetz einer Kleinstadt (115km) abzufahren. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass ein grosses Gebiet abgedeckt werden kann. Jedoch ist es nicht geeignet für Messungen in Fussgängerzonen, Bahnhöfen, Parks oder anderen nicht mit Strassen erschlossenen Gebieten. Entsprechend wird wohl der Beitrag von Mobilfunk-Uplink oder W-LAN im Alltag nicht erhoben werden können.

3.3 Pilotmessungen 2014

3.3.1 Ziele und allgemeine Überlegungen

Mit zusätzlichen Messungen im Jahr 2014 in verschiedenen Gemeinden in der Schweiz wurden bestehende Wissenslücken geschlossen. Einerseits soll mit diesen Messungen das Wissen über die Variabilität der Exposition innerhalb einer Mikroumgebung (entlang eines Messpfades zu unterschiedlichen Zeiten) sowie innerhalb von verschiedenen Mikroumgebungen desselben Typs (z. B. verschiedene Wohngebiete desselben Typs in der gleichen Gemeinde; Wohngebiete desselben Typs in verschiedenen Gemeinden) erhöht werden. Andererseits soll gleichzeitig ein mögliches Vorgehen bei einem zukünftigen Monitoring getestet werden. Die Pilotmessungen fanden zwischen März und Juli 2014 statt. Diese Messkampagne wird im Folgenden als „Pilot 2014“ bezeichnet.

Für die Sicherstellung der räumlichen Repräsentativität der Messungen wurde auf anerkannte Schweizerische Gemeindetypologien abgestützt. In der Schweiz wurden zwei verschiedene Typologien entwickelt, die beide häufig verwendet werden. Eine vom Bundesamt für Statistik (BfS) vor rund 20 Jahren entwickelte Gemeindetypologie verwendet Variablen im Zusammenhang mit der Beschäftigung (Pendlerbewegungen, Verhältnis Beschäftigte/Erwerbspersonen, Wirtschaftssektor), der Bebauung (Baudichte), dem Steuerertrag (Ertrag der direkten Bundessteuer), dem Tourismus (Logiernächte), der Bevölkerungsstruktur sowie den Zentrumsfunktionen (siehe Abbildung 8). Daraus abgeleitet und kombiniert mit den Grossregionen und der Agglomerationsdefinition 2000 wurde die Gemeindetypologie des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE) gebildet (Abbildung 9). Sie umfasst die folgenden 9 Gemeindetypen: Grosszentren, Nebenzentren der Grosszentren, Gürtel der Grosszentren, Mittelzentren, Gürtel der Mittelzentren, Kleinzentren, periurbane ländliche Gemeinden, Agrargemeinden und touristische Gemeinden.

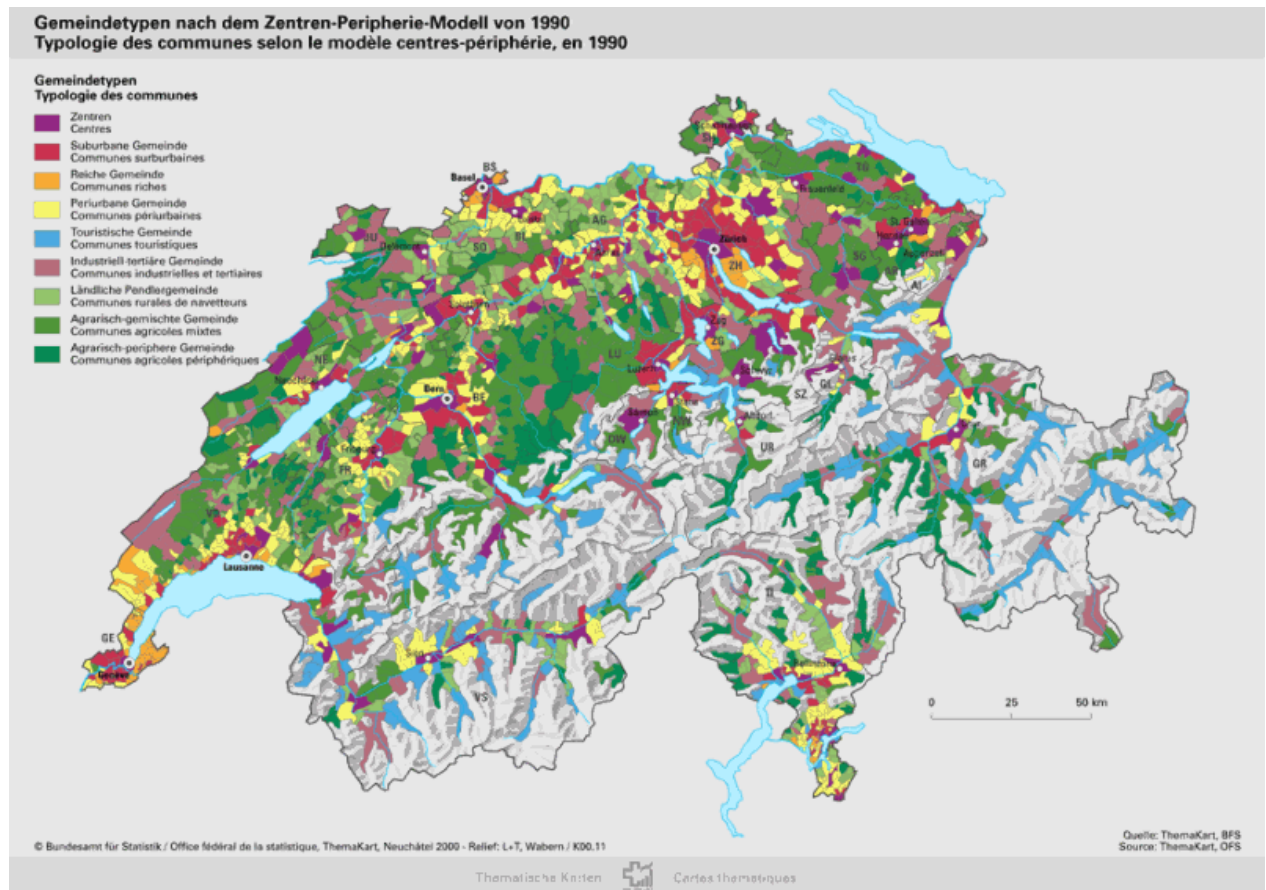


Abbildung 8: Überblick über die neun BfS Gemeindetypologien in der Schweiz (http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/regionen/11/geo/raeumliche_typologien/01.html)

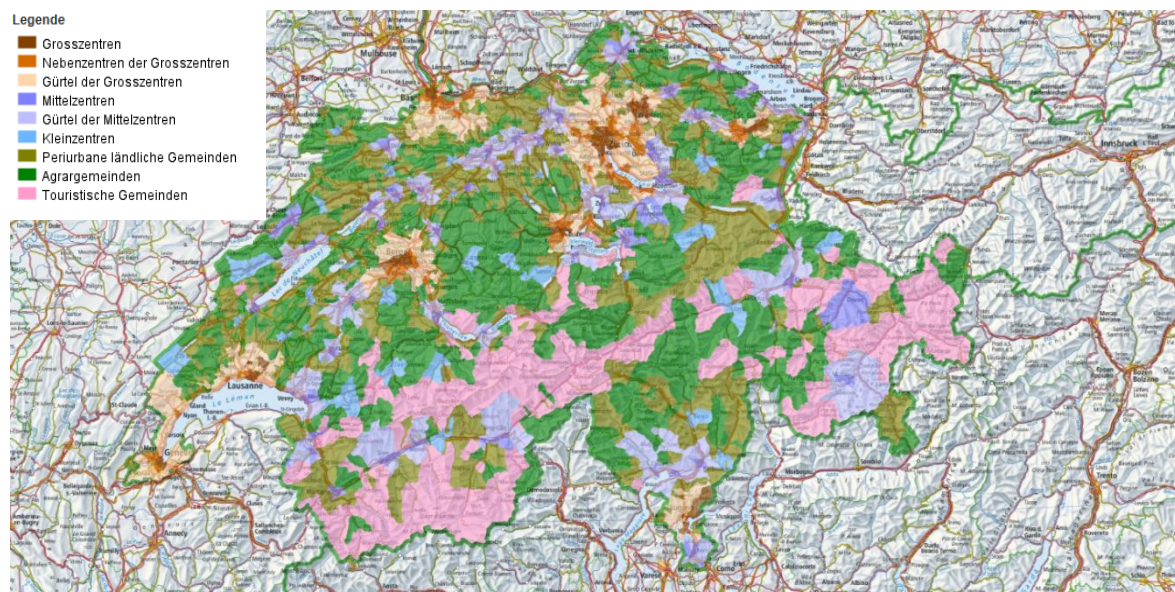


Abbildung 9: Überblick über die neun ARE Gemeindetypologien in der Schweiz (<http://www.geo.admin.ch/internet/geoportal/de/home/vis.html>)

Für die Auswahl der Gemeinden für den Pilot 2014 haben wir uns auf die ARE Gemeindetypologie abgestützt. Die Messungen wurden so geplant, dass die neun Haupttypen und alle drei Landesteile vertreten waren (siehe Tabelle 11). In den ausgewählten Gemeinden wurden jeweils 2-4 verschiedene Typen von Mikroumgebungen, repräsentiert durch je ein Quartier, ausgewählt. Das beinhaltete:

- *Wohngebiete*: unterteilt in *zentrale städtische Wohngebiete*, *dezentrale städtische Wohngebiete* und *ländliche Wohngebiete*,
- *Stadt- und Dorfzentren*,
- *Industriegebiete*.

Insgesamt wurden 51 Mikroumgebungen ausgewählt. Zusätzlich haben wir darauf geachtet, dass auch Messgebiete mit Hochspannungsleitungen und Bahnleitungen berücksichtigt waren. Messungen während der Anreise in den verschiedenen Verkehrsmitteln Zug, Tram und Bus wurden den jeweiligen Verkehrsmitteln zugeordnet.

Tabelle 11: Überblick über die ausgewählten Gemeinden und ihre Klassierung

Gemeinden	Gemeindetypologie ARE	Gemeindetypologie BFS
Lugano Bioggio	Grosszentren Gürtel der Grosszentren	Zentren Suburbane Gemeinden
Aarau Gränichen	Mittelzentren Gürtel der Mittelzentren	Zentren periurbane Gemeinden
Münchenstein Seewen	Nebenzentren der Grosszentren periurbane ländliche Gemeinden	Suburbane Gemeinden Ländliche Pendlergemeinden
Zürich Dübendorf	Grosszentren Nebenzentren der Grosszentren	Zentren Suburbane Gemeinden
Zweisimmen Gstaad (Saanen)	Kleinzentren Touristische Gemeinden	Industrielle und tertiäre Gemeinden Touristische Gemeinden
Neuchâtel St-Blaise	Mittelzentren Gürtel der Mittelzentren	Zentren periurbane Gemeinden
Lausanne Pully	Grosszentren Nebenzentren der Grosszentren	Zentren Suburbane Gemeinden
Rümlang Frick	Gürtel der Grosszentren periurbane ländliche Gemeinden	Suburbane Gemeinden Industrielle und tertiäre Gemeinden
Wattwil Nesslau-Neu St. Johann	Einzelzentren Agrargemeinden	Zentren Agrarische Gemeinden
Brienz Lungern	Touristische Gemeinden Agrargemeinden	Touristische Gemeinden Agrar-Gemischte Gemeinden

3.3.2 Messprozedur

Die Messungen im Pilot 2014 wurden vom 25. März bis 11. Juli 2014 durchgeführt. In jeder Mikroumgebung wurden zwei möglichst nicht überlappende aber bevorzugt überkreuzende Pfade definiert. Ein Messpfad hatte eine Länge von etwa einem Kilometer, so dass für das Abmarschieren ungefähr 15 Minuten benötigt wurde. Die Messstrecken wurden in Karten eingezeichnet und der zu messenden Person übergeben. Die Person wurde angewiesen, die rechte Strassenseite zu benutzen. An einem Messtag wurden beide Pfade nacheinander begangen und in jeder Mikroumgebung wurde an zwei verschiedenen Werktagen gemessen. In einer programmierten Applikation auf einem im Flugmodus betriebenen Mobiltelefon wurde jeweils eingetragen, wann der Messpfad betreten wurde und wann er wieder verlassen wurde. In einigen Gemeinden (Aarau, Lausanne und Pully) wurden zusätzlich Messungen am Wochenende durchgeführt. Mit dem im EXPOM3 integrierten GPS wurden für jeden Messwert die Koordinaten aufgezeichnet. Die Messungen im März und April wurden von einer anderen Person durchgeführt als die Messungen danach. Das hatte zur Folge, dass die meisten Mikroumgebungen von zwei unterschiedlichen Personen gemessen wurden. Diese Prozedur führte zu einer gewissen Variabilität in der Routenwahl, die durchaus beabsichtigt war, um die Sensitivität der Ergebnisse auf die exakte Einhaltung des vorgegebenen Messpfades evaluieren zu können.

Es wurden drei verschiedene Messgeräte verwendet: EXPOM3, EME SPY 140 für HF-EMF Messungen und ein EMDEX für niederfrequente Messungen. Die Messgeräte wurden zuoberst in einem grossen mit Isoliermaterial gefüllten Rucksack deponiert (Abbildung 10). Sie befanden sich damit etwas unterhalb des Kopfes rund 30-50 cm vom Kopf entfernt. Damit ist die Körperabschirmung minimiert und dennoch die Beweglichkeit gewährleistet.

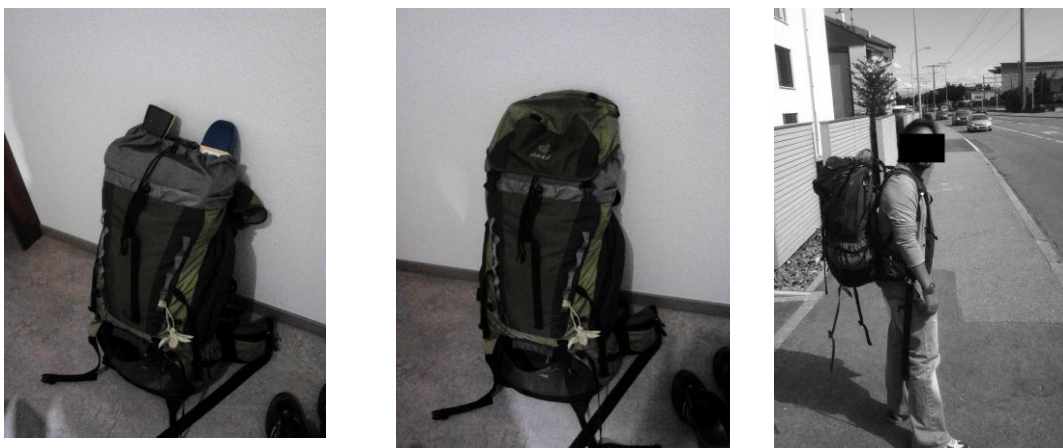


Abbildung 10: Abbildung der Messeinrichtung.

3.3.3 Datenanalyse

Alle Messdaten wurden visuell auf Plausibilität überprüft. Anschliessend wurden beim EXPOM3 für jeden Messpunkt die Up- und Downlinkbänder 800, 900, 1800, 1900 und 2600 summiert, und als Up- und Downlinkbänder des Mobilfunks zusammengefasst. Analog wurde bei den beiden Rundfunkbändern UKW und DVB-T vorgegangen. Das totale HF-EMF wurde durch die Summierung aller gemessenen Bänder ausser Wimax berechnet. Dabei wurde bei den EXPOM3 Messungen für DECT und W-LAN5 vorgängig die in Kapitel 4.4 beschriebene Korrektur für Abweichungen infolge Cross-Talks durchgeführt.

Je nach Ziel der Auswertung wurde pro Messpfad oder pro Mikroumgebung der arithmetische und geometrische Mittelwert aller erhobenen Messwerte von einem Messtag bzw. von beiden Messtagen zusammen berechnet. Der arithmetische Mittelwert wurde gewählt, weil er die kumulative Exposition widerspiegelt, die typischerweise in epidemiologischen Studien als biologisch relevant angenommen wird, wenn der Wirkungsmechanismus nicht bekannt ist. Der geometrische Mittelwert ist hingegen aus statistischer Sicht bei schief verteilten Daten, wie sie hier vorliegen, vorzuziehen.

Ein substantieller Anteil der Messungen liegen unterhalb der Nachweisgrenze des EME SPY 140 (siehe Tabelle 1) und des EXPOM3 (Tabelle 2). Der adäquate Umgang mit solchen Messwerten bei der Mittelwertbildung wurde in früheren Studien vertieft untersucht (Röösli et al. 2008). Es hat sich gezeigt, dass die statistische Verteilung der Werte unter der Nachweisgrenze mittels der robusten ROS („regression on order statistics“) Methode (Röösli et al. 2008) geschätzt werden kann und bei der Mittelwertbildung berücksichtigt werden kann. Dieses Verfahren wurde für die Messwerte des EME SPY 140 angewendet. Beim EXPOM3 werden Messungen unterhalb der Nachweisgrenze auch ausgewiesen, obwohl sie relativ gesehen, ungenauer sind. Jedoch ist der tiefste noch angezeigte Wert, je nach Gerätetyp unterschiedlich und hängt von den Kalibrationsfaktoren ab. Vertiefte Analysen mit Messungen von zehn verschiedenen Geräten zeigten, dass alle Geräte im Bereich zwischen halber Nachweisgrenze (in V/m) und der Nachweisgrenze Messwerte ausweisen. Darunter ist das je nach Gerät und Frequenzband nicht immer der Fall. Darum wurde für die Mittelwertbildung die halbe Nachweisgrenze als Messgrenze verwendet. Messwerte darunter wurden angehoben damit nicht ein systematischer Fehler zwischen den Messgeräten eingeführt wird. Ausser beim W-LAN5 (0.025 V/m) ist diese Messgrenze sehr klein. Für den arithmetischen Mittelwert spielt es darum kaum eine Rolle wie hoch sie gesetzt wird. Auf den geometrischen Mittelwert kann es einen Einfluss haben, wenn die Exposition im entsprechen Frequenzband sehr tief ist.

Es wurden deskriptive Auswertungen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt der Analyse auf die Datenverteilung und den Vergleich der Mittelwerte zwischen verschiedenen Mikroumgebungen desselben Typs oder den Vergleich der Mittelwerte an verschiedenen Messtagen innerhalb der gleichen Mikroumgebung gelegt wurde. Grundlage dieser Analysen waren die Mittelwerte pro Pfad oder Mikroumgebung. Diese Mittelwerte wurden jeweils aus allen verfügbaren Messwerten im entsprechenden Messintervall berechnet. Für die Summenbänder (Uplink, Downlink, Rundfunk, total HF-EMF) wurden jeweils die bandspezifischen Pfad- bzw. Mikroumgebungs-Mittelwerte addiert. Wo im Bericht nicht anders indiziert, wurden alle Auswertungen in Einheiten der Leistungsflussdichte durchgeführt (mW/m^2) und die Ergebnisse in die elektrische Feldstärke (V/m) zurücktransformiert. Um den Einfluss von geographischen Variablen auf die Exposition zu untersuchen, wurden multiple lineare Regressionsanalysen durchgeführt, bei wiederholten Messungen auch hierarchische Regressionsmodelle („mixed linear models“). Als Einflussfaktoren wurden die CORINE („*Coordination of Information on the Environment*“) Landnutzungsdaten der EU verwendet (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>). Dabei wird die gesamte Landschaft in 44 Klassen eingeteilt in einer Auflösung von 100×100 m bzw. 250×250 m. Wir haben für die ausgewählten Mikroumgebungen evaluiert, wie gross der Anteil an Flächen mit hoher Bevölkerungsdichte (HDRES), tiefer Bevölkerungsdichte (LDRES), Industrie und Naturgebieten war. Weiter wurde je eine Variable gebildet, die angibt, ob die gemessene Mikroumgebung von einer Hochspannungsleitung, Tram- oder Zugsfahrleitung tangiert oder durchquert wird, wobei EMDEX II Geräte nur EMF von Hochspannungsleitungen (50 Hz) messen, nicht aber Gleichstrom von Tramfahrleitungen oder 16.7 Hz Felder von Zugsfahrleitungen. Für jede Mikroumgebung wurde die mittlere Anzahl Geschosse bestimmt. Anhand der online verfügbaren Information vom Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) wurde für jede Mikroumgebung die Dichte von Mobilfunkantennen für jedes Frequenzband und Stärkeklasse berechnet.

3.3.4 Überblick über die Messungen im Pilot 2014

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messungen im Jahr 2014. In den 51 ausgewählten Mikroumgebungen wurden 102 Messpfade festgelegt, von denen alle einmal und 92 ein zweites Mal gemessen werden konnten. Dies ergibt insgesamt 194 Pfadmessungen. Ausfälle ergaben sich aufgrund von wetterbedingten oder technischen Messabbrüchen, wobei beim EME SPY Messausfälle aufgrund von Problemen mit der Batterie relativ häufig waren.

Tabelle 12: Überblick über die im Pilot 2014 durchgeführten Messungen und deren Vollständigkeit (x=vollständig, Zahlenwerte geben den prozentualen Anteil erfolgreicher Messungen, d.h. bei 0% wurden keine Messwerte registriert, NA=Messung geplant, aber wetterbedingte Messausfälle.)
Legende für Typen von Mikroumgebungen: ccen=Stadtzentrum, cres=zentrales städtisches Wohngebiet, non=dezentrales städtisches Wohngebiet, cen=Dorfzentrum, res=ländliches Wohngebiet und ind=Industriegebiet

Gemeinde	Mess- nummer	Mikro- umgebung	Pfad- nummer	Datum	Zeit	Expom	EME SPY	EMDEX
Muenchenstein	1	cen	1	25.03.2014	11:48-12:07	x	x	x
Muenchenstein	1	cen	2	25.03.2014	12:41-12:57	x	x	x
Muenchenstein	1	res	1	25.03.2014	12:12-12:25	x	x	x
Muenchenstein	1	res	2	25.03.2014	12:25-12:39	x	x	x
Muenchenstein	2	cen	1	08.07.2014	12:29-12:43	x	x	x
Muenchenstein	2	cen	2	08.07.2014	13:15-13:30	x	x	x
Muenchenstein	2	res	1	08.07.2014	12:48-13:03	x	x	x
Muenchenstein	2	res	2	08.07.2014	13:04-13:14	x	x	x
Seewen	1	cen	1	25.03.2014	13:39-14:02	x	x	x
Seewen	1	cen	2	25.03.2014	14:02-14:13	x	x	x
Seewen	1	res	1	25.03.2014	14:16-14:32	x	x	x
Seewen	1	res	2	25.03.2014	14:33-14:47	x	x	x
Seewen	2	cen	1	14.05.2014	13:38-14:02	x	0%	0%
Seewen	2	cen	2	14.05.2014	14:03-14:14	x	0%	0%
Seewen	2	res	1	14.05.2014	14:53-15:05	68%	0%	0%
Seewen	2	res	2	14.05.2014	14:31-14:52	x	0%	0%
Zuerich	1	ccen	1	27.03.2014	11:05-11:25	x	72%	x
Zuerich	1	ccen	2	27.03.2014	12:28-12:50	x	77%	x
Zuerich	1	cres	1	27.03.2014	13:02-13:15	x	75%	x
Zuerich	1	cres	2	27.03.2014	13:15-13:29	x	79%	x
Zuerich	1	non	1	02.04.2014	11:54-12:07	x	72%	x
Zuerich	1	non	2	02.04.2014	12:07-12:19	x	76%	x
Zuerich	1	ind	1	02.04.2014	12:42-12:55	x	76%	x
Zuerich	1	ind	2	02.04.2014	12:55-13:09	x	73%	x
Zuerich	2	ccen	1	20.05.2014	13:00-13:25	x	x	x
Zuerich	2	ccen	2	20.05.2014	13:28-14:12	x	x	x
Zuerich	2	cres	1	20.05.2014	14:35-14:45	x	x	x
Zuerich	2	cres	2	20.05.2014	14:45-14:54	x	x	x
Zuerich	2	non	1	20.05.2014	15:50-16:00	x	x	x
Zuerich	2	non	2	20.05.2014	16:00-16:12	x	x	x
Zuerich	2	ind	1	20.05.2014	16:35-16:53	x	x	x
Zuerich	2	ind	2	20.05.2014	16:54-17:07	x	x	x
Duebendorf	1	res	1	02.04.2014	13:43-13:55	x	75%	x
Duebendorf	1	res	2	02.04.2014	13:55-14:06	x	74%	x
Duebendorf	1	ind	1	02.04.2014	14:44-14:57	x	71%	x
Duebendorf	1	ind	2	02.04.2014	14:59-15:12	x	73%	x
Duebendorf	1	cen	1	02.04.2014	15:29-15:41	x	79%	x
Duebendorf	1	cen	2	02.04.2014	15:42-15:55	x	75%	x
Duebendorf	2	res	1	23.05.2014	16:00-16:10	x	x	x
Duebendorf	2	res	2	23.05.2014	16:10-16:21	x	x	x
Duebendorf	2	ind	1	23.05.2014	17:35-17:43	x	x	x
Duebendorf	2	ind	2	23.05.2014	17:22-17:35	x	x	x
Duebendorf	2	cen	1	23.05.2014	16:45-16:59	x	x	x
Duebendorf	2	cen	2	23.05.2014	16:33-16:45	x	x	x
Aarau	1	ccen	1	29.03.2014	10:27-10:40	x	75%	x
Aarau	1	ccen	2	29.03.2014	10:42-11:01	x	76%	x
Aarau	1	cres	1	29.03.2014	11:20-11:36	x	75%	x
Aarau	1	cres	2	29.03.2014	11:04-11:17	x	75%	x
Aarau	1	non	1	10.04.2014	11:47-12:00	x	72%	x
Aarau	1	non	2	10.04.2014	12:00-12:12	x	77%	x
Aarau	1	ind	1	10.04.2014	12:46-12:56	x	70%	x
Aarau	1	ind	2	10.04.2014	12:56-13:04	x	72%	x
Aarau	2	ccen	1	16.05.2014	10:04-10:23	x	x	x
Aarau	2	ccen	2	16.05.2014	10:23-10:40	x	x	x
Aarau	2	cres	1	16.05.2014	10:51-11:05	x	x	x
Aarau	2	cres	2	16.05.2014	11:09-11:24	x	x	x
Aarau	2	non	1	16.05.2014	13:53-14:06	x	x	x
Aarau	2	non	2	16.05.2014	14:06-14:22	x	x	x
Aarau	2	ind	1	16.05.2014	12:40-12:56	x	x	x
Aarau	2	ind	2	16.05.2014	12:29-12:39	x	x	x

Gemeinde	Mess- nummer	Mikro- umgebung	Pfad- nummer	Datum	Zeit	Expom	EME SPY	EMDEX
Granichen	1	cen	1	10.04.2014	13:37-13:50	x	71%	x
Granichen	1	cen	2	10.04.2014	14:30-14:40	x	75%	x
Granichen	1	res	1	10.04.2014	13:53-14:07	x	77%	x
Granichen	1	res	2	10.04.2014	14:18-14:29	x	72%	x
Granichen	2	cen	1	20.05.2014	10:49-11:02	x	x	x
Granichen	2	cen	2	20.05.2014	11:07-11:16	x	x	x
Granichen	2	res	1	20.05.2014	11:21-11:39	x	x	x
Granichen	2	res	2	20.05.2014	11:41-11:57	x	x	x
Ruemlang	1	cen	1	24.04.2014	11:27-11:40	x	74%	x
Ruemlang	1	cen	2	24.04.2014	11:42-11:55	x	72%	x
Ruemlang	1	res	1	24.04.2014	11:58-12:12	x	76%	x
Ruemlang	1	res	2	24.04.2014	12:12-12:26	x	74%	x
Ruemlang	1	ind	1	24.04.2014	12:50-13:03	x	77%	x
Ruemlang	1	ind	2	24.04.2014	13:03-13:17	x	70%	x
Ruemlang	2	cen	1	22.05.2014	13:30-13:47	x	x	x
Ruemlang	2	cen	2	22.05.2014	13:48-13:54	x	x	x
Ruemlang	2	res	1	22.05.2014	13:58-14:05	x	x	x
Ruemlang	2	res	2	22.05.2014	14:05-14:15	x	x	x
Ruemlang	2	ind	1	22.05.2014	-	NA	NA	NA
Ruemlang	2	ind	2	22.05.2014	-	NA	NA	NA
Frick	1	cen	1	24.04.2014	15:01-15:14	x	80%	x
Frick	1	cen	2	24.04.2014	15:14-15:28	x	72%	x
Frick	1	res	1	24.04.2014	15:34-15:48	x	81%	x
Frick	1	res	2	24.04.2014	15:48-16:02	x	73%	x
Frick	1	ind	1	08.07.2014	14:43-14:56	x	x	x
Frick	1	ind	2	08.07.2014	14:56-15:10	x	x	x
Frick	2	cen	1	22.05.2014	16:26-16:41	x	x	x
Frick	2	cen	2	22.05.2014	16:41-17:06	x	x	x
Frick	2	res	1	22.05.2014	17:10-17:21	x	x	x
Frick	2	res	2	22.05.2014	17:21-17:38	x	x	x
Frick	2	ind	1	22.05.2014	17:53-18:09	x	x	x
Frick	2	ind	2	22.05.2014	18:09-18:22	x	x	x
Wattwil	1	cen	1	21.04.2014	14:29-14:44	x	77%	x
Wattwil	1	cen	2	21.04.2014	15:17-15:30	x	78%	x
Wattwil	1	res	1	21.04.2014	14:47-15:00	x	76%	x
Wattwil	1	res	2	21.04.2014	15:00-15:15	x	81%	x
Wattwil	1	ind	1	21.04.2014	-	NA	NA	NA
Wattwil	1	ind	2	21.04.2014	-	NA	NA	NA
Wattwil	2	cen	1	19.06.2014	12:28-12:44	x	0%	x
Wattwil	2	cen	2	19.06.2014	13:08-13:14	x	0%	x
Wattwil	2	res	1	19.06.2014	12:59-13:08	x	0%	x
Wattwil	2	res	2	19.06.2014	12:44-12:59	x	0%	x
Wattwil	2	ind	1	19.06.2014	13:45-13:54	x	0%	x
Wattwil	2	ind	2	19.06.2014	13:55-14:05	x	0%	x
Nesslau	1	cen	1	21.04.2014	12:52-13:04	x	75%	x
Nesslau	1	cen	2	21.04.2014	13:04-13:17	x	80%	x
Nesslau	1	res	1	21.04.2014	13:17-13:31	x	69%	x
Nesslau	1	res	2	21.04.2014	13:32-13:42	x	80%	x
Nesslau	2	cen	1	19.06.2014	15:22-15:44	x	0%	x
Nesslau	2	cen	2	19.06.2014	15:44-16:01	x	0%	x
Nesslau	2	res	1	19.06.2014	-	NA	NA	NA
Nesslau	2	res	2	19.06.2014	-	NA	NA	NA
Brienz	1	cen	1	17.04.2014	15:36-15:51	x	0%	x
Brienz	1	cen	2	17.04.2014	16:24-16:40	x	0%	x
Brienz	1	res	1	17.04.2014	15:53-16:07	x	0%	x
Brienz	1	res	2	17.04.2014	16:07-16:22	x	0%	x
Brienz	2	cen	1	27.05.2014	14:38-15:18	x	0%	x
Brienz	2	cen	2	27.05.2014	15:18-15:29	x	0%	x
Brienz	2	res	1	27.05.2014	-	NA	NA	NA
Brienz	2	res	2	27.05.2014	-	NA	NA	NA
Lungern	1	cen	1	17.04.2014	12:53-13:07	x	0%	x
Lungern	1	cen	2	17.04.2014	13:41-13:56	x	0%	x
Lungern	1	res	1	17.04.2014	13:11-13:24	x	0%	x
Lungern	1	res	2	17.04.2014	13:24-13:37	x	0%	x
Lungern	2	cen	1	27.05.2014	13:03-13:14	x	0%	x
Lungern	2	cen	2	27.05.2014	13:35-13:48	x	0%	x
Lungern	2	res	1	27.05.2014	13:15-13:23	x	0%	x
Lungern	2	res	2	27.05.2014	13:23-13:33	x	0%	x
Zweisimmen	1	cen	1	15.04.2014	15:01-15:13	x	74%	x
Zweisimmen	1	cen	2	15.04.2014	15:13-15:26	x	72%	x
Zweisimmen	1	res	1	15.04.2014	15:30-15:42	x	71%	x
Zweisimmen	1	res	2	15.04.2014	15:42-15:53	x	69%	x
Zweisimmen	2	cen	1	28.05.2014	12:24-12:48	x	x	x
Zweisimmen	2	cen	2	28.05.2014	12:48-12:56	x	x	x
Zweisimmen	2	res	1	28.05.2014	13:00-13:09	x	x	x
Zweisimmen	2	res	2	28.05.2014	13:10-13:22	x	x	x

Gemeinde	Mess- nummer	Mikro- umgebung	Pfad- nummer	Datum	Zeit	Expom	EME SPY	EMDEX
Gstaad	1	cen	1	15.04.2014	13:00-13:14	x	74%	x
Gstaad	1	cen	2	15.04.2014	13:14-13:28	x	71%	x
Gstaad	1	res	1	15.04.2014	13:33-13:45	x	71%	x
Gstaad	1	res	2	15.04.2014	13:45-13:57	x	68%	x
Gstaad	2	cen	1	28.05.2014	14:41-14:47	x	x	x
Gstaad	2	cen	2	28.05.2014	14:48-14:56	x	x	x
Gstaad	2	res	1	28.05.2014	15:05-15:09	x	x	x
Gstaad	2	res	2	28.05.2014	15:09-15:15	x	x	x
Neuchatel	1	non	1	11.04.2014	13:13-13:26	x	73%	x
Neuchatel	1	non	2	11.04.2014	13:26-13:37	x	76%	x
Neuchatel	1	ccen	1	11.04.2014	13:45-13:59	x	74%	x
Neuchatel	1	ccen	2	11.04.2014	14:12-14:27	x	68%	x
Neuchatel	1	cres	1	11.04.2014	14:44-14:57	x	76%	x
Neuchatel	1	cres	2	11.04.2014	14:58-15:13	x	75%	x
Neuchatel	2	non	1	11.07.2014	13:00-13:12	x	0%	x
Neuchatel	2	non	2	11.07.2014	13:12-13:21	x	0%	x
Neuchatel	2	ccen	1	11.07.2014	11:50-12:03	x	0%	x
Neuchatel	2	ccen	2	11.07.2014	12:03-12:09	x	0%	x
Neuchatel	2	cres	1	11.07.2014	12:25-12:36	x	0%	x
Neuchatel	2	cres	2	11.07.2014	12:36-12:45	x	0%	x
StBlaise	1	cen	1	11.04.2014	11:42-11:54	x	79%	x
StBlaise	1	cen	2	11.04.2014	11:54-12:05	x	75%	x
StBlaise	1	res	1	11.04.2014	12:06-12:14	x	x	x
StBlaise	1	res	2	11.04.2014	12:14-12:29	x	78%	x
StBlaise	2	cen	1	11.07.2014	13:42-13:48	x	0%	x
StBlaise	2	cen	2	11.07.2014	13:48-13:58	x	0%	x
StBlaise	2	res	1	11.07.2014	13:59-14:05	x	0%	x
StBlaise	2	res	2	11.07.2014	14:05-14:19	x	0%	x
Lausanne	1	ccen	1	20.04.2014	12:05-12:21	x	74%	x
Lausanne	1	ccen	2	20.04.2014	12:59-13:14	x	70%	x
Lausanne	1	cres	1	20.04.2014	12:26-12:40	x	77%	x
Lausanne	1	cres	2	20.04.2014	12:40-12:55	x	73%	x
Lausanne	1	non	1	20.04.2014	13:25-13:39	x	74%	x
Lausanne	1	non	2	20.04.2014	13:51-14:05	x	74%	x
Lausanne	2	ccen	1	02.06.2014	10:40-10:57	x	0%	x
Lausanne	2	ccen	2	02.06.2014	10:57-11:12	x	0%	x
Lausanne	2	cres	1	02.06.2014	-	NA	NA	NA
Lausanne	2	cres	2	02.06.2014	-	NA	NA	NA
Lausanne	2	non	1	02.06.2014	11:40-11:53	x	0%	x
Lausanne	2	non	2	02.06.2014	11:53-12:08	x	0%	x
Pully	1	cen	1	20.04.2014	14:13-14:27	x	71%	x
Pully	1	cen	2	20.04.2014	14:27-14:40	x	75%	x
Pully	1	res	1	20.04.2014	14:41-14:55	x	74%	x
Pully	1	res	2	20.04.2014	14:55-15:09	x	81%	x
Pully	2	cen	1	02.06.2014	12:19-12:55	x	0%	x
Pully	2	cen	2	02.06.2014	12:55-13:04	x	0%	x
Pully	2	res	1	02.06.2014	13:05-13:19	x	0%	x
Pully	2	res	2	02.06.2014	13:19-13:27	x	0%	x
Lugano	1	cres	1	24.06.2014	14:36-14:53	x	0%	x
Lugano	1	cres	2	24.06.2014	14:53-15:05	x	0%	x
Lugano	1	non	1	24.06.2014	15:30-15:46	x	0%	x
Lugano	1	non	2	24.06.2014	15:46-15:56	x	0%	x
Lugano	1	ccen	1	24.06.2014	16:34-16:46	x	0%	x
Lugano	1	ccen	2	24.06.2014	16:46-16:53	x	0%	x
Lugano	2	cres	1	10.07.2014	13:11-13:23	x	0%	x
Lugano	2	cres	2	10.07.2014	13:23-13:33	x	0%	x
Lugano	2	non	1	10.07.2014	13:43-13:57	x	0%	x
Lugano	2	non	2	10.07.2014	13:58-14:09	x	0%	x
Lugano	2	ccen	1	10.07.2014	14:47-14:58	x	0%	x
Lugano	2	ccen	2	10.07.2014	14:58-15:06	x	0%	x
Bioggio	1	cen	1	24.06.2014	12:54-13:10	x	0%	x
Bioggio	1	cen	2	24.06.2014	13:10-13:21	x	0%	x
Bioggio	1	res	1	24.06.2014	13:31-13:39	x	0%	x
Bioggio	1	res	2	24.06.2014	13:39-13:51	x	0%	x
Bioggio	2	cen	1	10.07.2014	15:26-15:35	x	0%	x
Bioggio	2	cen	2	10.07.2014	15:46-15:58	x	0%	x
Bioggio	2	res	1	10.07.2014	16:03-16:12	x	0%	x
Bioggio	2	res	2	10.07.2014	16:12-16:21	x	0%	x

Insgesamt wurden im Rahmen des Pilots 2014 162'161 Messwerte erhoben. Davon stammen 51'753 von den ausgewählten Mikroumgebungen in Städten und Dörfern und der Rest von öffentlichen Verkehrsmitteln (Tram, Bus, Zug).

In Abbildung 11 bis Abbildung 13 ist die Datenverteilung für die verschiedenen kombinierten Frequenzbänder dargestellt. Der höchste gemessene Einzelwert beträgt sowohl für das totale HF-EMF als auch für Downlink allein 5.9 V/m. Für Uplink war der höchste Wert 5.4 V/m und für den Rundfunk 2.4 V/m. Dabei ist zu beachten, dass pro Band die Obergrenze des messbaren Bereichs 5 V/m beträgt und allfällige höhere Werte bei diesem Wert zensiert werden.

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass es sich um eine linksschiefe Verteilung handelt. Für die logarithmierten Werte (Abbildung 12 und Abbildung 13) folgen das totale HF-EMF und der Downlink approximativ einer Normalverteilung. Die Datenverteilung ist also für die elektrische Feldstärke annähernd lognormal. Beim Uplink und Rundfunk liegt der grösste Teil der Messwerte unterhalb von 0.02 V/m und die Verteilung dieser tiefen Werte kann aufgrund der Nachweisgrenze der Geräte nicht weiter evaluiert werden.

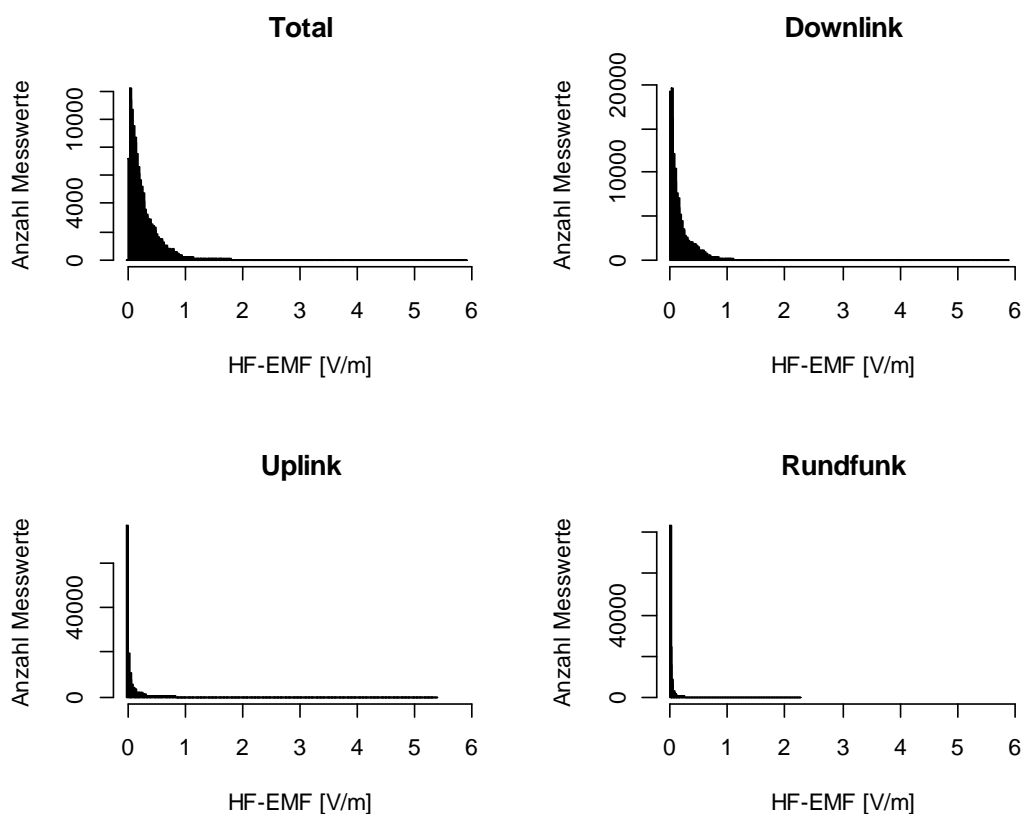


Abbildung 11: Verteilung aller Messwerte des Pilots 2014 (Aussenmessungen und öffentliche Verkehrsmittel).

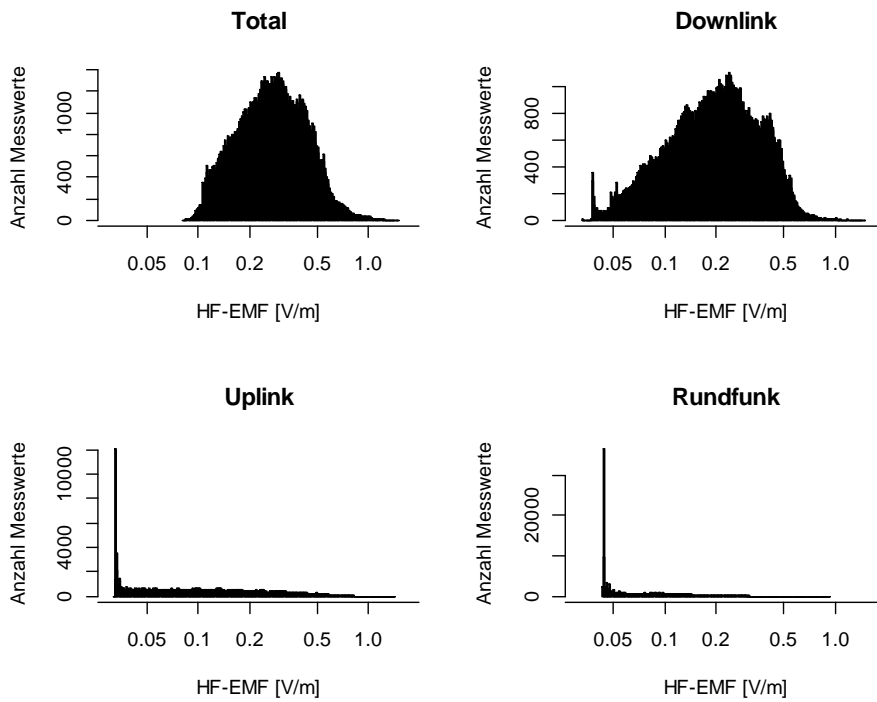


Abbildung 12: Verteilung aller Messwerte im Pilot 2014 auf der Log-Skala (Aussenmessungen und öffentliche Verkehrsmittel).

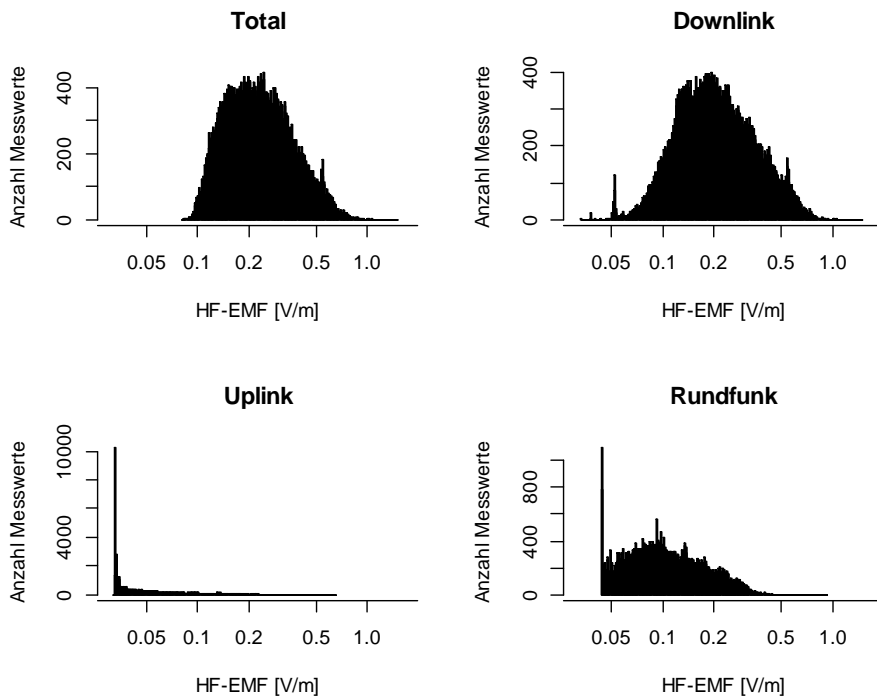


Abbildung 13: Verteilung der Messwerte aller Aussenmessungen im Pilot 2014 auf der Log-Skala (ohne öffentliche Verkehrsmittel).

4 Messunsicherheiten

4.1 Allgemeines

Die Messgenauigkeit von EME SPY und EMDEX Geräten wurde in mehreren Studien untersucht (Blas et al. 2007, Bolte et al. 2011, Bornkessel et al. 2010, Iskra et al. 2010, Iskra et al. 2011, Lauer et al. 2012, McDevitt et al. 2002). Zu den anderen Exposimetern gibt es bisher keine systematischen Untersuchungen und wissenschaftliche Publikationen.

Die Messunsicherheit von handlichen, leicht tragbaren HF-EMF Messgeräten ist im Allgemeinen grösser als von schweren Spektrumanalysatoren. Grundsätzlich sollten einzelne Messwerte von Exposimetermessungen jedoch nicht überbewertet werden. Dies trifft aber auch auf genaue Messgeräte zu, da die räumliche Variabilität von HF-EMF sehr gross ist und die Felder innerhalb von wenigen Zentimetern aufgrund von Interferenz, Reflexion und Absorption erheblich variieren können. Selbst wenn man also an einem bestimmten Punkt die Exposition genau gemessen hat, kann das HF-EMF schon in geringer Distanz davon deutlich anders sein. Die Stärke von Pfadmessungen mit einem Exposimeter liegt daher darin, dass man innerhalb von relativ kurzer Zeit eine Vielzahl von Messwerten in einem räumlich definierten Gebiet erheben kann. Damit ist zu erwarten, dass die natürlicherweise vorhandene räumliche Heterogenität von HF-EMF besser charakterisiert werden kann und die typische Exposition in einem bestimmten Gebiet aussagekräftiger erhoben werden kann als wenn aufwendig eine genaue Messung an nur einem Ort oder an wenigen Orten durchgeführt wird. Zufällige Messfehler spielen bei der Mittelung über eine grosse Anzahl von Messwerten (z.B. >100) eine untergeordnete Rolle. Von Bedeutung sind dagegen vor allem systematische Fehler, da sie zu einer Verzerrung beitragen. Dabei sind selbst kleine systematische Fehler unerwünscht. Im Folgenden sind die wichtigsten Unsicherheiten von Exposimetermessungen aufgelistet.

4.2 Isotropie

Die Isotropie bezeichnet die Unabhängigkeit einer Eigenschaft von der Richtung. In Bezug auf EMF Geräte bedeutet es, dass je kleiner die Isotropieabweichung ist, desto unabhängiger ist die Feldstärkemessung von der Ausrichtung der Messsonde in Bezug auf die Quelle. Für die gängigen Exposimeter (ausser Maschek) ist die Isotropieabweichung kleiner als ± 3 dB, was einer Messunsicherheit von +100% bzw. -50% entspricht (in Bezug auf die Leistungsflussdichte). In Bezug auf die Feldstärke ist die Unsicherheit +41% bzw. -

22%. Da bei einem realistischen Messszenario in der Umwelt davon auszugehen ist, dass die gemessenen Felder von verschiedenen Richtungen kommen, werden sich die Fehler im Allgemeinen kompensieren. Bolte et al. (2011) führte mit einem EME SPY 121 systematische Experimente in einer Waldlichtung ohne reflektierenden Boden durch und variierte die Elevation zwischen Messgerät und Quelle des zu messenden Feldes zwischen $\pm 90^\circ$ bzw. $\pm 30^\circ$. Dabei wurden für die Feldstärke frequenzspezifische Abweichungen gefunden, die sich pro Band zwischen -24% bis +41% bei der Variation zwischen $\pm 90^\circ$ bewegten bzw. um -11% bis +25% bei der Variation zwischen $\pm 30^\circ$. Dies zeigt den Bereich der Isotropieabweichungen des EME SPY 121 auf. Jedoch braucht es weitere Untersuchungen, damit diese bandspezifischen Werte für die Isotropieabweichung als robust für alle EME SPY 121 Geräte angesehen werden können und in Zukunft für die Korrektur der mittleren Isotropieabweichung von anderen EME SPY Messungen angewendet werden können. Die gemessenen mittleren Isotropieabweichungen liegen nämlich im Bereich der Datenvariabilität von Punktmessungen mit EME SPY 121 Geräten, so dass die bandspezifischen Isotropieabweichungen in einer anderen experimentellen Anordnung mit anderen Geräten möglicherweise auch wieder anders aussehen könnten.

4.3 Körperabschirmung

Wird das Exposimeter am Körper getragen, kann es zu einer sogenannten Körperabschirmung kommen, wenn sich das Exposimeter auf der vom eintreffenden Feld abgewandten Körperseite befindet. Umgekehrt kann es auf der zugewandten Seite zu Reflexionen kommen, so dass ein höheres Feld gemessen wird als es ohne Körper vorhanden wäre.

Um den Einfluss des Körpers auf das Messergebnis abzuschätzen, wurde in einer österreichischen Studie für verschiedene Szenarien die elektrische Feldstärke am Körper sowie am gleichen Ort ohne Körper modelliert (Neubauer et al. 2010). Für UKW Radio, GSM und UMTS wurde ein Aussenraumszenario mit einer Antenne auf einem Hausdach gewählt, für W-LAN ein Innenraumszenario. Modellierungen wurden für zehn verschiedene Positionen am Körper durchgeführt, wo sich ein Exposimeter bei der Messung befinden könnte (z.B. Rücken, Hüfte). Es zeigte sich, dass im Durchschnitt die Feldstärke bei Präsenz des Körpers tiefer ist als ohne. Einzelne Messwerte an bestimmten Orten am Körper können aber höher sein wegen Reflexion oder Streuung als bei freien Ausbreitungsbedingungen ohne Körper. Im Folgenden ist das mittlere Feldstärkeverhältnis über alle Simulationspunkte am Körper aufgelistet für die Simulation mit Körper im Vergleich zur Simulation ohne Körper (in

Klammer minimales bis maximales Verhältnis an einem Ort am Körper). 100 MHz: 0.99 (0.3–2.86), 946 MHz: 0.76 (0.09–1.7), 2140 MHz: 0.87 (0.07–1.84) 2450 MHz: 0.64 (0.08–2.05).

Die gleiche Fragestellung hat Bolte et al. (2011) experimentell im Feld untersucht. Die Messungen wurden in einer Waldlichtung ohne reflektierenden Boden durchgeführt. Das Exposimeter wurde in einer Kameratasche an der linken und rechten Hüfte getragen und die Person rotierte während den Messungen jeweils um 45°. Wiederum wurde für vereinzelt Konfigurationen eine Überschätzung des Feldes gefunden. Für jedes Band wurde dann ausgerechnet, mit welchem Faktor der gemessene Wert im Mittel über alle möglichen geometrischen Konfigurationen multipliziert werden muss, damit man die korrekte mittlere Feldstärke erhält (also im Vergleich zu Neubauer reziproke Werte). Die entsprechenden Korrekturfaktoren sind: 1.20 für UKW Radio, 0.92 für TV3, 1.30 für TV4&5 1.14 für GSM900 Downlink 0.66 für GSM1800 Downlink, 0.97 für UMTS Uplink, 1.08 für UMTS Downlink und 1.20 für W-LAN. Wenn man gleichzeitig noch die Unsicherheiten wegen der Messgerätekalibration und des Elevationswinkels (Isotropiefehler) berücksichtigt, liegen die Korrekturfaktoren zwischen 1.06 (TV3) und 1.57 (W-LAN). Obwohl auch diese Faktoren noch im Bereich der Messunsicherheit liegen, sind sie systematisch höher als 1 und bedeuten, dass die effektive Feldstärke bei am Körper getragenen Exposimetern etwas unterschätzt wird.

Iskra et al. (2010) kam aufgrund von Monte-Carlo Simulationen zum Schluss, dass das gemessene elektrische Feld bei körpergetragenen Exposimetern im Durchschnitt bei Erwachsenen 0.52 bis 0.73 und bei Kindern 0.53 bis 0.74 der tatsächlich vorhandenen Feldstärke beträgt. Sie schlagen deshalb vor, je ein Exposimeter am Bauch und am Rücken zu tragen und den Durchschnittswert zu verwenden. Dadurch konnte die Unterschätzung auf einen Bereich von 0.56 bis 0.84 für Erwachsene und 0.58 und 0.83 für Kinder reduziert werden. Es wurde aber auch vorgeschlagen, bei dieser Konfiguration jeweils den höheren der beiden Messwerte zu nehmen, unter der Annahme, dass nur eine Seite von der Körperabschirmung betroffen ist und die Reflexion an der Körperoberfläche im Mittel vernachlässigbar ist (Thielens et al. 2013).

Das vorne beschriebene MAE (Kapitel 3.1.3) verwendet 3-4 Antennen pro Person, um die Körperabschirmung weiter zu reduzieren. Es konnte gezeigt werden, dass für Einzelmessungen damit die Unsicherheit um einen Faktor 5 reduziert werden konnte, während bei konventionellen Exposimetern die Unsicherheit von Einzelmessungen grösser als ein Faktor 100 sei (Thielens et al. 2013). Damit ist zu erwarten, dass mit dem MAE

gemessene Mittelwerte deutlich genauer sind und die systematische Unterschätzung verhindert werden kann.

Im Rahmen von Pfadmessungen kann die Körperabschirmung auch reduziert werden, indem das Messgerät vom Körper entfernt getragen wird. In der Vertiefungsmessung wurde das Exposimeter in einem Kinderwagen ca. 1 m über Boden und in 1 m Abstand zum Körper mitgeführt. In den Messungen im Rahmen des Pilots 2014, wurden die Messgeräte zuoberst in einem mit Isoliermaterial gefüllten Rucksack platziert (Abbildung 10), so dass die Körperabschirmung auch verringert wurde. Solche Messanordnungen sind natürlich in Probandenstudien nicht zumutbar. Es ist zu beachten, dass bei einem Monitoring die Messanordnung möglichst keinen Einfluss auf die Passanten haben sollte. Weichen diese beispielsweise aus, kann das zu einer Unterschätzung der Uplink Expositionen von Mobiltelefonen führen. Umgekehrt können Passanten bei bestimmten Konstruktionen neugierig werden und dies kann zu einer Überschätzung der Uplink Exposition durch ihre Mobilfunktelefone führen.

4.4 Cross-Talk

Die Schwierigkeit bei frequenzselektiven Messungen besteht darin, dass am Rande des zu messenden Frequenzbandes aus physikalischen Gründen keine scharfe Abgrenzung möglich ist. Das bedeutet, dass die Sensitivität des Messgerätes am Rande des zu messenden Frequenzbandes schon innerhalb des Bandes etwas abnimmt und knapp ausserhalb noch nicht vollständig null ist. Damit wird ein Signal im benachbarten Frequenzband mitgemessen, was als Übersprechen bzw. Cross-Talk bezeichnet wird. Da aber für ein bestimmtes Signal bei den meisten Funktechnologien nur ein Teil (z.B. 5 MHz) des ganzen Frequenzbandes (z.B. 60 MHz) verwendet wird, kann man diesen Fehler auch bei optimaler Kalibration nicht vollständig eliminieren. Zum Beispiel kann ein UMTS Signal entweder am oberen oder am unteren Rand des UMTS Frequenzbandes übermittelt werden. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, hat das EME SPY 120 und 121 einen numerischen Algorithmus implementiert, um aus dem Verhältnis zwischen maximalem und minimalem Messwert innerhalb eines kurzen Zeitintervalls auf das Frequenzband/Funkdienst zu schliessen. Man erwartet z.B. beim GSM900 Uplink eine höhere Pulsierung als beim GSM900 Downlink. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass die Messgenauigkeit von der Slotkonfiguration des Signals abhängt (Lauer et al. 2012). Und wie schon erläutert, ist dieses Messprinzip nicht zukunftstauglich, wenn verschiedene Kommunikationstechnologien im gleichen Frequenzband verwendet werden, wie dies heute bei UMTS900 und GSM900 oder LTE1800 und GSM1800 bereits der Fall ist.

Problematisch ist diese Abgrenzung zwischen den Frequenzbändern besonders dort, wo ein schmales Frequenzband unmittelbar an ein breiteres Frequenzband grenzt. Das betrifft insbesondere die Abgrenzung zwischen GSM1800 Downlink (1805-1880 MHz) und DECT (1880-1900 MHz) sowie UMTS Uplink (1920-1980 MHz) und DECT. Ebenfalls problematisch sind sogenannte harmonische Oberwellen (Vielfaches einer Frequenz), wenn deren Frequenz in ein anderes Band fällt. Problematisch ist hier GSM1800 Uplink (1710-1785 MHz) und WiMax (3400-3600 MHz) sowie in Bezug auf das W-LAN Band im 5 GHz Bereich (5150-5875 MHz) die Frequenzbänder GSM1800 Uplink (1710-1785 MHz), GSM1800 Downlink (1805-1880 MHz), DECT (1880-1900 MHz) und UMTS Uplink (1920-1980 MHz). Im Fall von harmonischen Oberwellen erwartet man nicht-linearen Cross-Talk. Das heisst, je höher die Exposition desto höher der proportionale Anteil am Cross-Talk. Beim normalen Cross-Talk (d. h. zwischen benachbarten Frequenzbändern) erwartet man eine lineare Beziehung zwischen der Exposition und dem Ausmass von Cross-Talk (persönliche Auskunft Marco Zahner, ETHZ).

Im Folgenden sind exemplarisch einige Beispiele von solchem Cross-Talk aus den Messungen des Pilots 2014 mit dem EXPOM3 dargestellt. Abbildung 14 zeigt ein typisches Beispiel von Cross-Talk zwischen Downlink1800 und DECT. Es ist ersichtlich, dass das Ausmass von Cross-Talk sehr unterschiedlich sein kann. Da es sich um eine Aussenmessung handelt, ist mit grosser Wahrscheinlichkeit keine oder nur sehr geringe DECT-Exposition vorhanden. Dennoch ist bei Minute 40 die DECT-Messung praktisch gleich hoch wie die Downlink 1800er Messung. Davor ist sie geringer und ganz am Anfang der Messung praktisch nicht vorhanden. Dieses Bild scheint der Aussage zu widersprechen, dass sich Cross-Talk zwischen benachbarten Frequenzbändern linear verhält. Es könnte aber damit zusammenhängen, dass sich die Frequenz des Downlink 1800 Signals im Verlauf der Zeit verändert hat und bei Minute 40 näher am DECT Band ist als davor. Abbildung 15 zeigt ein Beispiel, wo der Cross-Talk mindestens eine Grössenordnung kleiner ist und Abbildung 16 ein Beispiel für Cross-Talk zwischen Uplink 1900, Downlink 1800 und DECT. Es ist zu betonen, dass alle diese Cross-Talk Fälle in den Messungen selten zu finden sind und in den untenstehenden logarithmischen Darstellungen deutlich hervortreten, obwohl sie quantitativ im Allgemeinen nicht stark ins Gewicht fallen.

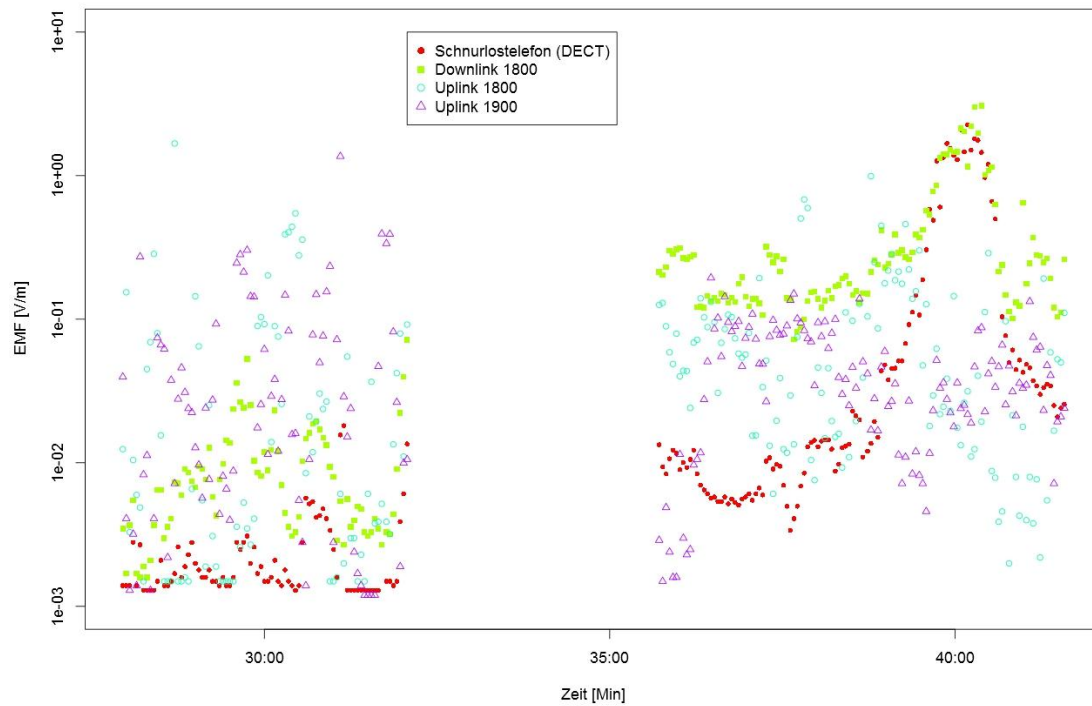


Abbildung 14: Beispiel von Cross-Talk vom Downlink 1800 Band auf das DECT Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung).

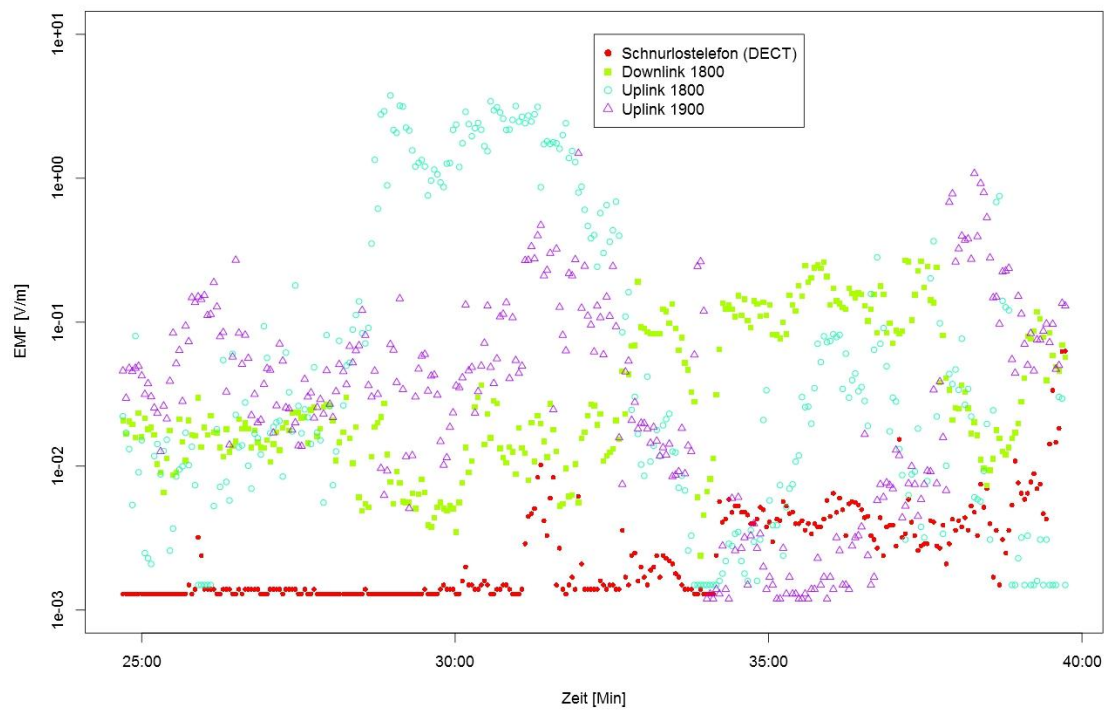


Abbildung 15: Beispiel von Cross-Talk vom Downlink 1800 Band auf das DECT Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung).

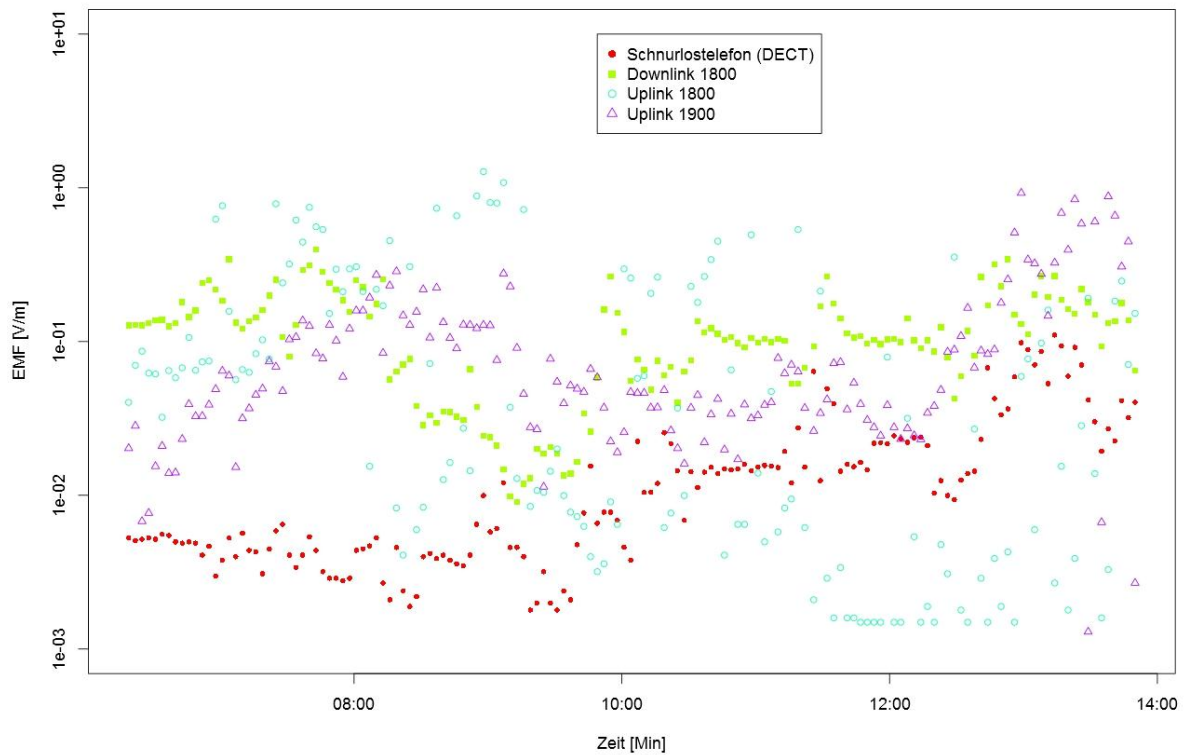


Abbildung 16: Beispiel von Cross-Talk zwischen Uplink 1900, Downlink 1800 und dem DECT Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung).

Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen Beispiele für Cross-Talk von Uplink 1800, Downlink 1800 und Uplink 1900 auf das W-LAN5 Band. Auch hier ist das Ausmass von Cross-Talk sehr unterschiedlich.

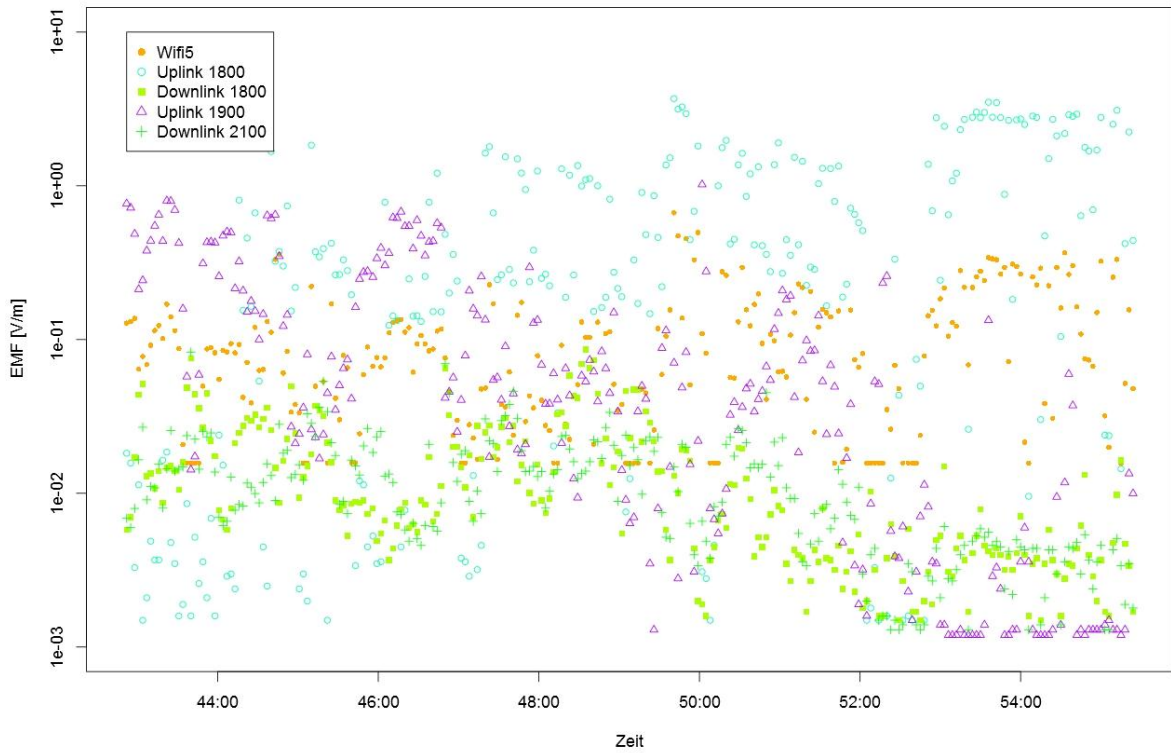


Abbildung 17: Beispiel von Cross-Talk vom Uplink 1800 Band auf das W-LAN5 Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung)

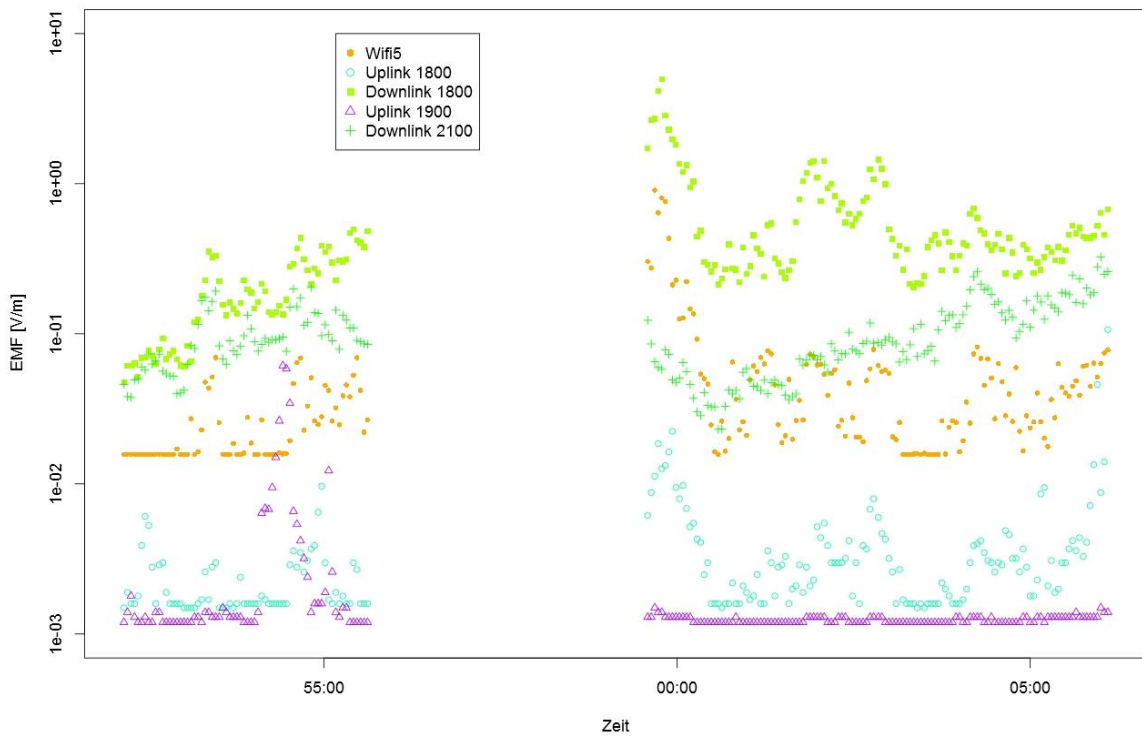


Abbildung 18: Beispiel von Cross-Talk vom Downlink 1800 Band auf das W-LAN5 Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung)

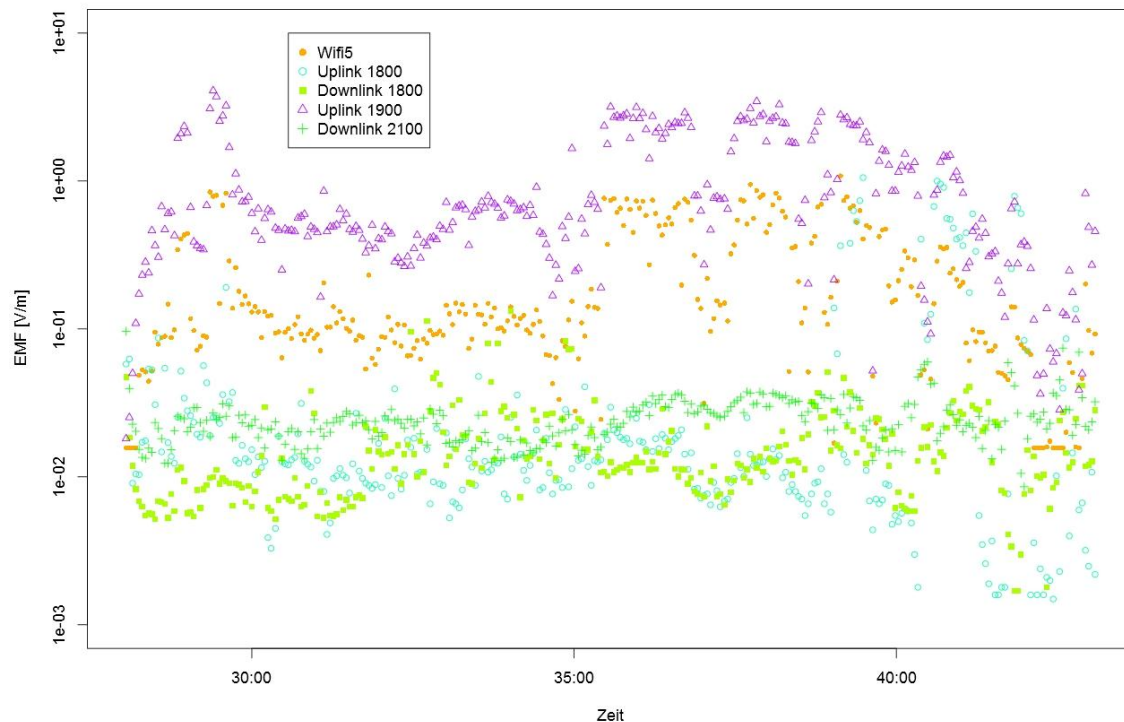


Abbildung 19: Beispiel von Cross-Talk vom Uplink 1900 Band auf das W-LAN5 Band (EXPOM3; logarithmische Darstellung)

Die Beispiele zeigen, dass Cross-Talk im Einzelfall sehr ausgeprägt sein und dass das Ausmass sehr unterschiedlich sein kann. Aus diesem Grund lässt sich das Problem nicht einfach korrigieren.

Anhand verschiedener mit dem EXPOM3 erhobener Datensets wurde evaluiert, wie sich möglicher Cross-Talk auf die mittlere Exposition auswirkt. Es hat sich gezeigt, dass bei Messungen draussen und in öffentlichen Verkehrsmitteln typischerweise rund 0.1 V/m im DECT Band angezeigt wird, obwohl man an diesen Orten nur minimale Exposition durch DECT erwarten würde (Tabelle 13). In einem ersten Ansatz wurden bezogen auf die Leistungsflussdichte alle DECT Messwerte, die das Verhältnis (V) 0.5 oder 0.25 zum Downlink 1800 oder Uplink 1900 Messwert überschritten, mit der halben Nachweisgrenze (ebenfalls Leistungsflussdichte) ersetzt. Die Plausibilität der Korrektur wurde anhand des R^2 von einem Regressionsmodell mit Downlink 1800 und Uplink 1900 als erklärenden Variablen evaluiert. Da DECT mit diesen beiden Frequenzbändern kaum zeitlich korreliert, wird erwartet, dass sich das R^2 bei einer plausiblen Korrektur reduzieren sollte. Zusätzlich wird die Veränderung des korrigierten DECT Mittelwertes und des absoluten Messwert des GSM1800 Bandes berücksichtigt. Eine plausible Verbesserung der Daten bei der Korrektur

der DECT-Werte wurde gefunden, wenn eine der beiden folgenden Bedingungen zutrifft: 1. DECT Werte zwischen 25% und 200% des Downlink 1800er oder des Uplink 1900er Bandes (bezogen auf die Leistungsflussdichte). 2. Downlink 1800 oder Uplink 1900 Messwerte höher als 0.5 V/m. Nach einer solchen Korrektur bestand praktisch keine Korrelation (R^2) mehr zwischen DECT und den beiden benachbarten Frequenzbändern und der Mittelwert war erheblich reduziert (von 0.102 auf 0.028 V/m). Im Prinzip hat sich im Pilot 2014 empirisch gezeigt, dass die Berücksichtigung des Uplink1900 Bandes für das EXPOM3 nicht mehr nötig ist. Bei Messungen mit Geräten der ersten EXPOM-Version konnte noch eine erhebliche Verbesserung erzielt werden, wenn auch dieses Band berücksichtigt wurde. Zudem hat sich dort auch gezeigt, dass innerhalb der gleichen Geräteversion Unterschiede auftreten. Die Anwendung dieser Regel auf Innenraummessungen, wo man einen gewissen DECT Anteil erwarten würde, ergab zufriedenstellende Resultate, wenn man R^2 und den Vergleich der unkorrigierten und korrigierten DECT-Werte als Basis nimmt. Dennoch sind in diesem Bereich noch weitere Anstrengungen nötig, um diese Fehlerquelle möglichst gering zu halten, da dort eine Überkorrektur kritischer ist.

Im Rahmen des Pilots 2014 wurden die DECT und W-LAN5 Messungen des EXPOM3 mit dem oben beschriebenen Verfahren korrigiert worden. Dabei wurde beim W-LAN5 als Korrekturkriterium 100% (statt 200%) des Downlink 1800er oder des Uplink 1900er Bandes verwendet. Bei den EME SPY Messungen konnte kein plausibler Korrekturalgorithmus hergeleitet werden und es wurde deshalb keine Korrektur der DECT Werte durchgeführt. Es ist zu betonen, dass diese Korrekturen in Bezug auf die gesamte gemessene HF-EMF Belastung nur einen minimalen Einfluss hat.

Tabelle 13: Einfluss von verschiedenen Korrekturregeln auf das gemessene DECT (alle Messungen mit dem EXPOM3 des Pilots 2014; draussen und öffentliche Verkehrsmittel); DL=Downlink; UL=Uplink

Regel DL1800	Regel UL1900	Ersetzter Wert	Mittelwert (V/m)	R^2 *
keine	keine	-	0.102	0.259
$V > 0.5$	keine	0.0025**	0.061	0.266
$V > 0.25$	keine	0.0025**	0.044	0.194
$E > 0.5$ V/m	keine	0.0025**	0.043	<0.001
$0.25 < V < 2$ oder $E > 0.5$ V/m	keine	0.0025**	0.028	<0.001
$0.25 < V < 2$ oder $E > 0.5$ V/m	$0.25 < V < 2$ oder $E > 0.5$ V/m	0.0025**	0.028	<0.001

* erklärte Varianz für ein lineares Regressionsmodell $DECT = \beta_0 + \beta_1 * DL1800 + \beta_2 * UL1900$

** halbe Nachweisgrenze in V/m

4.5 Vergleich EXPOM3 mit EME Spy 140

Abbildung 20 zeigt den Vergleich zwischen EXPOM3 und EME SPY 140 für das gesamte HF-EMF, Downlink, Uplink und Rundfunk aufgrund der Messungen im Pilot 2014. Für Downlink und für das gesamte HF-EMF ist die Korrelation sehr hoch und insgesamt kein systematischer Messunterschied zu erkennen. Betrachtet man jedoch die drei Downlinkbänder separat, ist ersichtlich, dass das EME SPY 140 etwas höhere Downlink 2100 Werte zu messen scheint (Abbildung 21). Für alle drei Uplinkbänder zusammen sind deutliche systematische Unterschiede zu erkennen. Das EME SPY misst im Durchschnitt 4.3 Mal höhere Feldstärken und die Korrelation beträgt nur 0.42. Für jedes der drei Uplinkbänder ist die Korrelation zwischen den beiden Messgeräten moderat und für alle drei Bänder misst das EME SPY systematisch höhere Werte: im Durchschnitt einen Faktor 2.6 für Uplink 900, einen Faktor 5.3 für Uplink 1800 und einen Faktor 1.8 für Uplink 1900 (Abbildung 22). Da aber bei den Messungen des Pilots 2014 der Uplink nur einen kleinen Teil vom gesamten HF-EMF ausmacht, wirkt sich das auf das totale HF-EMF kaum aus. Auch beim Rundfunk ist die Korrelation nicht optimal (Abbildung 20). Das liegt auch daran, dass die beiden Geräte verschiedene Bänder messen. Beim EXPOM3 umfasst der Rundfunkfrequenzbereich UKW (87.5-108 MHz) und DVB-T (470-790 MHz). Beim EME SPY 140 sind es UKW (87.5-108 MHz), TV3 (174-223 MHz) und TV4/5 (470-790 MHz). Obwohl das EME SPY ein breiteres Frequenzspektrum erfasst, sind die Feldstärken im Durchschnitt um 13% tiefer als beim EXPOM3, was auf einen systematischen Fehler von einem der beiden Gerätetypen hindeutet.

Auch beim W-LAN tendiert das EME SPY 140 dazu, etwas höhere Werte zu messen im Vergleich zum EXPOM3 (Abbildung 23). Die Korrelation beträgt 0.79. Die Werte sind jedoch sehr tief und es stellt sich die Frage, ob ein Teil des Unterschiedes daher kommt, dass das EXPOM3 auch Werte unterhalb der Nachweisgrenze angibt, während beim EME-SPY ein statistisches Verfahren für die Nachweisgrenzenkorrektur angewendet wurde (Röösli et al. 2008). Je geringer die Anzahl Messungen oberhalb der Nachweisgrenze, desto mehr Einfluss hat bei diesem statistischen Verfahren die Annahme einer loglinearen Datenverteilung unterhalb der Nachweisgrenze. Da diese Annahme nicht überprüft werden kann, wird das Verfahren mit abnehmender Exposition unsicherer. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den beiden Geräten beim W-LAN und bei den Uplink-Bändern auch auftreten, wenn die Mittelwerte relativ gross sind. Das spricht dagegen, dass der Umgang mit Werten unterhalb der Nachweisgrenze substantiell zu den beobachteten Differenzen zwischen den beiden Geräten beiträgt.

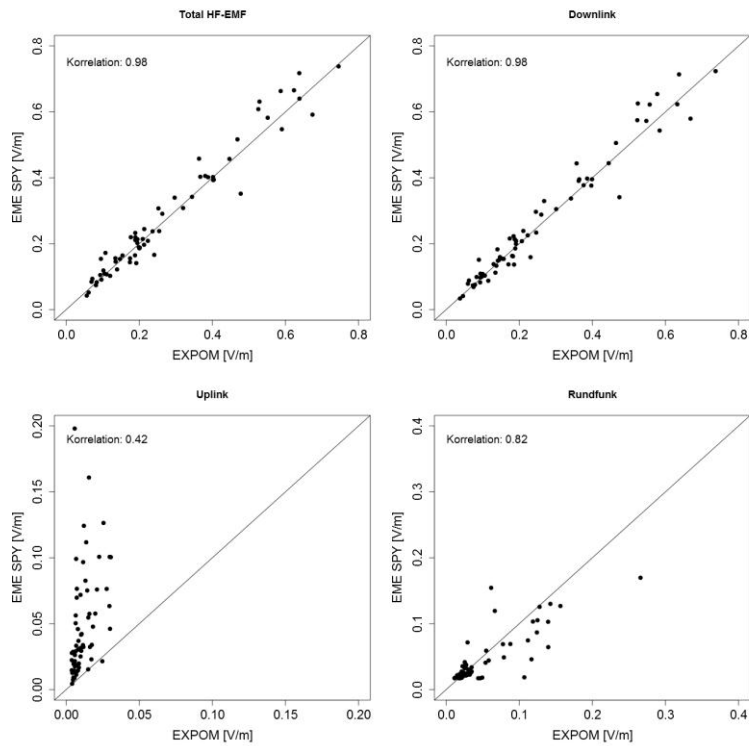


Abbildung 20: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung (EXPOM3 - vs. EME SPY 140; Pearson's Korrelationskoeffizienten sind in V/m gerechnet).

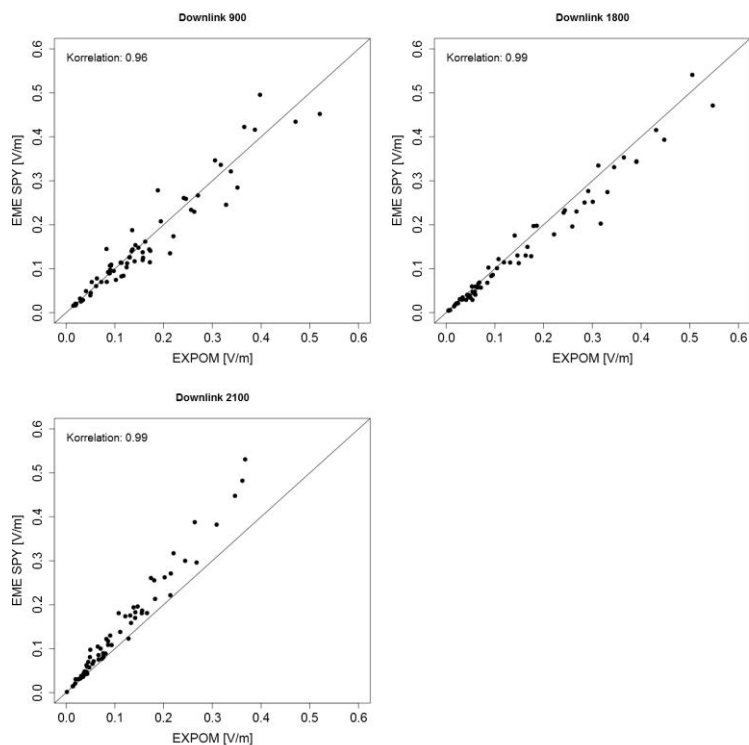


Abbildung 21: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung für die drei Downlink-Bänder (EXPOM3 vs. EME SPY 140).

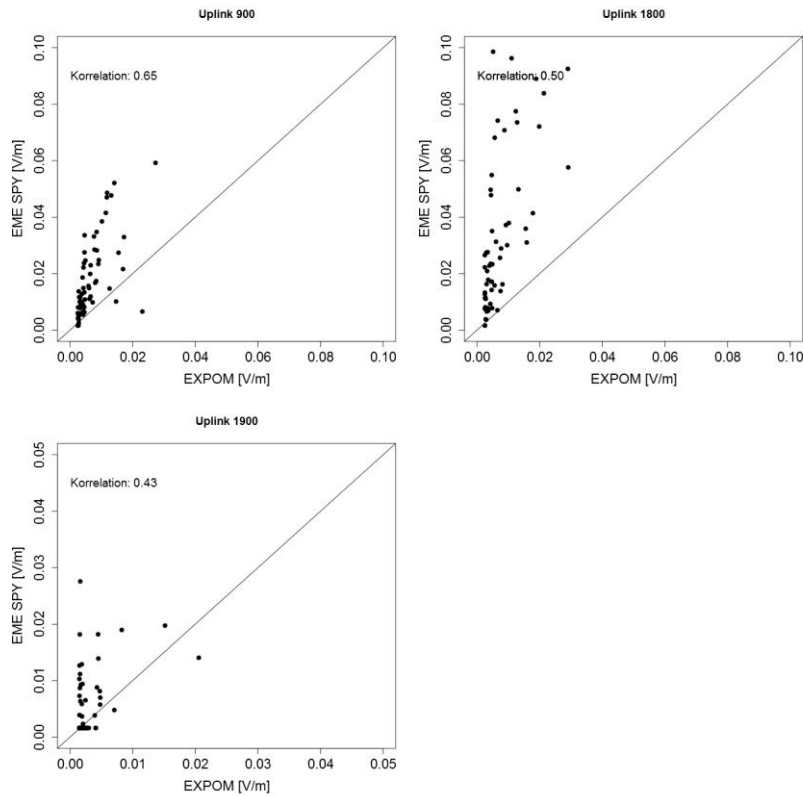


Abbildung 22: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung für die drei Uplink-Bänder (EXPOM3 vs. EME SPY 140).

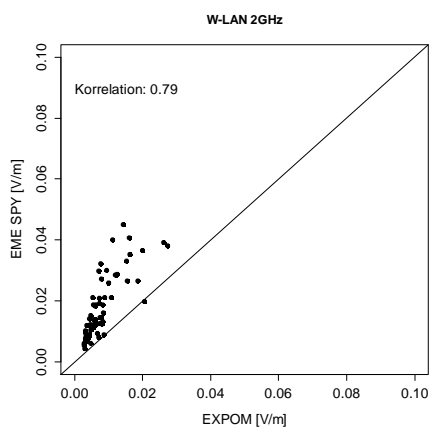


Abbildung 23: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung für das 2 GHz W-LAN Band (EXPOM3 vs. EME SPY 140).

Für die beim EXPOM3 Cross-Talk korrigierten DECT- Messwerte (siehe Kapitel 4.4) beträgt die Korrelation mit den EME SPY 120 Messungen 0.62 und für die unkorrigierten EXPOM3 Messwerte 0.59 (Abbildung 24). Selbst vor der Korrektur misst das EME SPY im Durchschnitt etwas höher als das EXPOM3 (0.057 V/m vs. 0.035 V/m), nachher sind die Werte des EXPOM3's noch kleiner (0.024 V/m). Es ist davon auszugehen, dass beide Geräte vom

physikalisch bedingten Cross-Talk betroffen sind und insofern ist es nicht erstaunlich, dass sich nach der Korrektur für das EXPOM3 tiefere Werte ergeben. Die Abbildung 24 illustriert aber deutlich, dass die Unterschiede zwischen Cross-Talk korrigierten und unkorrigierten Werten für Aussenmessungen absolut gesehen klein sind.

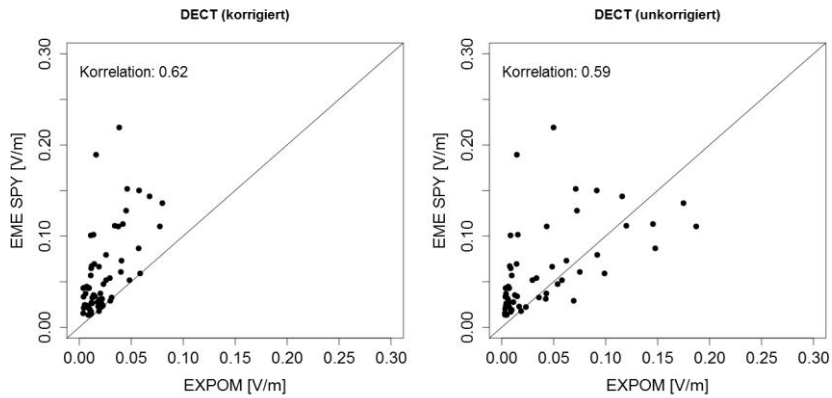


Abbildung 24: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte (EXPOM3 vs. EME SPY 140) pro Mikroumgebung für das DECT-Band, mit und ohne Korrektur für Cross-Talk bei den EXPOM3 Messungen.

5 HF-EMF-Exposition

Um die offenen Fragen für die Entwicklung eines Stichprobenkonzepts für NIS-Immissionsmessungen beantworten zu können, sind folgende Punkte untersucht worden:

- HF-EMF-Expositionen in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen (Kapitel 5.1)
- Variation der HF-EMF-Expositionen zwischen Mikroumgebungen vom selben Typ (Kapitel 5.2)
- Wiederholung von Exposimetermessungen auf demselben Messpfad (Kapitel 5.3)
- Variation der Exposition innerhalb einer Mikroumgebung (Kapitel 5.4)
- Einflussfaktoren auf die Ergebnisse von Exposimetermessungen (Kapitel 5.5)

Das Kapitel 5 ist entsprechend diesen Punkten strukturiert, jeweils unterteilt in einen Literaturüberblick und in eigene Auswertungen von Messdaten verschiedener Herkunft. Die Resultate zu den niederfrequenten Magnetfeldmessungen (NF-MF) sind in Kapitel 6 dargestellt.

5.1 HF-EMF-Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen

5.1.1 Literaturübersicht

In einer französischen Studie betrug die mittlere HF-EMF-Exposition der 12 vom EME SPY 120 gemessenen Frequenzbänder 0.2 V/m (Viel et al. 2009a). Die Hauptbeiträge stammten von Radio UKW (0.044 V/m), DECT (0.037 V/m), UMTS-Mobiltelefone (0.036 V/m), UMTS Basisstationen (0.037 V/m) und W-LAN (0.038 V/m), wobei Cross-Talk zwischen den Bändern nicht vertieft analysiert wurde. Es wurden im Mittel höhere HF-EMF Werte für Probanden aus städtischen Gebieten (0.23 V/m) als für Probanden aus der Agglomeration (0.20 V/m) oder ländlichen Gebieten (0.16 V/m) beobachtet. Jüngere Personen (Alter nicht angegeben) hatten geringfügig tiefere HF-EMF Werte (0.19 V/m) als Erwachsene (0.21 V/m). Es gab kaum Unterschiede zwischen der Exposition zu Hause und am Arbeitsplatz. Etwas höher war die HF-EMF-Exposition unterwegs (0.215 V/m), am höchsten zu Fuss (0.233 V/m), im Bus (0.238 V/m) oder im Zug (0.257 V/m).

In einer holländischen personenbezogenen Exposimeterstudie betrug die mittlere HF-EMF-Exposition 0.26 V/m (Bolte und Eikelboom 2012). Die Hauptbeiträge stammten von den 3 Mobiltelefon-Uplinkbändern (37.5% von der Gesamtexposition bezogen auf die Leistungsflussdichte), DECT (31.7%), W-LAN (14.1%) und den 3 Mobilfunkbasisstation-

Downlinkbändern (12.7%). Die HF-EMF-Exposition nahm mit zunehmendem Sozialstatus im Durchschnitt zu. Probanden älter als 54 Jahre hatten tendenziell tiefere Expositionen als die jüngeren Probanden, wobei die Anzahl Probanden pro Alterskategorie relativ klein war. Bei Aussenmessungen nahm die Exposition durch die Strahlung von Mobilfunkbasisstationen mit zunehmender Urbanisierung zu. Bei Messungen im Zug oder Auto wurde ein solcher Zusammenhang nicht beobachtet. Zu Hause war die HF-EMF-Exposition 0.24 V/m, bei der Arbeit und draussen 0.28 V/m. Aufgeschlüsselt nach den 39 Aktivitäten wurde die höchste Exposition im Auto gemessen (0.54 V/m), gefolgt von Pub/Café/Disco (0.45 V/m), Küchen (0.40 V/m), Hobbyräumen (0.37 V/m), Zügen (0.37 V/m) und Bahnhöfen (0.35 V/m). Diese hohen Expositionen sind hauptsächlich auf Emissionen von Mobiltelefonen zurückzuführen, wobei aus den Messungen nicht geschlossen werden kann, wie gross der Anteil des eigenen Telefons ist. Ausnahmen sind Bahnhöfe und Hobbyräume, wo Basisstationen den Hauptbeitrag liefern, und Küchen, wo im W-LAN Band am meisten gemessen wurde, was mit grösster Wahrscheinlichkeit auf Mikrowellenöfen zurückzuführen ist, die im gleichen Frequenzband emittieren.

In einer Messstudie aus Thessaloniki betrug die mittlere HF-Exposition 0.47 V/m. In städtischen Gebieten wurden höhere Werte gemessen als in ländlichen Gebieten (Markakis und Samaras 2013). Der Median des EMF von UKW Radio war in städtischen Gebieten 0.23 V/m (ländlich: 0.18 V/m), für das TV3 Band 0.09 V/m (ländlich: 0.03 V/m), TV4&5 0.12 V/m (0.10 V/m), GSM900 Downlink 0.25 V/m (0.04 V/m), GSM1800 Downlink 0.17 V/m (0.05 V/m) und UMTS 0.16 V/m (0.03V/m). Die Werte sind höher als in anderen Studien, da das Gerät gezielt beim lokalen Maximum innerhalb eines Raumes aufgestellt wurde. Die Unterschiede in der mittleren HF-EMF-Exposition zwischen Wohnungen (0.44 V/m) und Büros (0.53 V/m) waren relativ gering (Werte für Schulen nicht publiziert), obwohl die Quellenzusammensetzung unterschiedlich war. In Büros war der Downlink dominierend und in Wohnzimmern DECT und W-LAN. Interessanterweise war der Anteil von Mobilfunk Uplink an der Exposition in Schulen deutlich höher als in den anderen Räumen.

In der Publikation von (Vermeeren et al. 2013) war die mittlere HF-EMF-Exposition des Raummaximums in Schulen 0.39 V/m in Belgien und 0.40 V/m in Griechenland, in Büros 1.14 V/m (Belgien) und 0.72 V/m (Griechenland), in Kinderkrippen 0.36 V/m (Belgien) und 0.54 V/m (Griechenland) und in Wohnungen 0.32 V/m (Belgien) und 0.42 V/m (Griechenland).

In den 130 Schlafzimmern, die in einer österreichischen Studie sowohl im Jahr 2006 als auch 2009 gemessen wurden, betrug die mittlere HF-EMF-Exposition, jeweils gemessen als

Raummaximum, 0.47 V/m im Jahr 2006 und 0.39 V/m im Jahr 2009 (Tomitsch und Dechant 2012). Der Median aller Messungen stieg in diesen drei Jahren von 0.12 auf 0.15 V/m. Der grösste Beitrag stammte von DECT Telefonen, der sich aber zwischen 2006 und 2009 von 0.40 auf 0.28 V/m reduzierte. Der Beitrag durch Mobilfunkbasisstationen (Summe von GSM900, GSM1800 und UMTS) betrug 0.21 V/m im Jahr 2006 und 0.20 V/m im Jahr 2009. Für Radio und UHF Fernsehen wurde jeweils ein gewisser Anstieg beobachtet (0.08 auf 0.11 sowie 0.05 auf 0.09 V/m). W-LAN nahm zwischen 2006 und 2009 von 0.07 auf 0.11 V/m zu.

In der deutschen Messstudie in verschiedenen Schlafzimmern (Breckenkamp et al. 2012) betrug die mittlere HF-EMF-Exposition (ohne Mobilfunk-Uplink) 0.12 V/m. Der Hauptanteil stammt vom DECT (63% bezogen auf die Leistungsflussdichte) und W-LAN (18%). Im Durchschnitt war die Exposition in städtischen Gebieten höher (0.13 V/m) als in der Agglomeration (0.11 V/m) und ländlichen Gebieten (0.09 V/m).

In einer schwedischen Studie mit einem auf einem Auto montierten Messsystem wurden relativ grosse Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Gebieten beobachtet. In den Städten Solna und Stockholm war die mediane HF-EMF-Exposition zwischen 0.73 und 0.99 V/m, in den kleineren Städten Göteborg, Helsingborg, Jönköping und Ljungby bei war sie 0.32 V/m und in den ländlichen Gebieten (Ryssby, Ekerö) 0.08 V/m. Der überwiegende Anteil stammte von Mobilfunkbasisstationen. Interessanterweise ergaben 3 Messungen innerhalb von zwei Tagen in Solna auf der gleichen Route sehr ähnliche Werte: Die mediane HF-EMF-Exposition betrug 0.78, 0.79 und 0.73 V/m, die arithmetischen Mittelwerte betragen 1.08, 1.11 und 1.10 V/m.

5.1.2 Eigene Auswertungen von Messdaten

In Tabelle 14 und Tabelle 15 ist die mittlere HF-EMF-Exposition in verschiedenen Mikroumgebungen aus verschiedenen Datensätzen publizierter Studien und der im Rahmen des vorliegenden Auftrags durchgeführten Pilots 2014 dargestellt. Die höchsten Werte wurden typischerweise in öffentlichen Verkehrsmitteln gemessen (Bus, Tram und Zug). Die mittlere HF-EMF-Exposition betrug dort zwischen 0.32 und 0.72 V/m. Dabei spielen die Uplink Emissionen meistens die grösste Rolle. Unter all den Innenräumen ist die HF-EMF-Exposition am Flughafen deutlich höher als an anderen Orten. Am geringsten (≤ 0.2 V/m) ist die Exposition in Schulen, in Kindergärten, im Kino und in Wohnungen.

Beim Vergleich von personenbezogenen Messungen (z.B. Qualifex) mit Pfadmessungen (Vertiefungs-, Langzeit- oder Pilot 2014-Messungen) ist zu beachten, dass Probanden relativ

häufig ein eingeschaltetes Mobiltelefon mit sich herumgetragen haben, während dies bei den Pfadmessungen nicht der Fall war.

Tabelle 14: Überblick über mittlere HF-EMF-Expositionen in verschiedenen Innenräumen und Verkehrsmitteln von verschiedenen Exposimeterstudien (alle Messwerte in V/m).

Ort	Daten	Anzahl Messwerte	HF-EMF	Downlink	Uplink	Rundfunk
Arbeitsplatz	pers. Qualifex	134720	0.234	0.081	0.130	0.131
Auto	pers. Qualifex	19764	0.284	0.113	0.256	0.056
Bus	Langzeit	31067	0.320	0.180	0.258	0.069
Bus	Pilot 2014	8601	0.392	0.260	0.249	0.150
Einkaufen	pers. Qualifex	10512	0.287	0.152	0.225	0.044
Einkaufen	Langzeit	12842	0.208	0.129	0.145	0.041
Flughafen	pers. Qualifex	195	0.524	0.095	0.515	0.050
Flughafen	Langzeit	8765	0.449	0.421	0.139	0.060
Hochschule	pers. Qualifex	3025	0.197	0.069	0.173	0.050
Kirche	pers. Qualifex	655	0.107	0.088	0.040	0.062
Konzerte, Kino	pers. Qualifex	3832	0.150	0.055	0.138	0.036
Restaurant	pers. Qualifex	17847	0.252	0.114	0.205	0.062
Schule	Punkt Hermes	94926	0.158	0.044	0.114	0.038
Schule/Kindergarten	pers. Qualifex	1298	0.085	0.073	0.043	0.037
Spital/Doktor	pers. Qualifex	2406	0.235	0.089	0.204	0.043
Sport	pers. Qualifex	8863	0.176	0.066	0.161	0.038
Tram	pers. Qualifex	8803	0.370	0.177	0.319	0.058
Tram	Langzeit	7560	0.369	0.196	0.299	0.096
Tram	Pilot 2014	6030	0.691	0.579	0.366	0.072
zu Besuch	pers. Qualifex	64009	0.166	0.067	0.115	0.048
zu Hause	pers. Qualifex	688940	0.194	0.128	0.071	0.066
zu Hause	Punkt Qualifex	166	0.200	0.177	0.011	0.086
Zug	pers. Qualifex	8512	0.661	0.158	0.640	0.045
Zug	Langzeit	24343	0.579	0.074	0.574	0.043
Zug	Pilot 2014	95777	0.460	0.263	0.373	0.039

An Aussenplätzen (Tabelle 15) stammt der Hauptbeitrag an der Hochfrequenzexposition von den Mobilfunkbasisstationen (Downlink). Die höchsten Expositionen (0.34-0.53 V/m) wurden in den Stadtzentren und in einem Industriegebiet gemessen. Am geringsten sind die Expositionen typischerweise in den ländlichen und dezentralen Wohngebieten. Die Messwerte im Pilot 2014 für Stadtzentrum, zentrales und dezentrales städtisches Wohngebiet sind etwas höher als die entsprechenden Messungen in Basel in der Vertiefungs- und Langzeiterhebung. Vergleicht man die verschiedenen Arten von Wohngebieten, ist insbesondere im Pilot 2014 mit zunehmender Urbanisierung eine Zunahme der HF-EMF-Exposition zu verzeichnen. Im Durchschnitt am grössten ist die Exposition in zentralen städtischen Wohngebieten und am geringsten in ländlichen Wohngebieten. Dazwischen liegen die dezentralen städtischen Wohngebiete. Am höchsten ist die Exposition jedoch in den Industriegebieten.

Tabelle 15: Überblick über mittlere HF-EMF-Expositionen in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen draussen aus verschiedenen Messkampagnen (alle Messwerte in V/m).

Ort	Daten	Anzahl Messwerte	HF-EMF	Downlink	Uplink	Rundfunk
Bahnhof	Langzeit	19889	0.290	0.209	0.195	0.052
Bus Station	Langzeit	5047	0.240	0.173	0.161	0.057
dezentrales Wohngebiet	Vertiefungsstudie	15981	0.209	0.206	0.044	0.037
dezentrales Wohngebiet	Langzeit	10808	0.196	0.191	0.042	0.046
dezentrales Wohngebiet	Pilot 2014	5012	0.254	0.237	0.017	0.088
Dorfzentrum	Pilot 2014	17028	0.229	0.219	0.022	0.059
draussen	pers. Qualifex	74016	0.284	0.205	0.162	0.097
Geschaeftsviertel	Vertiefungsstudie	7666	0.303	0.293	0.073	0.051
Industrie	Pilot 2014	5043	0.527	0.511	0.012	0.120
Kleinstadt	Langzeit	6381	0.139	0.119	0.059	0.047
Stadtzentrum	Vertiefungsstudie	7701	0.343	0.324	0.098	0.067
Stadtzentrum	Langzeit	5989	0.467	0.451	0.085	0.086
Stadtzentrum	Pilot 2014	6541	0.473	0.463	0.039	0.075
Tram Station	Langzeit	5650	0.326	0.299	0.111	0.052
Wohngebiet	Pilot 2014	13433	0.227	0.214	0.011	0.071
zentrales Wohngebiet	Vertiefungsstudie	9834	0.196	0.181	0.075	0.045
zentrales Wohngebiet	Langzeit	9953	0.204	0.193	0.060	0.048
zentrales Wohngebiet	Pilot 2014	4696	0.323	0.294	0.023	0.129

In Abbildung 25 sind die Beiträge von Downlink, Uplink und Rundfunk an der gesamten HF-EMF-Exposition aufgrund der Messungen im Pilot 2014 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass an den Aussenplätzen Emissionen von Mobilfunkbasisstationen den Hauptbeitrag bilden. In öffentlichen Verkehrsmitteln spielt der Uplink von den Mobiltelefonen ebenfalls eine wichtige Rolle. Im Bus und Tram sind noch geringe andere Beiträge ersichtlich (in rot). Dabei handelt es sich hauptsächlich um W-LAN, das teilweise in diesen Fahrzeugen zur Verfügung steht. Die entsprechenden Beiträge zur Gesamtexposition sind jedoch gering im Vergleich zum Mobilfunk.

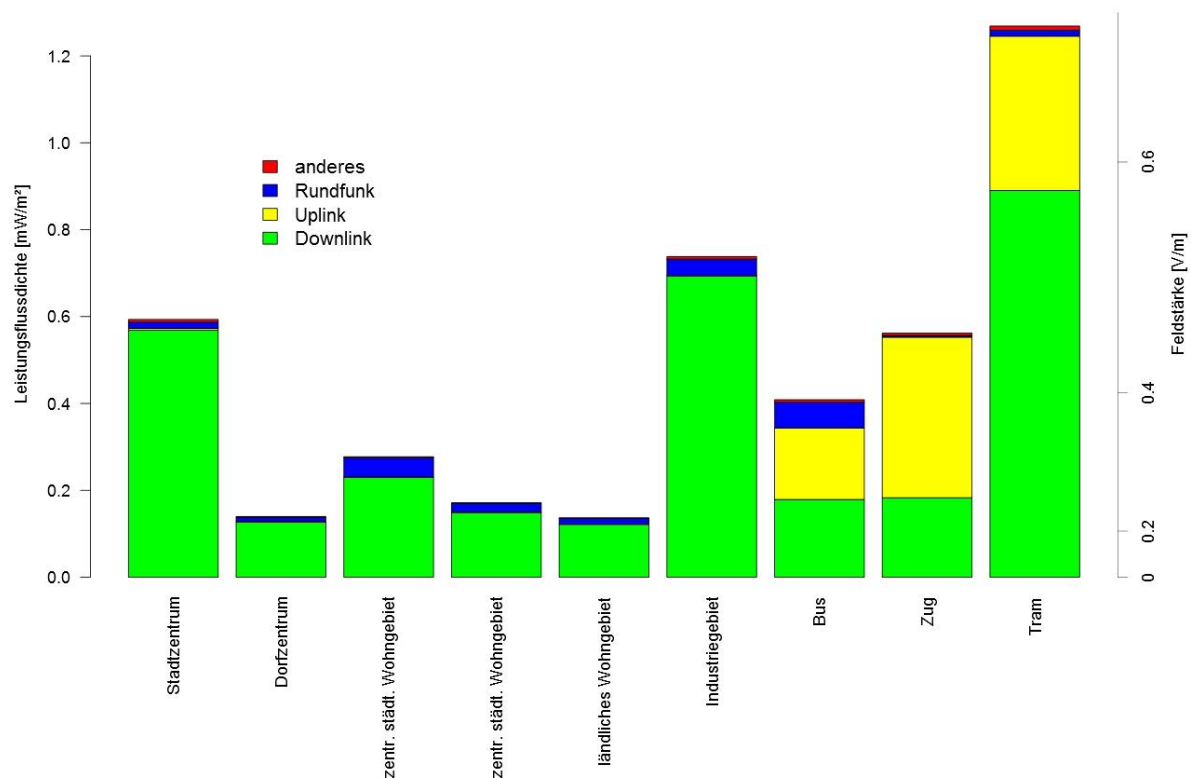


Abbildung 25: Beiträge der einzelnen Funkanwendungen an die mittlere Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen (Pilot 2014). Man beachte, dass die Quellenbeiträge nur in Einheiten der Leistungsflussdichte additiv sind, d. h. die Feldstärkeskala gilt nur für den Gesamtwert bzw. für die unterste Kategorie (Downlink).

Separiert nach den einzelnen Frequenzbändern (Abbildung 26) stammen an den Aussenplätzen die Hauptbeiträge vom Downlink im 900er und 1800er Frequenzband. Der Downlink im 2100er Band ist häufig weniger dominant, erreicht aber in Industriegebieten auch einen substantziellen Anteil. Kaum gemessen werden an Aussenplätzen 800er und 2600er LTE Bänder, sowie DECT- und W-LAN-Expositionen. Abbildung 27 zeigt die geometrischen Mittelwerte für die verschiedenen Typen von Mikroumgebungen.

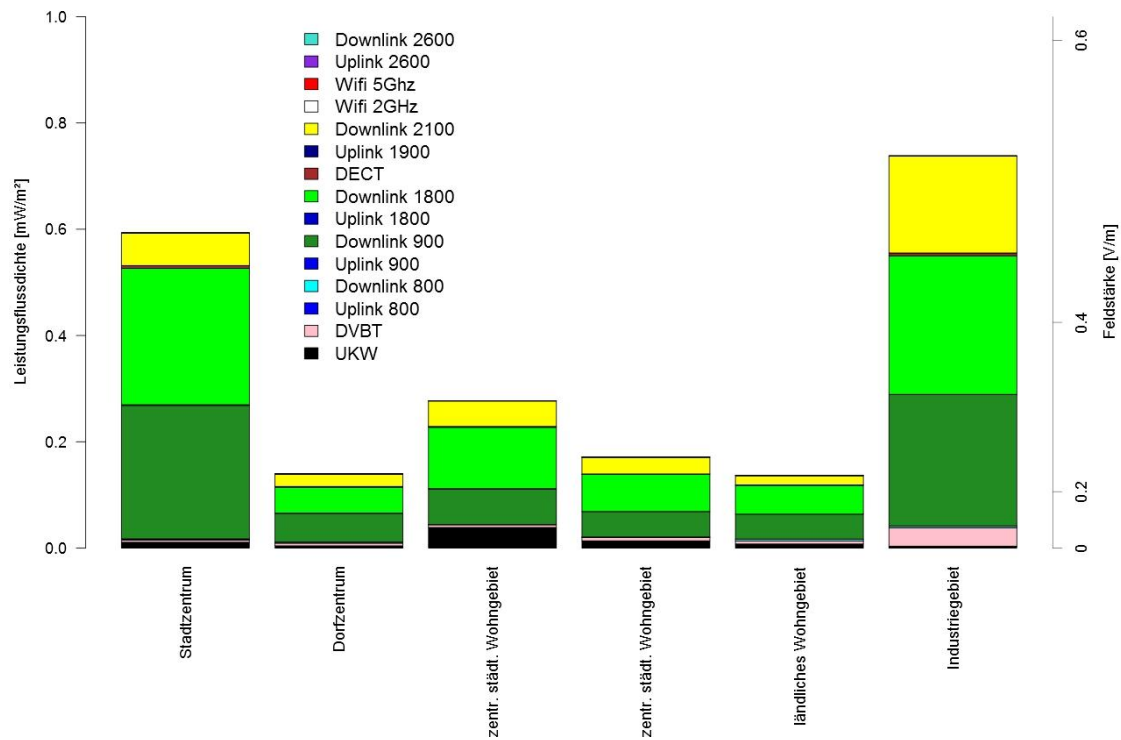


Abbildung 26: Beiträge der einzelnen Frequenzbänder an die mittlere Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen (Pilot 2014). Man beachte, dass die Beiträge nur in Einheiten der Leistungsflussdichte additiv sind.

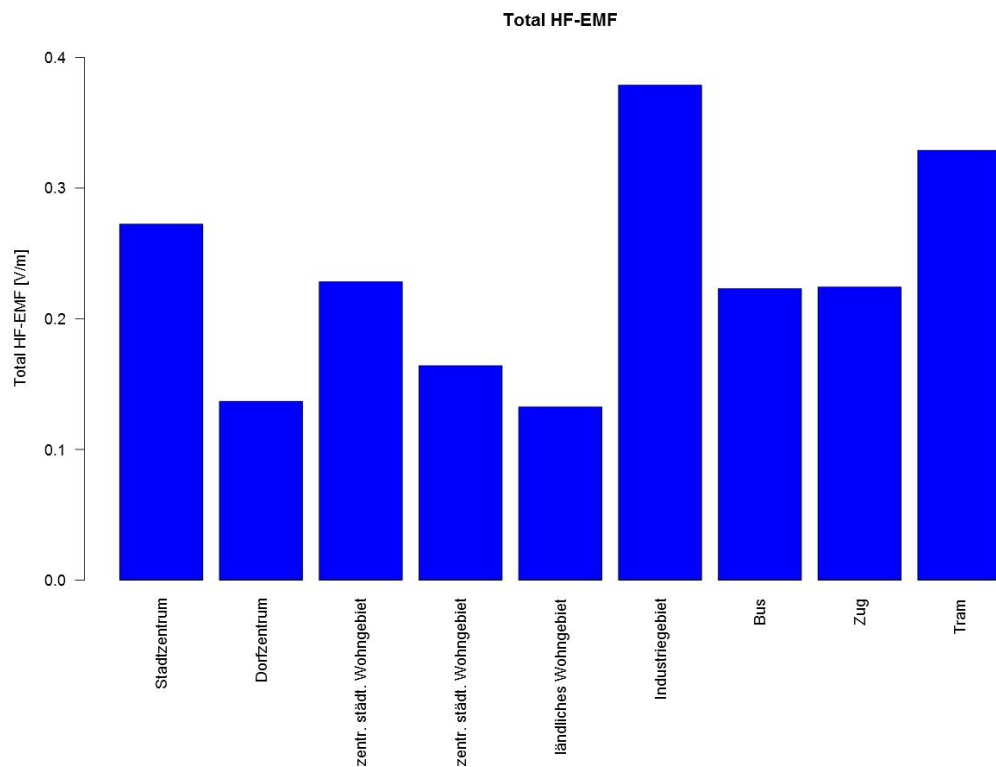


Abbildung 27: Geometrische Mittelwerte der Exposition für das gesamte HF-EMF in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen (Pilot 2014).

5.2 Variation der HF-EMF-Exposition zwischen Mikroumgebungen vom gleichen Typ

In diesem Kapitel wird evaluiert, wie stark mittlere HF-EMF Expositionen zwischen verschiedenen Mikroumgebungen vom gleichen Typ (z.B. Wohnungen, Arbeitsplätze, Stadtzentren oder Wohngebiete) variieren. Untersucht wird beispielsweise, wie vergleichbar oder unterschiedlich dezentrale Wohngebiete in derselben Stadt oder in verschiedenen Städten exponiert sind. Solche Kenntnisse sind nötig, um abschätzen zu können, wie viele Mikroumgebungen vom gleichen Typ gemessen werden müssen, um eine Aussage über die typische Belastung dieses Typs von Mikroumgebung machen zu können. Die Variation der HF-EMF-Exposition zwischen Mikroumgebungen vom gleichen Typ bestimmt auch die Anzahl nötiger Messungen für die Untersuchung von Zeittrends.

5.2.1 Literaturübersicht

In der französischen Probandenstudie wurde keine Aussage zu der Variabilität von HF-EMF zwischen Mikroumgebungen vom gleichen Typ gemacht. In der Publikation von Joseph et al. (2010) wurde die HF-EMF-Exposition in gleichen Typen von Mikroumgebungen aus fünf Ländern (Belgien, Holland, Ungarn, Slowenien und Schweiz) verglichen. Dabei ergaben sich teilweise sehr grosse Unterschiede zwischen den Ländern. Da jedoch die Daten in den fünf Ländern verschieden erhoben wurden, ist unklar, wie stark diese Unterschiede methodisch bedingt sind. Dennoch geben sie einen gewissen Hinweis, dass die Exposition innerhalb vom gleichen Typ Mikroumgebung sehr unterschiedlich sein kann.

In der holländischen Probandenstudie wurde für alle Aktivitäten das Verhältnis der niedrigsten zur höchsten mittleren gemessenen HF-EMF-Exposition pro Mikroumgebungstyp bzw. Aktivitätstyp (z.B. Schlafen, Staubsaugen, Einkaufen, Kirchenbesuch, Velo oder Zug Fahren) angegeben (Bolte und Eikelboom 2012). Auf der mW/m^2 -Skala war dies typischerweise mehr als ein Faktor 1000. Die Unterschiede waren aber auch so hoch, weil bei kurzen Aktivitäten (<10 Minuten) gelegentlich keine Messwerte oberhalb der Nachweisgrenze waren und dann der Wert auf $6.63 \cdot 10^{-5} \text{ mW}/\text{m}^2$ ($0.005 \text{ V}/\text{m}$) gesetzt wurde.

5.2.2 Eigene Auswertungen

Wie stark die Exposition zwischen verschiedenen Wohnungen oder verschiedenen Schulzimmern variiert, wurde anhand von Narda-7-Punktmessungen in der QUALIFEX-Studie und anhand von EME SPY 120 Messungen in der HERMES-Studie evaluiert (Tabelle 16). Die 7-Punktmessung lehnt sich an ein Messprotokoll von CENELEC an (CENELEC

2008). Dabei wird in der Mitte des Raums auf einer Höhe von 1.1 m, 1.5 m und 1.7 m gemessen, sowie in jeder Ecke des Raums 1.5 m ab Boden und 1 m von den beiden Wänden entfernt (Detailbeschreibung siehe Abbildung 62). Die mittlere HF-EMF-Exposition von allen Probanden der QUALIFEX-Studie war im Schlafzimmer 0.20 V/m. Im Kollektiv der nicht-selektierten Probanden war diese 0.12 V/m. In den Schulen wurde im Mittel 0.13 V/m im ersten Jahr und 0.16 V/m im zweiten Jahr gemessen. Der Hauptbeitrag in QUALIFEX stammte vom Downlink, während es in den Schulen Uplink und W-LAN waren. Es ist ersichtlich, dass in der gesamten QUALIFEX-Stichprobe die Variation für die gesamte HF-EMF, für Downlink und Rundfunk relativ gross ist. Das liegt daran, dass gezielt Teilnehmende an potentiell stark durch Mobilfunkbasisstationen oder Rundfunksendern exponierten Orten ausgesucht wurden. Deutlich niedriger ist die Variation in der nicht-selektierten Stichprobe. Diese nicht-selektierte Stichprobe gibt einen besseren Eindruck für die zu erwartende Datenvariation in einer zufällig ausgewählten Bevölkerungsstichprobe. Deutlich geringer waren die Expositionswerte in Schulzimmern. Deren Variation ist im Allgemeinen eher geringer als in der QUALIFEX-Studie; einzig für Uplink und W-LAN (die Hauptbeiträge in der Schule), ist sie etwas höher.

Tabelle 16: Variation der mittleren Exposition in verschiedenen Schlafzimmern (QUALIFEX-Studie) und Schulzimmern (HERMES-Studie) (Punktmessungen; alle Messwerte in V/m, ausser der Variationskoeffizient CV [=SD/Mittelwert]).

Frequenzband	Messkampagne	Anzahl Räume	Mittelwert	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert plus SD	CV
Total	Qualifex, alle	144	0.200	0.012	0.041	0.071	0.156	1.153	0.411	3.237
Downlink	Qualifex, alle	144	0.177	0.005	0.022	0.039	0.101	1.140	0.395	4.006
Uplink	Qualifex, alle	144	0.011	0.002	0.009	0.010	0.011	0.023	0.015	0.795
Rundfunk	Qualifex, alle	144	0.086	0.011	0.021	0.031	0.058	0.386	0.178	3.275
Total	Qualifex, nicht-selektiert	116	0.119	0.012	0.038	0.063	0.105	0.446	0.212	2.192
Downlink	Qualifex, nicht-selektiert	116	0.098	0.005	0.021	0.034	0.064	0.444	0.193	2.924
Uplink	Qualifex, nicht-selektiert	116	0.011	0.002	0.009	0.010	0.012	0.023	0.015	0.818
Rundfunk	Qualifex, nicht-selektiert	116	0.058	0.011	0.021	0.028	0.050	0.324	0.117	3.128
Total	Hermes, 1. Jahr	22	0.131	0.007	0.085	0.122	0.156	0.215	0.175	0.793
Downlink	Hermes, 1. Jahr	22	0.021	0.016	0.016	0.016	0.016	0.047	0.031	1.237
Uplink	Hermes, 1. Jahr	22	0.111	0.016	0.043	0.086	0.149	0.195	0.156	0.962
Rundfunk	Hermes, 1. Jahr	22	0.018	0.012	0.016	0.016	0.016	0.039	0.025	0.892
W-LAN	Hermes, 1. Jahr	22	0.062	0.012	0.016	0.032	0.058	0.187	0.107	1.963
Total	Hermes, 2. Jahr	23	0.156	0.012	0.054	0.107	0.173	0.342	0.233	1.237
Downlink	Hermes, 2. Jahr	23	0.042	0.012	0.016	0.016	0.020	0.153	0.081	2.801
Uplink	Hermes, 2. Jahr	23	0.102	0.010	0.040	0.067	0.103	0.281	0.166	1.648
Rundfunk	Hermes, 2. Jahr	23	0.029	0.016	0.016	0.016	0.016	0.102	0.055	2.550
W-LAN	Hermes, 2. Jahr	23	0.114	0.012	0.033	0.060	0.084	0.296	0.191	1.798

Tabelle 17: Variation der mittleren Exposition in Innenräumen und Verkehrsmitteln (personenbezogene Messungen; alle Messwerte in V/m, ausser der Variationskoeffizient CV [=SD/Mittelwert]).

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Dauer [Min]	Anzahl Räume	Mittelwert	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert	
										plus SD	CV
Total	zuhaus	224	1563	0.202	0.010	0.060	0.097	0.191	1.201	0.376	2.472
Downlink	zuhaus	224	1563	0.129	0.007	0.016	0.022	0.081	0.885	0.271	3.397
Uplink	zuhaus	224	1563	0.054	0.005	0.016	0.016	0.022	0.580	0.137	5.477
Rundfunk	zuhaus	224	1563	0.066	0.006	0.016	0.016	0.053	0.641	0.146	3.900
Total	Arbeitsplatz	145	792	0.246	0.016	0.062	0.104	0.192	1.643	0.507	3.257
Downlink	Arbeitsplatz	145	792	0.080	0.008	0.016	0.040	0.079	0.321	0.137	1.905
Uplink	Arbeitsplatz	145	792	0.131	0.008	0.016	0.016	0.058	0.922	0.300	4.254
Rundfunk	Arbeitsplatz	145	792	0.133	0.010	0.016	0.016	0.017	1.533	0.397	7.879
Total	Restaurants	101	247	0.254	0.016	0.074	0.128	0.222	1.004	0.455	2.207
Downlink	Restaurants	101	247	0.107	0.016	0.016	0.052	0.096	0.654	0.212	2.919
Uplink	Restaurants	101	247	0.201	0.016	0.016	0.037	0.119	1.004	0.412	3.216
Rundfunk	Restaurants	101	247	0.050	0.016	0.016	0.016	0.016	0.478	0.139	6.693
Total	Sport/Schwimmbad	153	86	0.163	0.016	0.016	0.076	0.127	0.611	0.295	2.267
Downlink	Sport/Schwimmbad	153	86	0.068	0.016	0.016	0.016	0.050	0.283	0.127	2.524
Uplink	Sport/Schwimmbad	153	86	0.134	0.011	0.016	0.016	0.073	0.611	0.269	3.032
Rundfunk	Sport/Schwimmbad	153	86	0.022	0.016	0.016	0.016	0.016	0.090	0.041	2.277
Total	Konzert/Kino/Theater	155	38	0.145	0.016	0.016	0.052	0.107	0.726	0.325	4.064
Downlink	Konzert/Kino/Theater	155	38	0.043	0.016	0.016	0.016	0.028	0.159	0.079	2.369
Uplink	Konzert/Kino/Theater	155	38	0.132	0.016	0.016	0.018	0.059	0.726	0.320	4.895
Rundfunk	Konzert/Kino/Theater	155	38	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.038	0.023	0.719
Total	Kirchen	84	12	0.103	0.016	0.034	0.056	0.071	0.240	0.174	1.824
Downlink	Kirchen	84	12	0.066	0.016	0.016	0.016	0.032	0.211	0.131	2.912
Uplink	Kirchen	84	12	0.023	0.016	0.016	0.016	0.016	0.053	0.036	1.399
Rundfunk	Kirchen	84	12	0.072	0.016	0.016	0.016	0.024	0.231	0.143	2.910
Total	Flughafen	86	3	0.385	0.060	0.088	0.109	0.470	0.656	0.626	1.642
Downlink	Flughafen	86	3	0.040	0.016	0.016	0.016	0.047	0.065	0.062	1.453
Uplink	Flughafen	86	3	0.378	0.016	0.016	0.016	0.463	0.655	0.625	1.729
Rundfunk	Flughafen	86	3	0.055	0.016	0.025	0.031	0.067	0.089	0.086	1.391
Total	Spital/Doktor	81	41	0.225	0.016	0.016	0.112	0.182	0.831	0.427	2.585
Downlink	Spital/Doktor	81	41	0.100	0.016	0.016	0.043	0.081	0.376	0.189	2.552
Uplink	Spital/Doktor	81	41	0.125	0.016	0.016	0.016	0.044	0.708	0.306	5.003
Rundfunk	Spital/Doktor	81	41	0.034	0.016	0.016	0.016	0.016	0.082	0.055	1.643
Total	Hochschulen	131	30	0.168	0.016	0.093	0.136	0.185	0.347	0.244	1.101
Downlink	Hochschulen	131	30	0.065	0.016	0.016	0.057	0.064	0.161	0.100	1.361
Uplink	Hochschulen	131	30	0.132	0.016	0.029	0.069	0.157	0.346	0.213	1.605
Rundfunk	Hochschulen	131	30	0.053	0.016	0.016	0.016	0.051	0.185	0.098	2.367
Total	Grundschulen/Kindergarten	122	15	0.085	0.016	0.030	0.063	0.085	0.222	0.140	1.685
Downlink	Grundschulen/Kindergarten	122	15	0.075	0.016	0.016	0.016	0.063	0.218	0.133	2.168
Uplink	Grundschulen/Kindergarten	122	15	0.025	0.016	0.016	0.016	0.019	0.064	0.040	1.594
Rundfunk	Grundschulen/Kindergarten	122	15	0.030	0.016	0.016	0.016	0.040	0.052	0.042	0.984
Total	Zuege	75	134	0.678	0.062	0.351	0.522	0.786	1.896	0.997	1.160
Downlink	Zuege	75	134	0.165	0.016	0.044	0.072	0.132	0.722	0.303	2.383
Uplink	Zuege	75	134	0.648	0.016	0.316	0.479	0.738	1.896	0.976	1.268
Rundfunk	Zuege	75	134	0.032	0.016	0.016	0.016	0.016	0.139	0.058	2.336
Total	Tram/Bus	49	68	0.316	0.016	0.165	0.216	0.313	0.898	0.497	1.472
Downlink	Tram/Bus	49	68	0.188	0.016	0.100	0.155	0.192	0.547	0.293	1.439
Uplink	Tram/Bus	49	68	0.234	0.016	0.016	0.079	0.204	0.872	0.443	2.589
Rundfunk	Tram/Bus	49	68	0.038	0.016	0.016	0.016	0.042	0.104	0.060	1.564
Total	Auto	73	233	0.307	0.016	0.073	0.121	0.201	1.680	0.611	2.959
Downlink	Auto	73	233	0.112	0.016	0.053	0.083	0.123	0.384	0.174	1.426
Uplink	Auto	73	233	0.246	0.016	0.016	0.016	0.036	1.674	0.569	4.357
Rundfunk	Auto	73	233	0.040	0.016	0.016	0.016	0.041	0.222	0.077	2.585

Für weitere Mikroumgebungen im Innern von Gebäuden oder in Verkehrsmitteln wurde die Variation anhand der QUALIFEX-Daten evaluiert. Dabei wurde aufgrund der Tagebucheinträge für alle Perioden, für die mindestens 20 aufeinanderfolgende Messwerte (entspricht 30 Minuten Aufenthaltsdauer bei 90 s Messintervallen) vorhanden waren, der Mittelwert berechnet. In Tabelle 17 sind diese Mittelwerte und einige statistische Parameter

ihrer Verteilung dargestellt. Zum Teil handelt es sich dabei um Mehrfachmessungen der gleichen Probanden an den gleichen Orten (im Tagebuch ist nur die Art der Lokalität registriert, aber nicht der genaue Ort), so dass die Messungen nicht als unabhängig betrachtet werden können. Die Datenvariation von unabhängigen Messungen wird also mit diesem Vorgehen eher unterschätzt. Dennoch sind die Variationen zwischen den einzelnen Innenräumen erheblich. Möglicherweise könnte ein systematischer Punktmessungsansatz (wie bei Tabelle 16) die Datenvariation noch etwas reduzieren.

Abbildung 28 bis Abbildung 33 geben einen graphischen Überblick über die mittlere HF-EMF-Exposition in Mikroumgebungen des jeweils gleichen Typs in 5 Städten bzw. 15 Dörfern anhand der Messungen im Pilot 2014 (jeweils der Mittelwert von allen Messwerten an beiden Messtagen in der entsprechenden Mikroumgebung). Es handelt sich um Messungen im Freien. In den fünf Stadtzentren ist die HF-EMF-Exposition zwischen 0.38 und 0.59 V/m (Standardabweichung der Feldstärke: 0.09). Am höchsten ist sie in Lausanne (Abbildung 28). In den zentralen städtischen Wohngebieten ist die HF-EMF-Exposition eher etwas geringer als in den Stadtzentren (Abbildung 29) und liegt im Bereich 0.18 bis 0.42 V/m (Standardabweichung: 0.10). Insbesondere in Aarau und Neuenburg sind die Werte relativ tief. Noch tiefer sind die Werte in den dezentralen Wohngebieten der Städte, wobei dort die relativen Unterschiede zwischen den Städten grösser sind: 0.07 bis 0.37 mit einer Standardabweichung von 0.11 (Abbildung 30). In den ländlichen Gebieten sind die meisten HF-EMF Werte sowohl im Dorfzentrum (Abbildung 31) wie auch in den Wohngebieten (Abbildung 32) relativ tief. In den Dorfzentren ist die HF-EMF-Exposition zwischen 0.07 und 0.52 V/m (Standardabweichung: 0.11) und in den ländlichen Wohngebieten zwischen 0.05 und 0.46 V/m (Standardabweichung: 0.12). Auffällig ist die Gemeinde Pully, wo sowohl im Dorfzentrum (Abbildung 31) wie auch im Wohngebiet die Exposition im Bereich von 0.5 V/m liegt. Einige Gemeinden wie Nesslau, Gstaad, Gränichen und Brienz weisen in beiden Typen von Mikroumgebungen tiefe Werte auf. In den sechs gemessenen Industriegebieten fallen die tiefen Werte für die eher ländlich geprägten Orte Frick und Wattwil im Vergleich zu den anderen vier auf (Abbildung 33). Die gemessene HF-EMF-Expositionen liegt in diesem Typ Mikroumgebung zwischen 0.22 und 0.69 V/m (SD: 0.20).

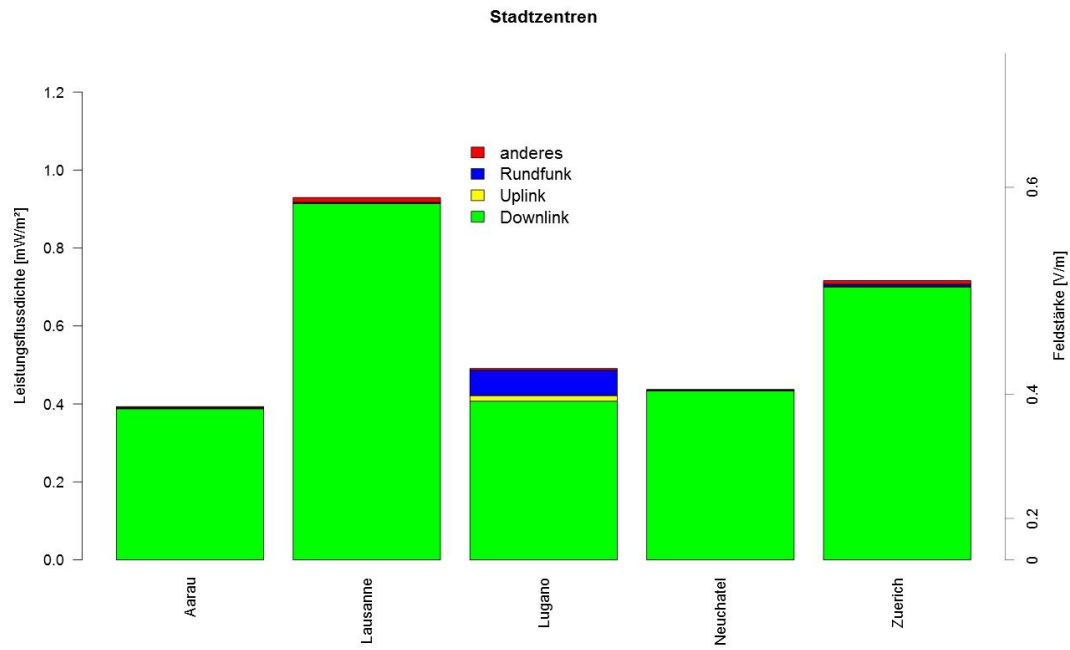


Abbildung 28: Mittlere HF-EMF-Exposition in den Zentren verschiedener Städte (Pilot 2014).

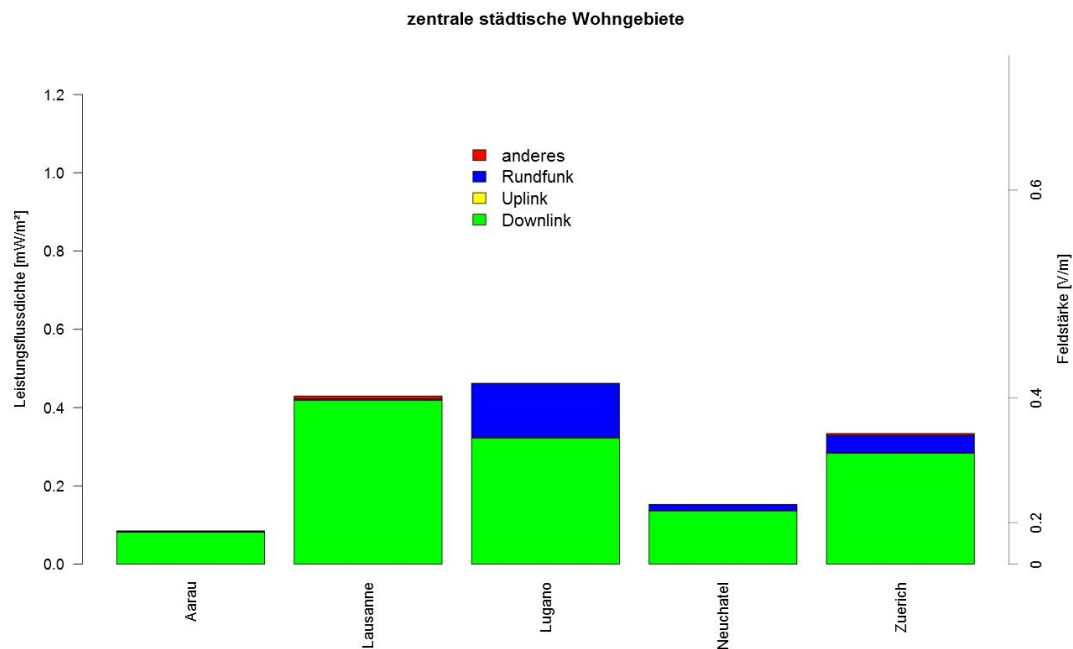


Abbildung 29: Mittlere HF-EMF-Exposition in den zentralen Wohngebieten verschiedener Städte (Pilot 2014).

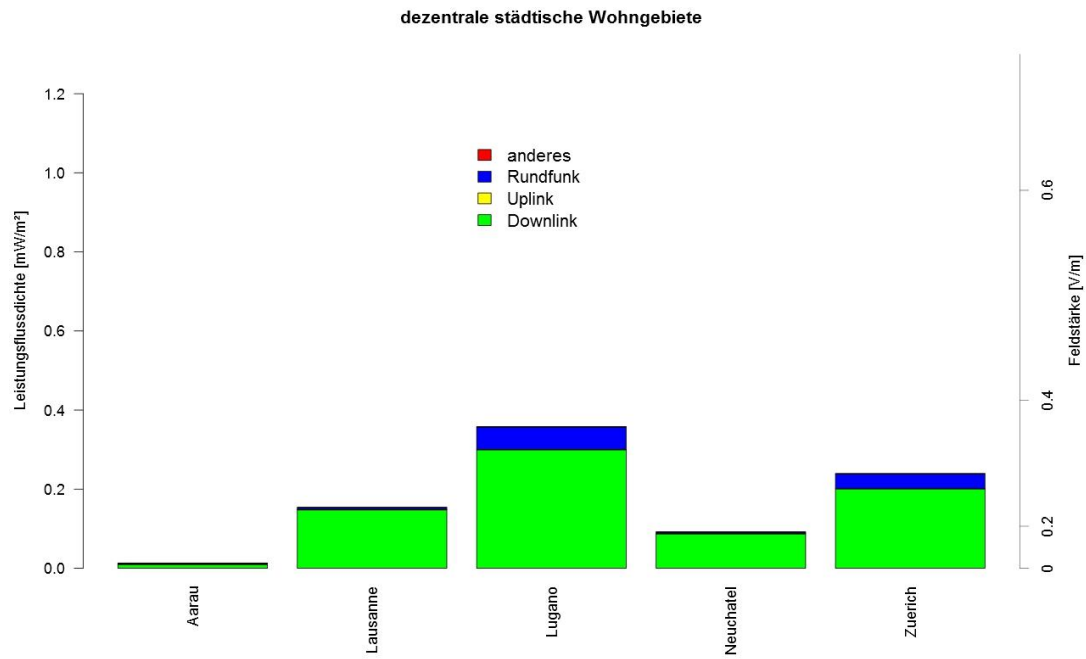


Abbildung 30: Mittlere HF-EMF-Exposition in den dezentralen Wohngebieten verschiedener Städte (Pilot 2014).

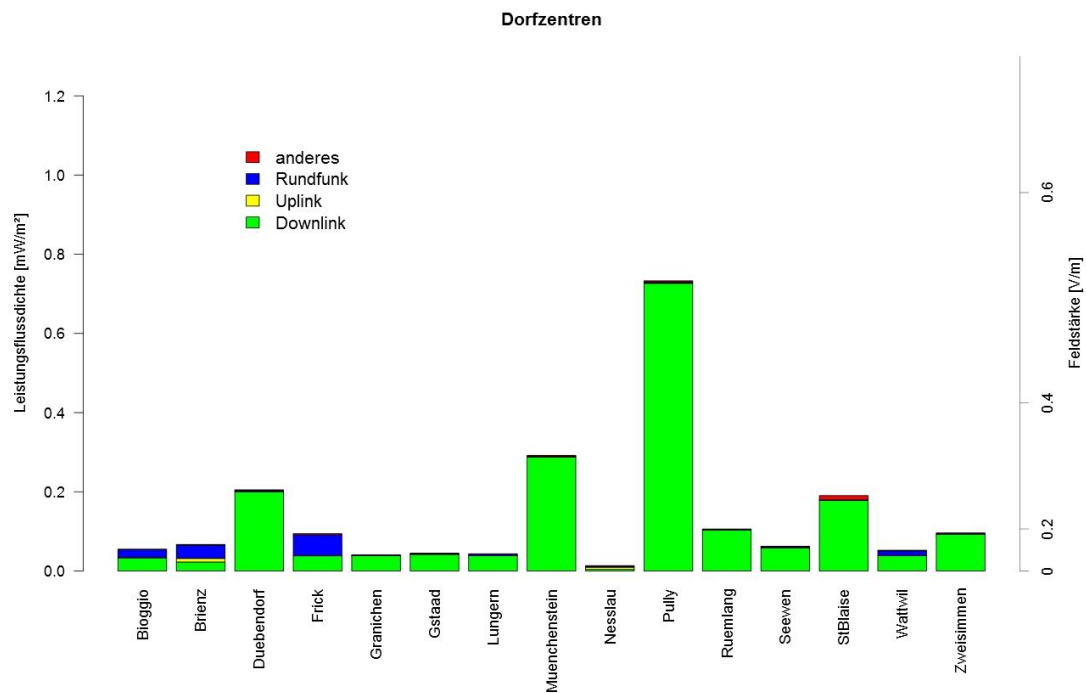


Abbildung 31: Mittlere HF-EMF-Exposition in den Zentren verschiedener Dörfer (Pilot 2014).

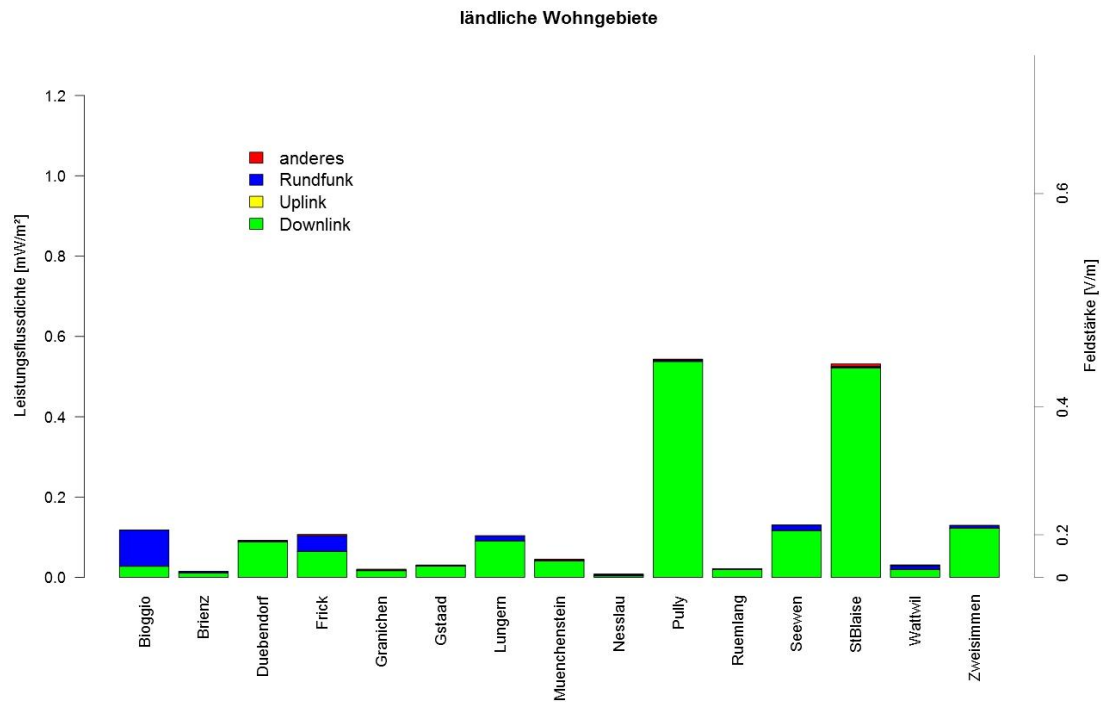


Abbildung 32: Mittlere HF-EMF-Exposition in den Wohngebieten verschiedener Dörfer (Pilot 2014).

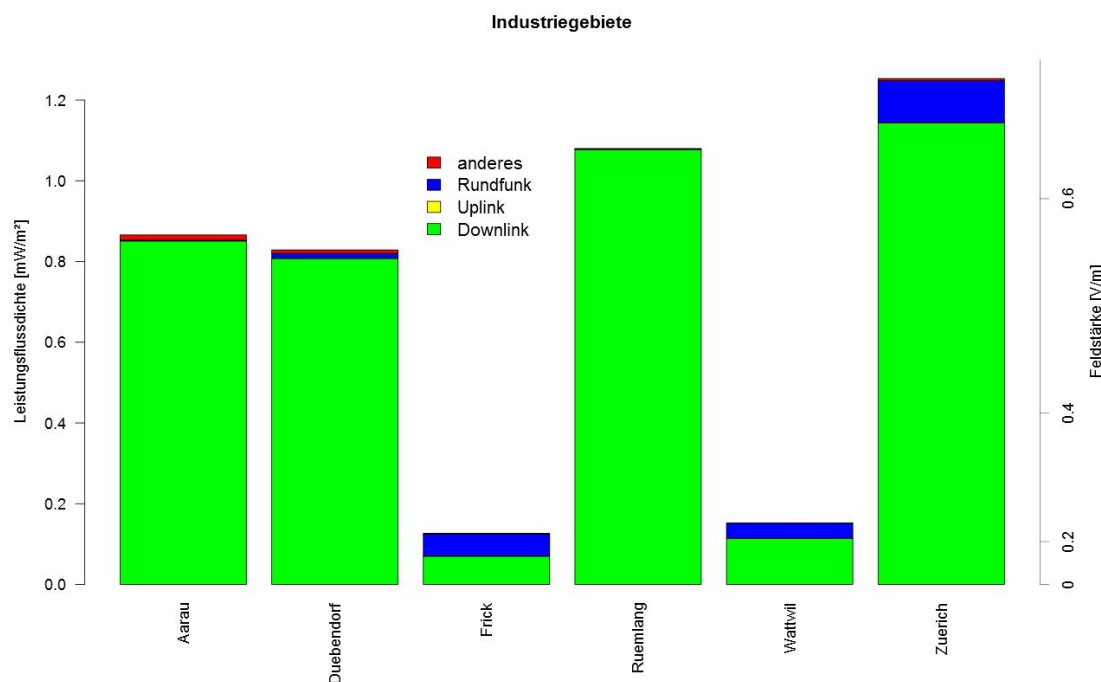


Abbildung 33: Mittlere HF-EMF-Exposition in den Industriegebieten verschiedener Gemeinden (Pilot 2014).

Für die geometrischen Mittelwerte ist das Muster relativ ähnlich wie für die arithmetischen Mittelwerte pro Gebiet. Dies trifft insbesondere für die städtischen Gebiete zu (Abbildung 34). Die geometrischen Mittelwerte liegen dort zwischen 0.19 und 0.39 V/m bei einer Standardabweichung von 0.08. Für zentrale städtische Wohngebiete liegen sie zwischen 0.08 und 0.36 V/m (SD: 0.11) und für dezentrale städtische Wohngebiete zwischen 0.04 und 0.28 V/m (SD: 0.09). In den Industriegebieten sind die Mittelwerte zwischen 0.16 und 0.51 V/m (SD: 0.14). In den ländlichen Gebieten ist für den geometrischen Mittelwert der Unterschied zwischen den einzelnen Dörfern weniger gross als für den arithmetischen Mittelwert (exemplarisch gezeigt für Wohngebiete in Abbildung 35). Für Dorfzentren liegen die geometrischen Mittelwerte zwischen 0.05 und 0.28 V/m (SD: 0.06), für ländliche Wohngebiete zwischen 0.05 und 0.20 V/m (SD: 0.05)

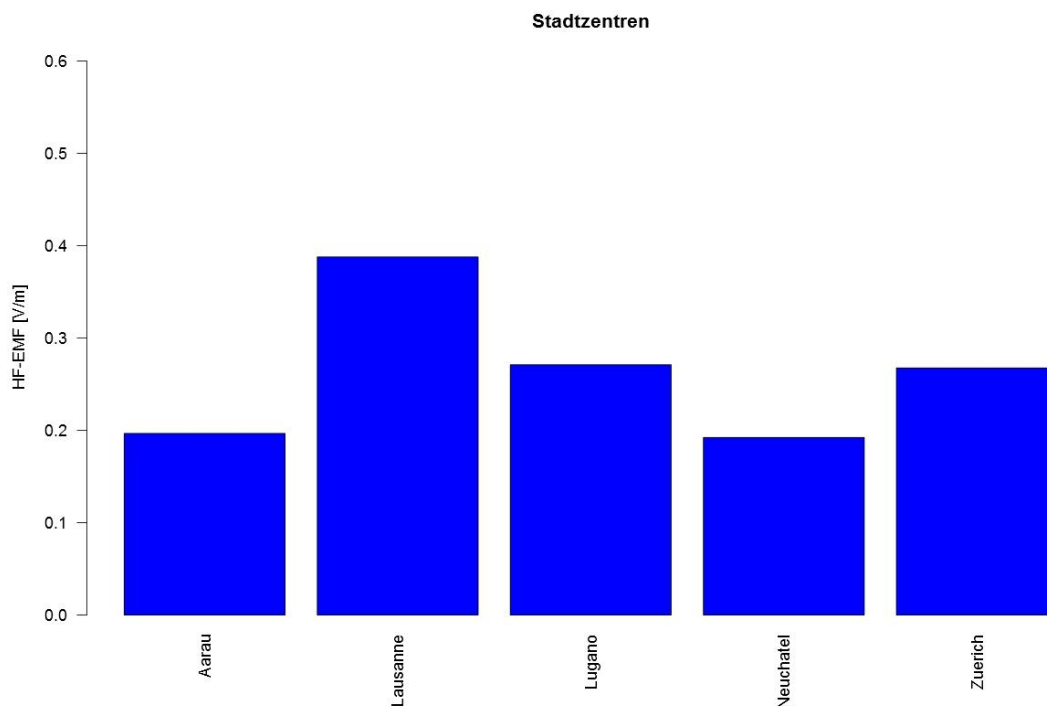


Abbildung 34: Geometrischer Mittelwert der HF-EMF-Exposition in den Zentren verschiedener Städte (Pilot 2014).

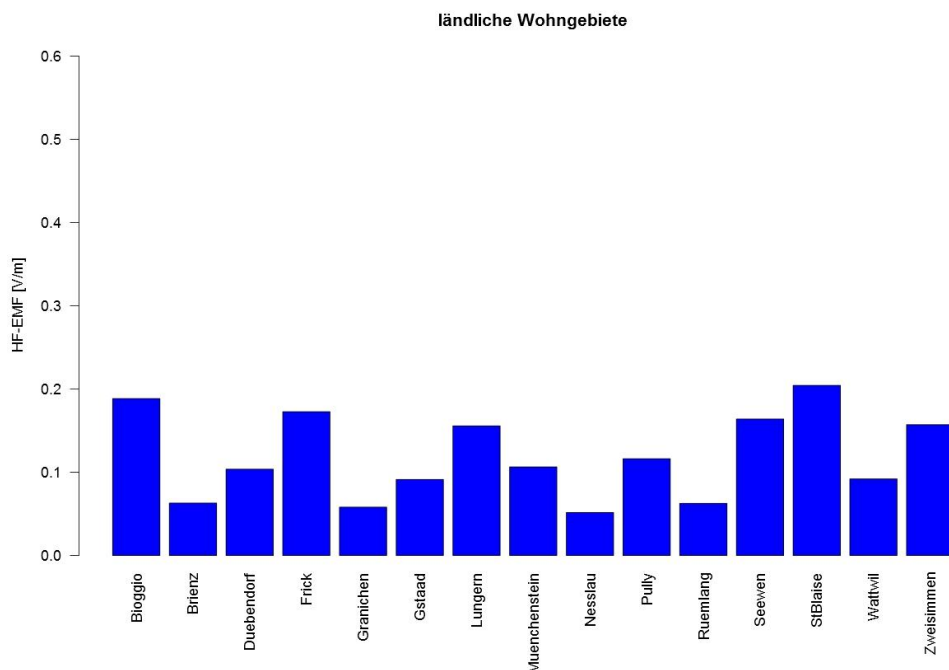


Abbildung 35: Geometrischer Mittelwert der HF-EMF-Exposition in den Wohngebieten verschiedener Dörfer (Pilot 2014).

Tabelle 18: Variation der mittleren Exposition in Mikroumgebungen desselben Typs (kombinierter Datensatz aus den Messungen des Pilots 2014 sowie den Vertiefungs- und Langzeitmessungen aus Basel) (alle Messwerte in V/m, ausser der Variationskoeffizient CV).

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Anzahl Mikro- umgebungen	Mittel- wert	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert plus SD	CV
Total	Stadtzentrum	8	0.439	0.303	0.375	0.418	0.480	0.592	0.527	0.437
Total	Dorfzentrum	16	0.225	0.071	0.137	0.156	0.219	0.525	0.342	1.311
Total	zentrales städt. Wohngebiet	7	0.300	0.179	0.200	0.240	0.379	0.417	0.390	0.686
Total	dezentrales städt. Wohngebiet	8	0.238	0.071	0.168	0.220	0.292	0.367	0.318	0.780
Total	ländliches Wohngebiet	15	0.220	0.056	0.099	0.186	0.216	0.452	0.336	1.337
Total	Industriegebiet	6	0.520	0.219	0.348	0.565	0.622	0.687	0.670	0.660
Downlink	Stadtzentrum	8	0.428	0.293	0.369	0.398	0.468	0.587	0.518	0.467
Downlink	Dorfzentrum	16	0.214	0.040	0.120	0.123	0.215	0.523	0.336	1.475
Downlink	zentrales städt. Wohngebiet	7	0.277	0.175	0.187	0.227	0.338	0.397	0.358	0.666
Downlink	dezentrales städt. Wohngebiet	8	0.226	0.061	0.164	0.214	0.278	0.336	0.298	0.741
Downlink	ländliches Wohngebiet	15	0.207	0.038	0.086	0.124	0.198	0.450	0.329	1.519
Downlink	Industriegebiet	6	0.505	0.162	0.329	0.559	0.620	0.656	0.658	0.696
Uplink	Stadtzentrum	8	0.061	0.017	0.022	0.055	0.077	0.098	0.086	0.987
Uplink	Dorfzentrum	16	0.026	0.005	0.007	0.011	0.018	0.059	0.043	1.777
Uplink	zentrales städt. Wohngebiet	7	0.042	0.008	0.020	0.031	0.048	0.075	0.062	1.213
Uplink	dezentrales städt. Wohngebiet	8	0.030	0.007	0.016	0.022	0.040	0.049	0.042	0.975
Uplink	ländliches Wohngebiet	15	0.011	0.005	0.006	0.007	0.010	0.026	0.017	1.468
Uplink	Industriegebiet	6	0.012	0.005	0.008	0.010	0.014	0.018	0.016	0.831
Rundfunk	Stadtzentrum	8	0.073	0.016	0.025	0.048	0.072	0.156	0.116	1.531
Rundfunk	Dorfzentrum	16	0.059	0.012	0.024	0.030	0.053	0.141	0.095	1.608
Rundfunk	zentrales städt. Wohngebiet	7	0.106	0.019	0.036	0.048	0.106	0.227	0.173	1.643
Rundfunk	dezentrales städt. Wohngebiet	8	0.073	0.023	0.036	0.039	0.071	0.146	0.115	1.443
Rundfunk	ländliches Wohngebiet	15	0.069	0.014	0.028	0.036	0.063	0.184	0.117	1.868
Rundfunk	Industriegebiet	6	0.115	0.021	0.041	0.097	0.137	0.198	0.168	1.131

Tabelle 18 gibt einen Überblick über die Mittelwerte und die Variabilität der Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen basierend auf den Messungen des Pilots 2014 sowie den Vertiefungs- und Langzeitmessungen aus Basel. Die Variabilität (CV) des totalen HF-EMF ist für die ländlichen Messungen am höchsten und für das Stadtzentrum am geringsten. Es ist ersichtlich, dass die Variabilität innerhalb des gleichen Typs Mikroumgebung für diese Aussenmessungen deutlich kleiner ist als für Innenraummessungen und Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln (Tabelle 16 und Tabelle 17).

5.3 Wiederholung von Exposimetermessungen auf demselben Messpfad

Das EMF weist eine hohe räumliche Variabilität auf (Bürgi et al. 2010). Schon innerhalb von wenigen Zentimetern kann die Feldstärke erheblich variieren. Es ist jedoch bei Mikroumgebungsmessungen weder möglich, den Messpfad millimetergenau zu replizieren, noch das Messintervall so zu synchronisieren, dass jeweils am genau gleichen Ort eine Messung aufgenommen wird. Damit stellt sich aus methodischer Sicht die Frage, wie reproduzierbar die Ergebnisse solcher Pfadmessungen sind. Im Hinblick auf ein zukünftiges Monitoring stellt sich weiter die Frage, inwiefern ein einmaliger Durchgang auf einem Messpfad für die Exposition entlang dieses Pfades repräsentativ ist. Dies beinhaltet einerseits die Reproduzierbarkeit der Messung unter gleichen Bedingungen. De facto kann diese empirisch jedoch nicht überprüft werden, weil sich die äusseren Bedingungen laufend ändern. Beispielsweise interagiert das Mobilfunknetz dynamisch mit dem Nutzungsverhalten im jeweiligen Gebiet, so dass sich die Expositionssituation laufend ändert. Aus diesem Grund interessiert insbesondere auch der Einfluss der variierenden äusseren Bedingungen auf das Messergebnis, wenn der gleiche Messpfad wiederholt vermessen wird. Im Folgenden wird dargestellt, wie gross die Variationen der Ergebnisse von Pfadmessungen zu verschiedenen Zeiten sind. Die Kenntnis dieser Streuung erlaubt es, die für den signifikanten Nachweis von längerfristigen Trends erforderliche Anzahl der Pfade und den Wiederholungsrhythmus von Pfadmessungen festzulegen.

5.3.1 Literaturübersicht

In der Vertiefungsmessung wurde die Wiederholbarkeit von HF-EMF Messungen auf dem gleichen Messpfad analysiert (Urbiniello et al. 2014a). In Abbildung 36 ist ersichtlich, dass Messungen der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen auf dem gleichen Messpfad, am

gleichen Wochentag, aber zu verschiedenen Tageszeiten innerhalb von zwei Monaten zu einem hohen Grad reproduzierbar sind.

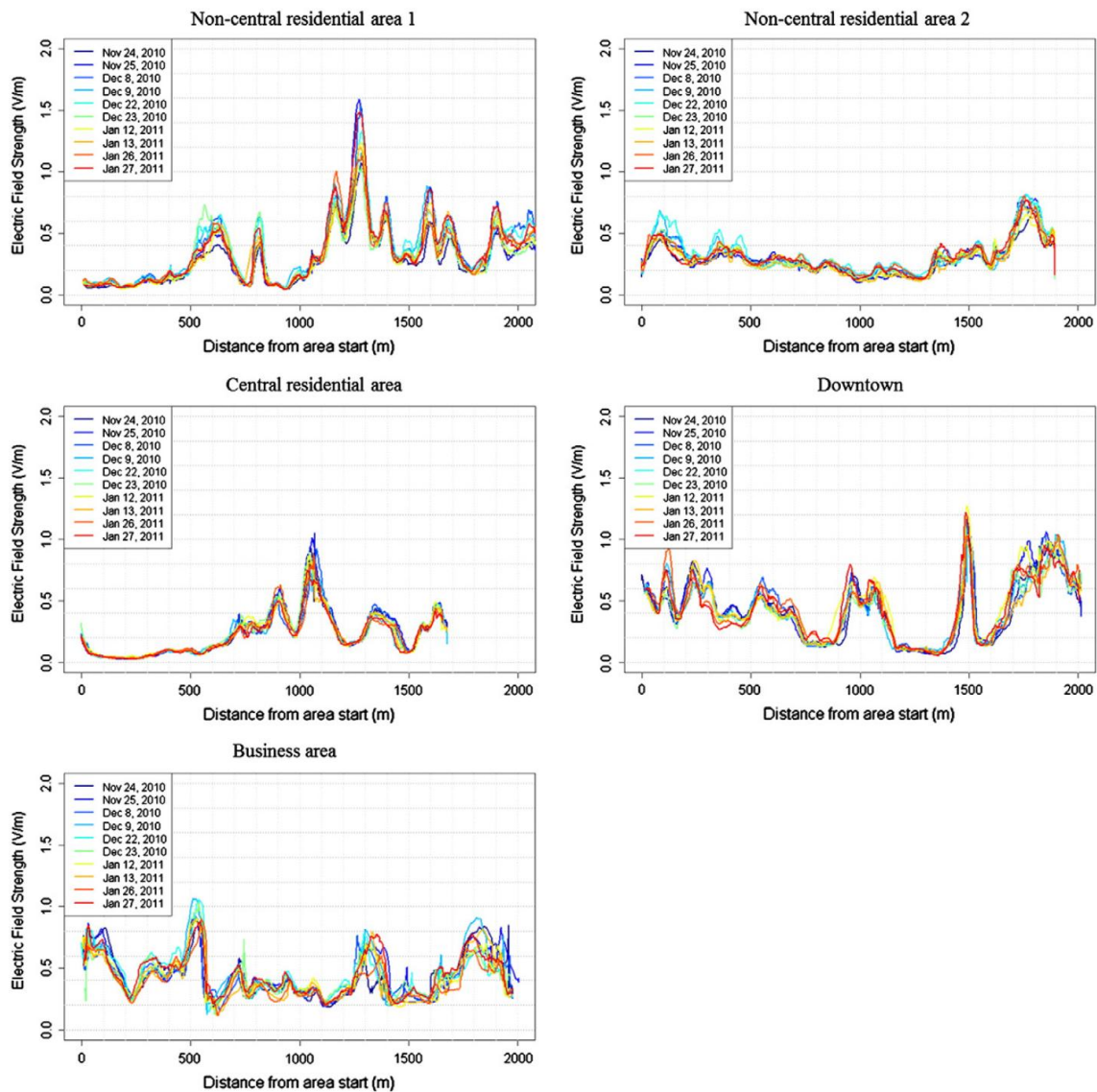


Abbildung 36: Wiederholte Pfadmessungen der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen auf dem jeweils gleichen Messpfad in verschiedenen Quartieren in Amsterdam zwischen November 2010 und Januar 2011 (Urbiniello et al. (2014a)).

Weiterführende Analysen zur Variation wiederholter Messungen von einzelnen Downlinkbändern innerhalb von einem grösseren Zeitraum von 10 Monaten (Beekhuizen et al. 2013) ergaben immer noch ein ähnliches Feldstärkeprofil entlang des Pfads, obwohl die Variabilität mit zunehmender Zeitspanne zwischen den Messungen zunimmt (Abbildung 37). Diese Zunahme der Variabilität ist zu erwarten, da sich mit grosser Wahrscheinlichkeit die Antennenkonfigurationen in diesem längeren Zeitraum verändert haben.

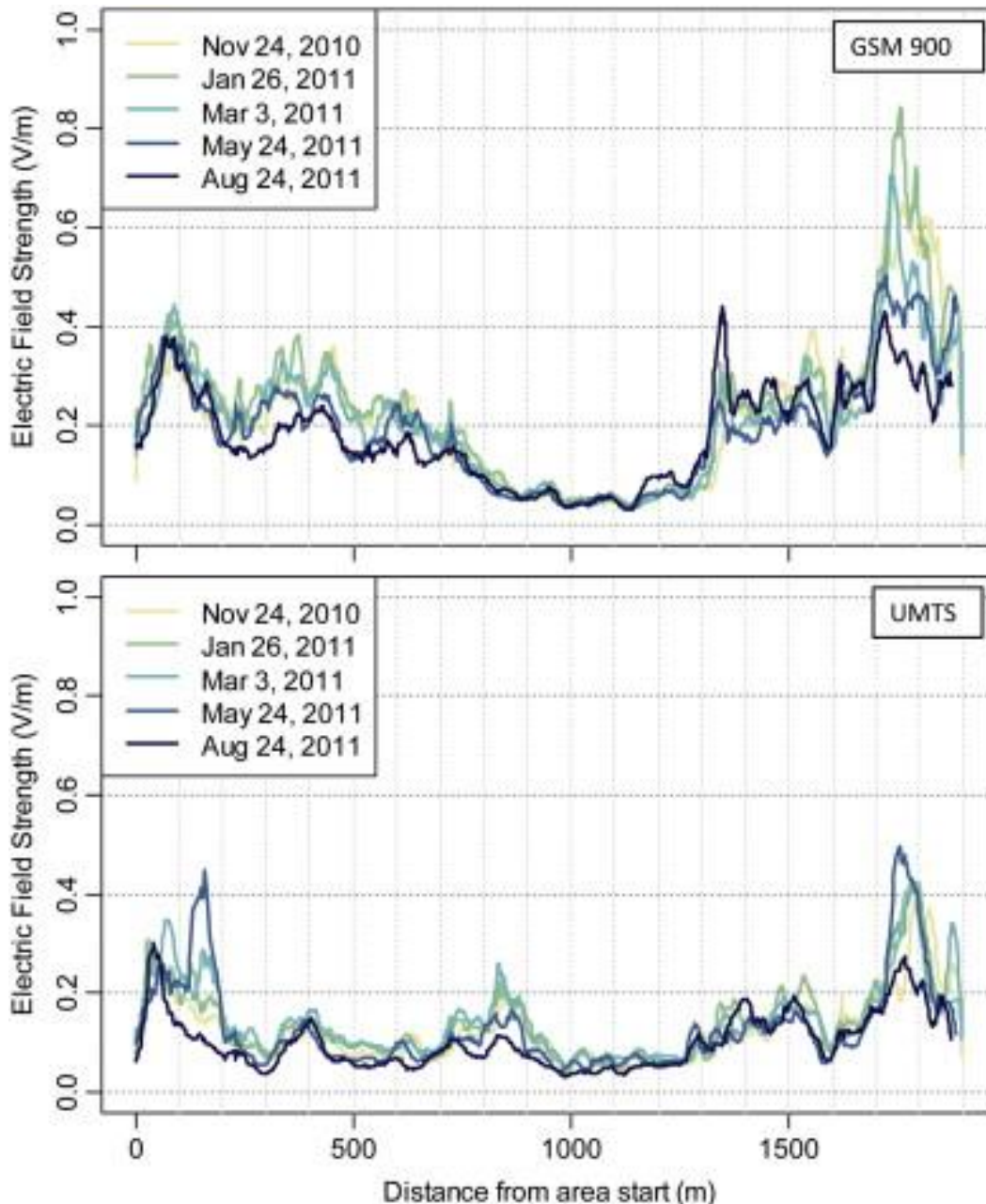


Abbildung 37: Wiederholte Exposimeter-Messungen der GSM900 und UMTS Downlinkbänder auf dem gleichen Messpfad durch verschiedene Stadtgebiete in Amsterdam zwischen November 2010 und August 2011 (von Beekhuizen et al. (2013)).

In der Qualifexstudie wurde bei 31 Personen nach 3 bis 41 Wochen eine zweite personenbezogene Erhebung durchgeführt. In der zweiten Messwoche lag die mittlere persönliche Exposition durchschnittlich tiefer als in der ersten Messwoche (Median der Differenzen: -0.08 V/m). Für die gesamte HF-EMF-Exposition war die Spearman'sche Rangkorrelation zwischen der ersten und zweiten Wochenmessung 0.61 (95%-KI: 0.32-0.79). Wurden nur die Erst- und Zweitmessungen zu Hause und im Schlafzimmer verglichen, betrug die Korrelation 0.74 (95%-VI: 0.52-0.87) für Messungen zu Hause und 0.81 (95%-VI:

0.63-0.91) für solche im Schlafzimmer. In Abbildung 38 sind die Korrelationen der Erst- und Zweitmessungen an verschiedenen Orten dargestellt. Weitergehende Untersuchungen zur Wiederholbarkeit von Exposimetermessungen wurden bisher nicht publiziert.

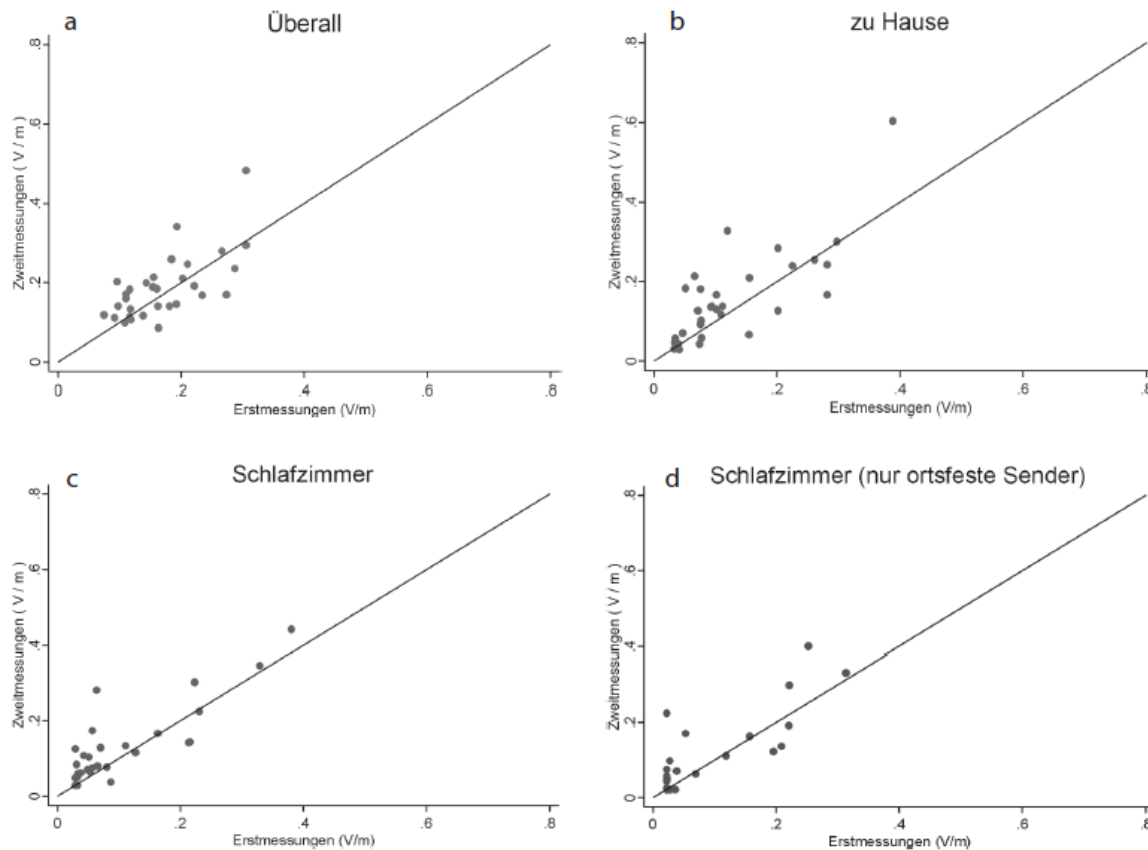


Abbildung 38: Vergleich der mittleren Exposition aufgrund von zwei Messungen im Abstand von 3 bis 41 Wochen (QUALIFEX-Studie; 31 Probanden; personenbezogene Mittelwerte des HF-EMF in a) bis c) und der Mobilfunk und Rundfunksender in d) während 1 Woche) (aus Mohler et al. (2009)).

5.3.2 Eigene Auswertungen

Im Rahmen der Vertiefungs- und der Langzeitmessung wurde die Wiederholbarkeit der Messungen pro Mikroumgebung in Basel innerhalb von einem bzw. zwei Jahren weiter evaluiert. In beiden Datensätzen standen dafür 24 Mittelwerte pro Mikroumgebung zur Verfügung, die bei der Vertiefungsstudie während zwei 3-Monatsperioden gesammelt wurden und bei der Langzeitstudie während zwei Jahren mit jeweils einem Messtag pro Monat (Details siehe Kapitel 3.2.2). Dabei wurde immer auf dem gleichen Messpfad gemessen. Von diesen 24 Mittelwerten wurden jeweils der arithmetische Mittelwert pro Mikroumgebung, sowie Minimum, unteres Quartil (25. Perzentil), Median, oberes Quartil (75.

Perzentil), Maximum, der Mittelwert plus/minus eine Standardabweichung (SD) und der Variationskoeffizient ($CV=SD/\text{Mittelwert}$) ihrer Verteilung berechnet (Tabelle 19). Alle Berechnungen wurden in mW/m^2 durchgeführt. Die Resultate, ausser dem Variationskoeffizienten, wurden anschliessend in die elektrische Feldstärke zurücktransformiert.

Tabelle 19: Variation von arithmetischen HF-EMF Mittelwerten pro Messpfad und Messtag in der Vertiefungsmessung in Basel für verschiedene Mikroumgebungen (Dauer bezieht sich auf die durchschnittliche Messdauer in einer Mikroumgebung pro Messtag; alle Werte in V/m , mit Ausnahme des Variationskoeffizienten CV)

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Dauer [Min]	Mittelwert	25. Min.	Perz.	Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert minus SD	Mittelwert plus SD	CV
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.096	0.075	0.081	0.094	0.104	0.126	0.079	0.110	0.325
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.290	0.222	0.260	0.288	0.304	0.352	0.253	0.322	0.235
Total EMF	zentrales Wohngebiet	28	0.195	0.147	0.189	0.197	0.206	0.225	0.174	0.213	0.198
Total EMF	Stadtkern	22	0.344	0.298	0.316	0.346	0.369	0.401	0.312	0.373	0.179
Total EMF	Geschaeftsviertel	22	0.304	0.278	0.294	0.301	0.317	0.326	0.289	0.318	0.094
Downlink	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.093	0.075	0.079	0.089	0.103	0.124	0.077	0.107	0.314
Downlink	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.287	0.222	0.260	0.285	0.302	0.350	0.251	0.319	0.235
Downlink	zentrales Wohngebiet	28	0.181	0.135	0.178	0.188	0.190	0.202	0.164	0.197	0.185
Downlink	Stadtkern	22	0.326	0.284	0.302	0.330	0.345	0.364	0.298	0.351	0.161
Downlink	Geschaeftsviertel	22	0.293	0.268	0.284	0.294	0.304	0.316	0.278	0.308	0.102
Uplink	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.039	0.035	0.036	0.036	0.038	0.067	0.030	0.046	0.421
Uplink	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.050	0.035	0.039	0.048	0.056	0.068	0.038	0.059	0.398
Uplink	zentrales Wohngebiet	28	0.073	0.035	0.051	0.064	0.080	0.126	0.038	0.096	0.725
Uplink	Stadtkern	22	0.098	0.035	0.088	0.096	0.106	0.147	0.072	0.118	0.457
Uplink	Geschaeftsviertel	22	0.072	0.035	0.061	0.070	0.083	0.092	0.058	0.085	0.367
Rundfunk	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.038	0.035	0.035	0.035	0.035	0.062	0.029	0.044	0.401
Rundfunk	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.037	0.035	0.035	0.035	0.037	0.044	0.034	0.039	0.128
Rundfunk	zentrales Wohngebiet	28	0.045	0.035	0.035	0.035	0.042	0.121	NaN	0.069	1.365
Rundfunk	Stadtkern	22	0.065	0.035	0.038	0.043	0.068	0.183	NaN	0.105	1.569
Rundfunk	Geschaeftsviertel	22	0.051	0.035	0.036	0.042	0.051	0.116	0.004	0.072	0.995

Es ist ersichtlich, dass die Variation der Messungen auf dem gleichen Messpfad für das gesamte HF-EMF und für Downlink ziemlich tief ist. Die Differenz zwischen dem unteren und dem oberen Quartil ist jeweils geringer als $0.1 \text{ V}/\text{m}$, oftmals sogar geringer als $0.05 \text{ V}/\text{m}$; der Mittelwert plus Standardabweichung ist jeweils weniger als $0.05 \text{ V}/\text{m}$ höher als der Mittelwert. Auch für Uplink und Rundfunk sind die absoluten Unterschiede gering, da die Werte selber sehr gering sind. Der Variationskoeffizient, bei dem die Variabilität mit dem Mittelwert standardisiert ist ($\text{Variationskoeffizient}=SD/\text{Mittelwert}$), zeigt jedoch, dass grundsätzlich die Variabilität für diese Expositionen höher ist und einzelne Messwerte einen grösseren Einfluss haben. Beim Uplink ist das zu erwarten. Beim Rundfunk kommt dieses Resultat daher zustande, dass viele Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze vom Expom3 Gerät lagen ($0.02 \text{ V}/\text{m}$) und deshalb einzelne Werte darüber einen merkbaren Einfluss auf den Mittelwert an einem Messtag haben.

Der arithmetische Mittelwert kann relativ stark durch einzelne hohe Messwerte beeinflusst werden. Aus diesem Grund wurden die gleichen Auswertungen auch für die geometrischen Mittelwerte pro Tag und Messpfad für die verschiedenen Mikroumgebungen durchgeführt. Geometrische Mittelwerte repräsentieren die ungefähr log-normalverteilten Messwerte auch besser. Es zeigt sich anhand der Variationskoeffizienten (CV), dass die Wiederholbarkeit der Messungen für geometrische Mittelwerte deutlich höher ist als für arithmetische Mittelwerte (Tabelle 19).

Tabelle 20: Variation von geometrischen HF-EMF Mittelwerten pro Messpfad und Messtag in der Vertiefungsmessung in Basel (Dauer bezieht sich auf die durchschnittliche Messdauer in einer Mikroumgebung pro Messtag; alle Messwerte in V/m mit Ausnahme des Variationskoeffizienten CV).

Frequenz- band	Typ Mikroumgebung	Dauer [Min]	Mittel- wert	25. Min.	25. Perz.	50. Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert minus SD	Mittelwert plus SD	CV
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.055	0.048	0.051	0.055	0.058	0.062	0.050	0.059	0.149
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.092	0.077	0.086	0.092	0.096	0.109	0.084	0.099	0.172
Total EMF	zentrales Wohngebiet	28	0.099	0.087	0.096	0.100	0.101	0.115	0.092	0.106	0.136
Total EMF	Stadtkern	22	0.250	0.227	0.236	0.249	0.259	0.280	0.234	0.265	0.123
Total EMF	Geschäftsviertel	22	0.217	0.194	0.207	0.216	0.225	0.238	0.205	0.229	0.109
Downlink	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.054	0.048	0.051	0.054	0.057	0.060	0.050	0.058	0.140
Downlink	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.090	0.077	0.085	0.091	0.094	0.108	0.082	0.098	0.174
Downlink	zentrales Wohngebiet	28	0.094	0.080	0.091	0.094	0.097	0.107	0.087	0.100	0.134
Downlink	Stadtkern	22	0.237	0.219	0.227	0.237	0.244	0.262	0.224	0.250	0.110
Downlink	Geschäftsviertel	22	0.208	0.190	0.197	0.207	0.216	0.229	0.195	0.220	0.120
Uplink	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.036	0.035	0.036	0.036	0.036	0.037	0.035	0.036	0.019
Uplink	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.037	0.035	0.036	0.037	0.038	0.040	0.036	0.038	0.057
Uplink	zentrales Wohngebiet	28	0.040	0.035	0.038	0.039	0.041	0.043	0.038	0.042	0.094
Uplink	Stadtkern	22	0.055	0.035	0.052	0.054	0.058	0.066	0.049	0.061	0.218
Uplink	Geschäftsviertel	22	0.046	0.035	0.045	0.046	0.048	0.053	0.043	0.049	0.142
Rundfunk	dezentrales Wohngebiet 1	25	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.036	0.035	0.035	0.008
Rundfunk	dezentrales Wohngebiet 2	21	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.037	0.035	0.036	0.020
Rundfunk	zentrales Wohngebiet	28	0.036	0.035	0.035	0.035	0.036	0.037	0.035	0.036	0.024
Rundfunk	Stadtkern	22	0.037	0.035	0.036	0.036	0.038	0.041	0.035	0.038	0.080
Rundfunk	Geschäftsviertel	22	0.037	0.035	0.036	0.036	0.037	0.043	0.035	0.039	0.117

Analoge Ergebnisse ergab die Langzeitmessung in Basel (Tabelle 21). Auch dort war die Variation von HF-EMF Messungen für Aussenplätze relativ tief, obwohl die Messtage bis zu zwei Jahren auseinander lagen. Die Variationskoeffizienten sind im Durchschnitt etwas höher als bei der Vertiefungsmessung. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Messungen während 2 Jahren durchgeführt worden sind und man für diesen Zeitraum mehr systematische Veränderungen der Immissionen erwartet im Vergleich zu den zwei 3-Monatsperioden der Vertiefungsmessung. Analog zur Vertiefungsmessung ist die Variation für Downlink am tiefsten, und noch tiefer, wenn man geometrische statt arithmetische Mittelwerte verwendet (Daten nicht gezeigt). In öffentlichen Verkehrsmitteln und an Bahnhöfen oder Busstationen ist die Variation etwas höher als in den Quartieren.

Tabelle 21: Variation von arithmetischen HF-EMF Mittelwerten pro Mikroumgebung und Messtag in den Langzeitmessungen in Basel (Dauer bezieht sich auf die durchschnittliche Messdauer in einer Mikroumgebung pro Messtag; alle Messwerte in V/m mit Ausnahme des Variationskoeffizienten CV; NaN bezeichnen berechnete Werte <0).

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Dauer [Min]	Mittelwert	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	Mittelwert minus SD	Mittelwert plus SD	CV
Total EMF	Bus 1	9	0.284	0.050	0.141	0.197	0.244	0.734	NaN	0.451	1.527
Total EMF	Bus 2	6	0.420	0.122	0.209	0.286	0.519	0.886	NaN	0.615	1.149
Total EMF	Bus 3	41	0.290	0.096	0.196	0.244	0.330	0.501	0.135	0.387	0.782
Total EMF	Bus 4	17	0.350	0.102	0.218	0.297	0.388	0.752	0.036	0.494	0.990
Total EMF	Interregio Zug	36	0.750	0.176	0.361	0.570	0.813	2.053	NaN	1.194	1.535
Total EMF	S-Bahn	23	0.355	0.103	0.226	0.283	0.347	0.733	NaN	0.508	1.049
Total EMF	Tram 1	4	0.294	0.098	0.145	0.203	0.254	0.779	NaN	0.481	1.679
Total EMF	Tram 2	9	0.230	0.098	0.157	0.194	0.241	0.407	0.099	0.310	0.814
Total EMF	Tram 3	3	0.672	0.208	0.260	0.307	0.496	2.316	NaN	1.264	2.535
Total EMF	Tram 4	2	0.464	0.188	0.249	0.371	0.478	1.012	NaN	0.675	1.118
Total EMF	Bus Station	6	0.242	0.113	0.174	0.210	0.284	0.446	0.128	0.317	0.721
Total EMF	Bahnhof	19	0.301	0.185	0.219	0.275	0.353	0.509	0.185	0.383	0.620
Total EMF	Tram Station	6	0.348	0.215	0.273	0.312	0.363	0.706	0.170	0.462	0.760
Total EMF	Shopping Center 1	16	0.184	0.070	0.125	0.147	0.188	0.392	0.020	0.259	0.988
Total EMF	Shopping Center 2	19	0.225	0.131	0.179	0.208	0.252	0.363	0.146	0.283	0.580
Total EMF	Flughafen	23	0.470	0.264	0.362	0.442	0.520	0.781	0.302	0.593	0.587
Total EMF	zentrales Wohngebiet 1	18	0.138	0.090	0.109	0.137	0.151	0.200	0.102	0.167	0.454
Total EMF	zentrales Wohngebiet 2	10	0.288	0.212	0.235	0.265	0.318	0.431	0.213	0.347	0.452
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 1	12	0.192	0.103	0.160	0.178	0.213	0.293	0.134	0.236	0.513
Total EMF	dezentrales Wohngebiet 2	18	0.200	0.122	0.172	0.195	0.220	0.268	0.159	0.234	0.371
Total EMF	Stadtkern	17	0.469	0.371	0.404	0.452	0.497	0.684	0.376	0.546	0.355
Total EMF	Kleinstadt	18	0.139	0.097	0.112	0.128	0.150	0.207	0.099	0.170	0.495

Abbildung 39 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der Erst- und Zweitmessung im Pilot 2014, die in der gleichen Mikroumgebung auf dem gleichen Messpfad im Abstand von zwei bis vier Monaten durchgeführt wurden. Dargestellt ist jeweils der arithmetische Mittelwert pro Mikroumgebung und Messtag. Es ist ersichtlich, dass die (Pearson-)Korrelation hoch ist. Für das total HF-EMF und Downlink 0.90, für Uplink 0.53 und für Rundfunk 0.82.

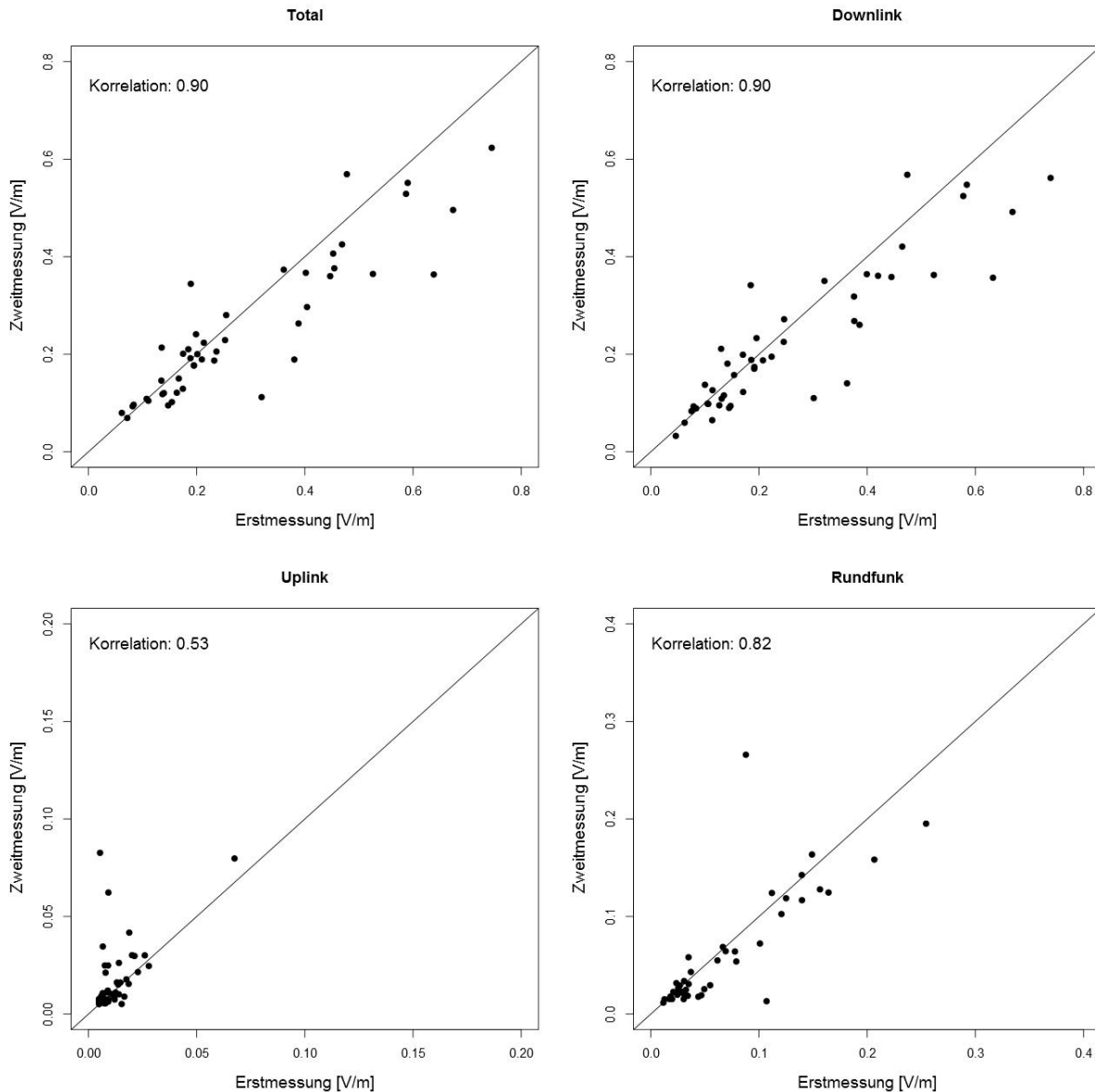


Abbildung 39: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung an zwei verschiedenen Messtagen (Aussenmessungen des Pilots 2014).

Im Durchschnitt war die HF-EMF-Exposition bei der Erstmessung um 0.036 V/m höher als bei der Zweitmessung (Tabelle 22). Dies ist vor allem auf Unterschiede beim Downlink zurückzuführen. Die grössten HF-EMF Abweichungen wurden in Mikroumgebungen des Typs „Stadtzentrum“ und „zentrale städtische Wohngebiete“ beobachtet, wo auch die Werte am höchsten sind. Konkret handelte es sich um folgende Gebiete: Stadtzentrum in Zürich (+0.28 V/m), zentrales städtisches Wohngebiet in Neuenburg (+0.21 V/m), dezentrales städtisches Wohngebiet in Zürich (+0.19 V/m), zentrales städtisches Wohngebiet in Lausanne (+0.18 V/m), ländliches Wohngebiet in Pully (+0.17 V/m) und das Dorfzentrum von

Dübendorf (-0.16 V/m). Weitere Analysen und Informationen zu diesen Messungen sind in Abbildung 46 gegeben.

Tabelle 22: Differenz der arithmetischen Mittelwerte pro Mikroumgebung an verschiedenen Messtagen für HF-EMF total, Downlink, Uplink und Rundfunk (Pilot 2014; HF EMF total; Daten und Berechnungen in V/m).

Frequenz- band	Typ Mikroumgebung	Anzahl Mikro- umgebungen	mittlere						
			Differenz	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	SD
Total	alle	46	0.036	-0.155	-0.011	0.020	0.052	0.275	0.079
Total	Stadtzentrum	5	0.124	0.035	0.046	0.087	0.178	0.275	0.101
Total	Dorfzentrum	15	0.001	-0.155	-0.022	0.017	0.031	0.125	0.064
Total	zentrales städt. Wohngebiet	4	0.079	-0.078	0.039	0.093	0.132	0.208	0.119
Total	dezentrales städt. Wohngebiet	5	0.044	-0.012	0.002	0.018	0.023	0.191	0.083
Total	ländliches Wohngebiet	13	0.020	-0.042	-0.012	0.006	0.043	0.161	0.051
Total	Industriegebiet	4	0.052	-0.010	0.026	0.048	0.074	0.122	0.055
Downlink	alle	46	0.036	-0.157	-0.008	0.020	0.054	0.276	0.082
Downlink	Stadtzentrum	5	0.127	0.035	0.059	0.086	0.177	0.276	0.099
Downlink	Dorfzentrum	15	0.004	-0.157	-0.019	0.019	0.040	0.125	0.066
Downlink	zentrales städt. Wohngebiet	4	0.069	-0.081	0.023	0.083	0.129	0.191	0.114
Downlink	dezentrales städt. Wohngebiet	5	0.047	-0.030	0.003	0.020	0.021	0.222	0.100
Downlink	ländliches Wohngebiet	13	0.017	-0.038	-0.008	0.006	0.028	0.160	0.050
Downlink	Industriegebiet	4	0.057	-0.039	0.017	0.045	0.084	0.177	0.090
Uplink	alle	46	-0.006	-0.077	-0.004	-0.001	0.002	0.010	0.015
Uplink	Stadtzentrum	5	-0.005	-0.012	-0.012	-0.004	0.001	0.003	0.007
Uplink	Dorfzentrum	15	-0.008	-0.077	-0.003	0.000	0.002	0.010	0.024
Uplink	zentrales städt. Wohngebiet	4	-0.007	-0.023	-0.012	-0.003	0.002	0.003	0.012
Uplink	dezentrales städt. Wohngebiet	5	-0.011	-0.028	-0.016	-0.013	-0.001	0.002	0.012
Uplink	ländliches Wohngebiet	13	-0.002	-0.017	-0.003	-0.001	0.000	0.005	0.005
Uplink	Industriegebiet	4	-0.001	-0.003	-0.001	0.000	0.000	0.002	0.002
Rundfunk	alle	46	0.007	-0.178	-0.002	0.005	0.022	0.094	0.034
Rundfunk	Stadtzentrum	5	0.005	-0.015	0.000	0.002	0.015	0.025	0.015
Rundfunk	Dorfzentrum	15	0.005	-0.008	-0.003	0.000	0.009	0.029	0.011
Rundfunk	zentrales städt. Wohngebiet	4	0.045	0.005	0.018	0.041	0.068	0.094	0.039
Rundfunk	dezentrales städt. Wohngebiet	5	0.012	-0.012	0.003	0.004	0.024	0.040	0.020
Rundfunk	ländliches Wohngebiet	13	0.009	-0.023	0.004	0.007	0.014	0.048	0.017
Rundfunk	Industriegebiet	4	-0.031	-0.178	-0.046	0.012	0.026	0.028	0.099

Noch grösser ist die Übereinstimmung, wenn man die geometrischen Mittelwerte pro Mikroumgebung vergleicht (Abbildung 40). Die Korrelation liegt zwischen 0.92 für Downlink und 0.98 für Rundfunk.

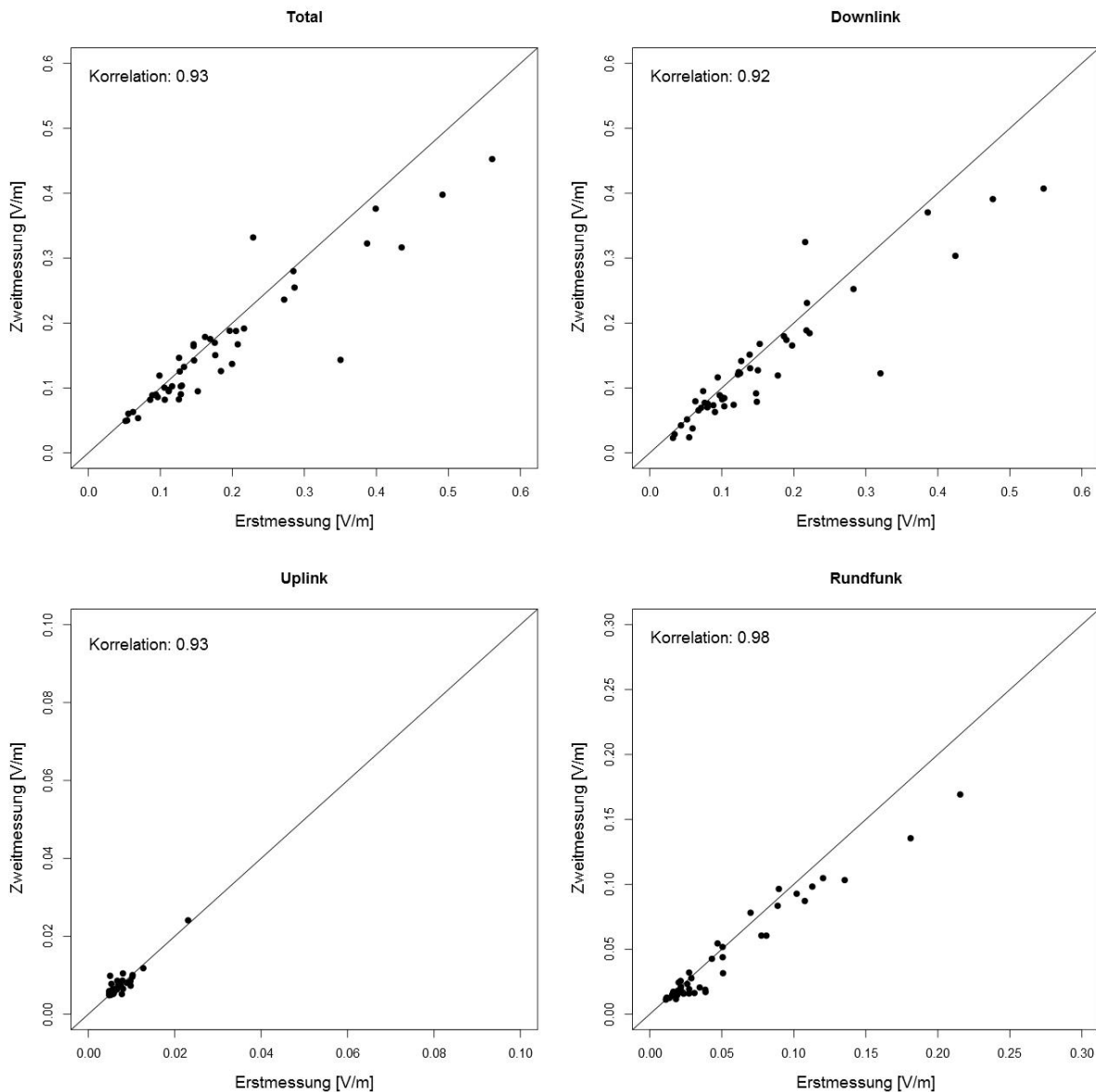


Abbildung 40: Vergleich der geometrischen Mittelwerte pro Mikroumgebung an zwei verschiedenen Messtagen (Ausmessungen des Pilots 2014).

Die gleichen Auswertungen für die Exposition pro Messpfad (Abbildung 41) statt pro Mikroumgebung (Abbildung 39) ergeben ein ähnliches Resultat, obwohl die Korrelationen meistens etwas geringer sind (für HF-EMF und Downlink 0.87 statt 0.90, für Uplink 0.54 statt 0.53 und für Rundfunk 0.79 statt 0.82). Die Streuung bzw. die Standardabweichung der Differenzen zwischen Erst- und Zweitmessung pro Pfad ist etwas grösser als bei den Differenzen pro Mikroumgebung (Tabelle 23). Weiterführende Evaluationen zeigen, dass die grösseren Abweichungen auf Variationen beim Messpfad zurückzuführen sind (Abbildung 46). Wiederum ist die Korrelation zwischen Erst- und Zweitmessung höher für geometrische als für arithmetische Mittelwerte (Abbildung 42).

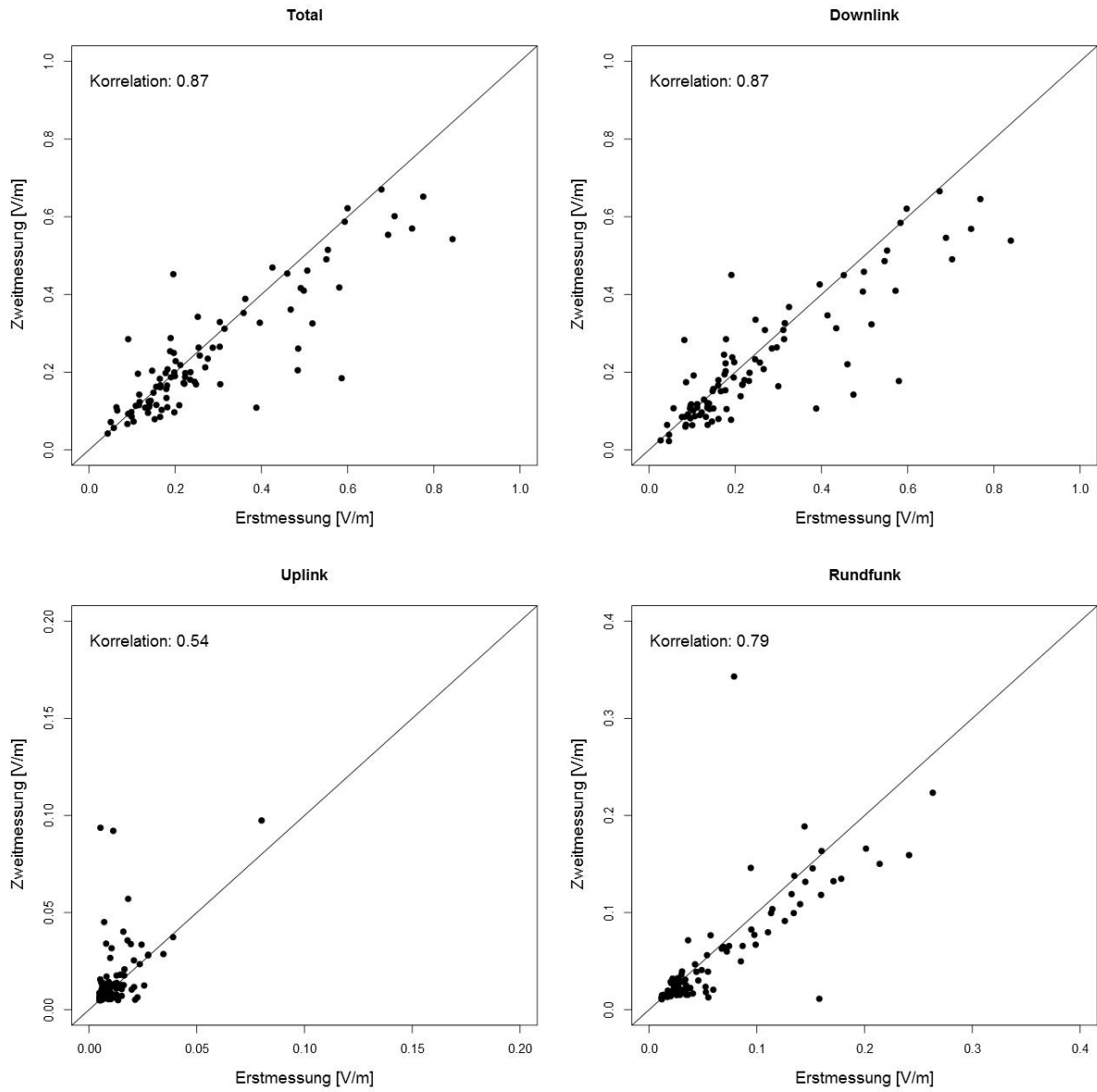


Abbildung 41: Vergleich der *arithmetischen* Mittelwerte pro Messpfad an zwei verschiedenen Messtagen (Pilot 2014).

Tabelle 23: Differenz der arithmetischen Mittelwerte pro Messpfad an zwei verschiedenen Messtagen HF-EMF total, Downlink, Uplink und Rundfunk (Pilot 2014; HF EMF total; Daten und Berechnungen in V/m).

Frequenz- band	Typ Mikroumgebung	Anzahl Mikro- umgebungen	mittlere Differenz						
			Differenz	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	SD
Total	alle	92	0.035	-0.257	-0.006	0.019	0.066	0.402	0.092
Total	Stadtzentrum	10	0.107	-0.044	0.010	0.064	0.132	0.402	0.142
Total	Dorfzentrum	30	0.008	-0.257	-0.015	0.015	0.037	0.193	0.070
Total	zentrales städt. Wohngebiet	8	0.075	-0.194	0.045	0.077	0.127	0.280	0.145
Total	dezentrales städt. Wohngebiet	10	0.040	-0.099	-0.006	0.004	0.069	0.279	0.104
Total	ländliches Wohngebiet	26	0.017	-0.083	-0.016	0.008	0.048	0.180	0.056
Total	Industriegebiet	8	0.055	-0.009	0.004	0.027	0.111	0.163	0.066
Downlink	alle	92	0.034	-0.259	-0.009	0.020	0.055	0.402	0.097
Downlink	Stadtzentrum	10	0.109	-0.030	0.008	0.064	0.137	0.402	0.141
Downlink	Dorfzentrum	30	0.010	-0.259	-0.001	0.020	0.034	0.193	0.071
Downlink	zentrales städt. Wohngebiet	8	0.060	-0.201	0.007	0.048	0.121	0.281	0.152
Downlink	dezentrales städt. Wohngebiet	10	0.041	-0.107	-0.010	0.000	0.066	0.332	0.121
Downlink	ländliches Wohngebiet	26	0.013	-0.088	-0.017	0.000	0.041	0.178	0.056
Downlink	Industriegebiet	8	0.060	-0.045	-0.005	0.024	0.133	0.212	0.094
Uplink	alle	92	-0.004	-0.088	-0.005	-0.001	0.001	0.016	0.015
Uplink	Stadtzentrum	10	-0.004	-0.018	-0.008	-0.002	-0.001	0.009	0.008
Uplink	Dorfzentrum	30	-0.005	-0.088	-0.004	0.000	0.002	0.016	0.022
Uplink	zentrales städt. Wohngebiet	8	-0.004	-0.039	-0.008	0.002	0.009	0.013	0.018
Uplink	dezentrales städt. Wohngebiet	10	-0.009	-0.038	-0.015	-0.005	-0.001	0.005	0.013
Uplink	ländliches Wohngebiet	26	-0.002	-0.026	-0.004	-0.001	0.000	0.008	0.006
Uplink	Industriegebiet	8	0.000	-0.004	-0.002	-0.001	0.001	0.008	0.004
Rundfunk	alle	92	0.008	-0.264	0.000	0.006	0.017	0.147	0.038
Rundfunk	Stadtzentrum	10	0.004	-0.044	-0.001	0.005	0.010	0.039	0.021
Rundfunk	Dorfzentrum	30	0.006	-0.020	-0.003	0.002	0.012	0.042	0.014
Rundfunk	zentrales städt. Wohngebiet	8	0.041	0.000	0.009	0.024	0.050	0.147	0.050
Rundfunk	dezentrales städt. Wohngebiet	10	0.012	-0.052	0.002	0.010	0.035	0.041	0.028
Rundfunk	ländliches Wohngebiet	26	0.009	-0.035	0.001	0.005	0.015	0.064	0.018
Rundfunk	Industriegebiet	8	-0.019	-0.264	0.000	0.012	0.019	0.043	0.100

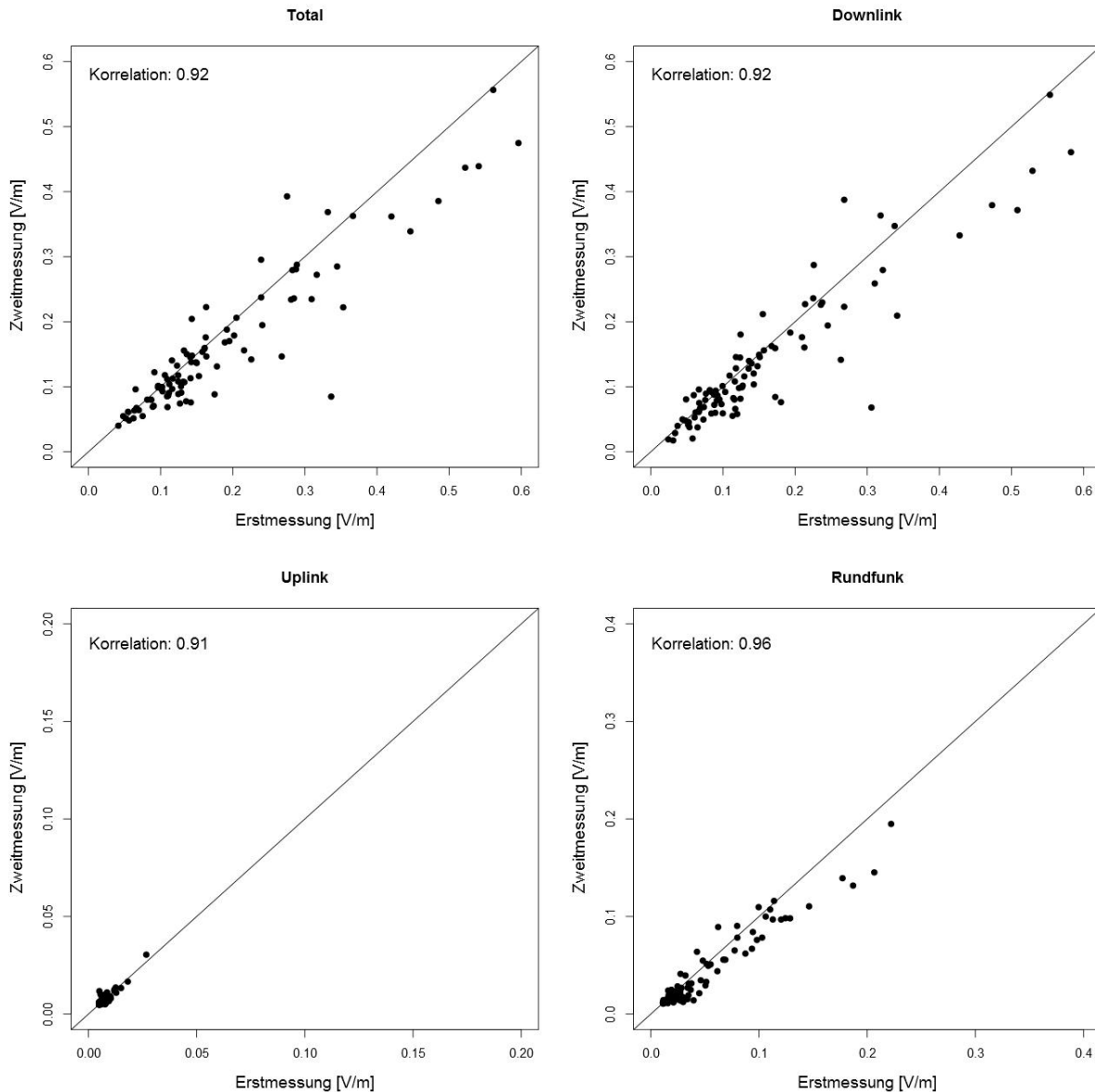


Abbildung 42: Vergleich der geometrischen Mittelwerte pro Messpfad an zwei verschiedenen Messtagen (Pilot 2014).

Im Folgenden sind einige Beispiele einer Erst- und Zweitmessung entlang desselben Messpfades dargestellt. In blau ist der Verlauf der Erstmessung als gleitender Mittelwert über 11 Messwerte dargestellt. Für die Zweitmessung, zwei bis vier Monate später, wurde ebenfalls der gleitende Mittelwert über 11 Messwerte berechnet. Anhand der GPS Koordinaten wurde für jeden Messwert der Zweitmessung jeweils der örtlich nächstgelegene Messwert zur Erstmessung identifiziert. Punkte innerhalb von 10 m sind grün dargestellt. Ist der nächstgelegene Punkt mehr als 40 m entfernt, sind die Werte rot dargestellt, die Punkte dazwischen orange. Abbildung 43 zeigt ein typisches Beispiel in Bezug auf die Übereinstimmung des Messpfades und der Messwerte der Exposition. Abbildung 44 und

Abbildung 45 zeigen eine Auswahl von zwei Messpfaden, wo die Übereinstimmung sowohl bezüglich Pfad als auch Messwerten der Exposition sehr gut ist.

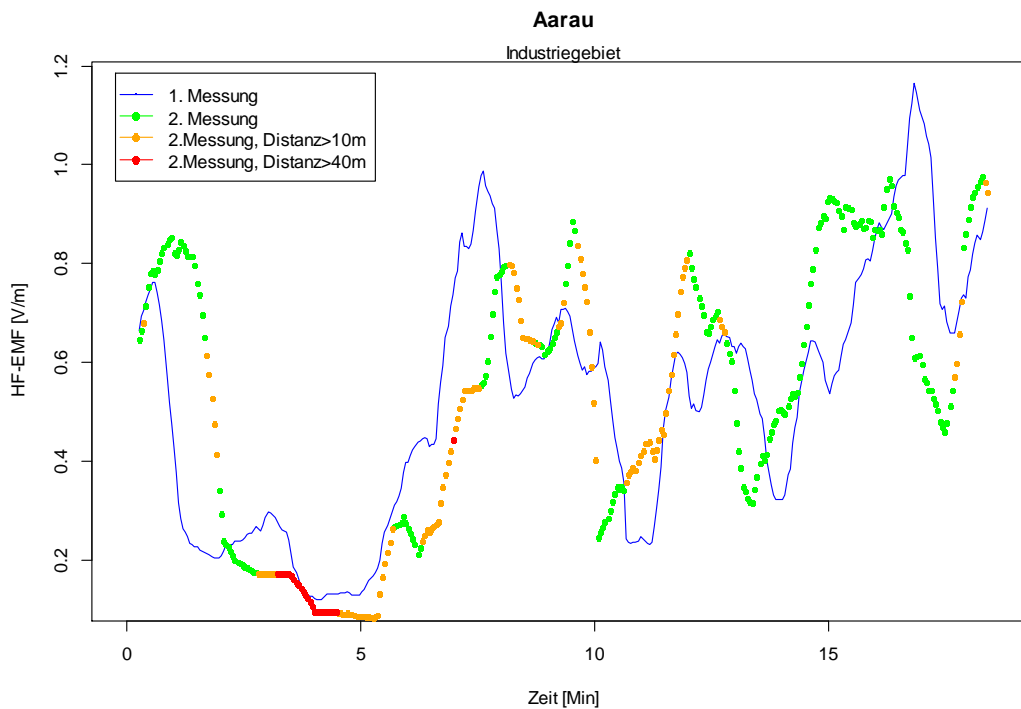


Abbildung 43: Vergleich der Erst- und der Zweitmessung entlang desselben Messpfades im Industriegebiet Aarau (Pilot 2014; HF EMF total).

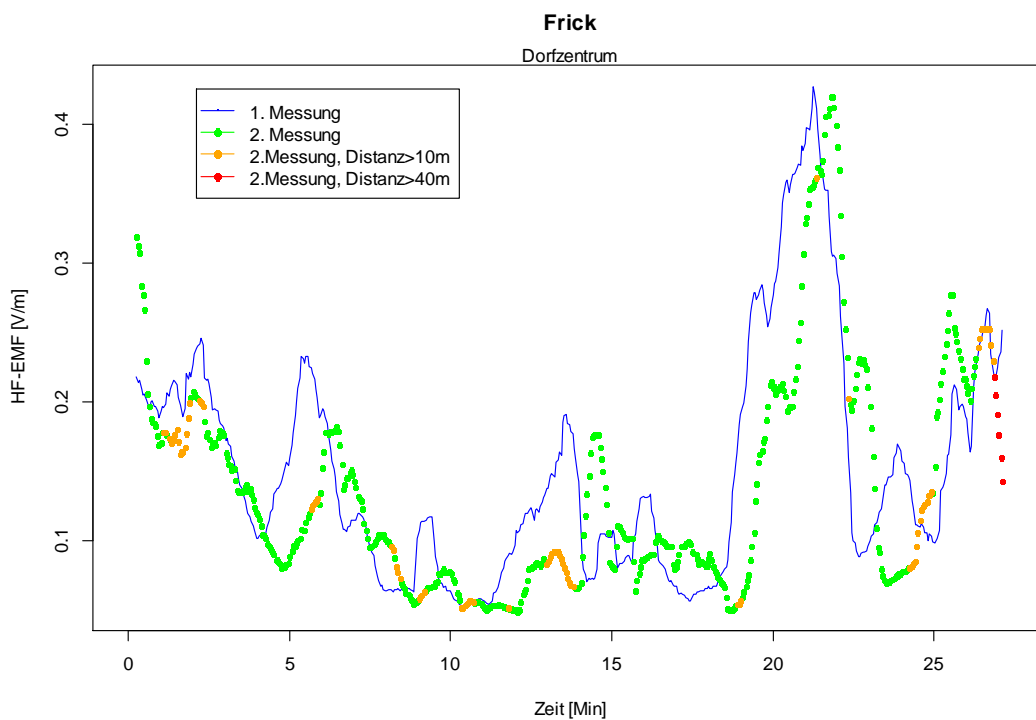


Abbildung 44: Vergleich der Erst- und der Zweitmessung entlang desselben Messpfades im Dorfzentrum von Frick (Pilot 2014; HF EMF total).

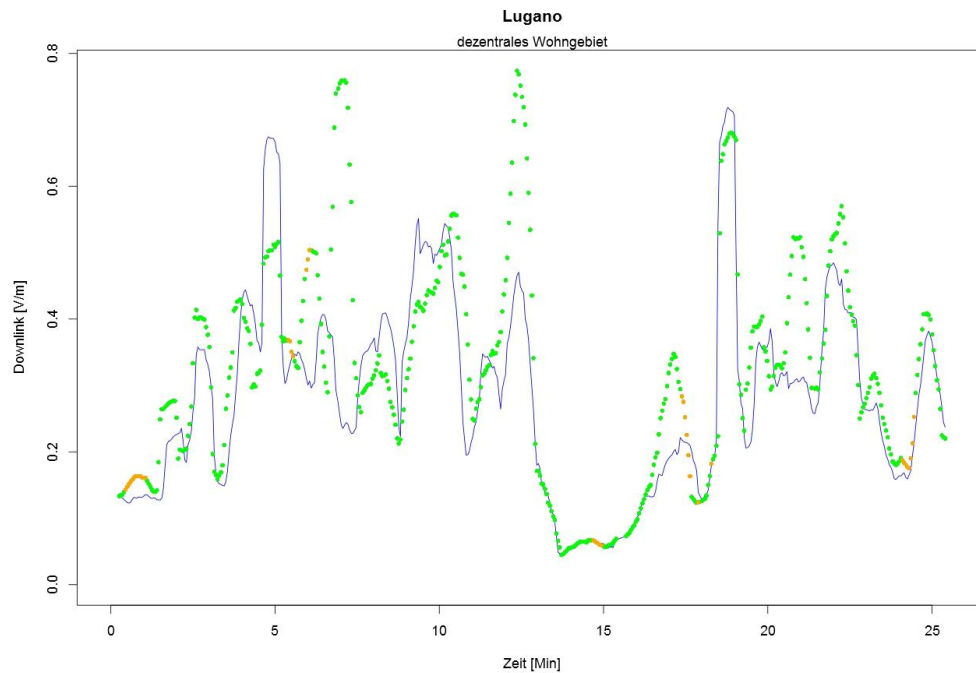


Abbildung 45: Vergleich der Erst- und der Zweitmessung entlang desselben Messpfades im dezentralen städtischen Wohngebiet von Lugano (Pilot 2014; Downlink).

In Abbildung 46 sind die sechs Messpfade mit der schlechtesten Übereinstimmung zwischen Erst- und Zweitmessung dargestellt. Die Differenz des arithmetischen Mittelwerts für den Pfad im Stadtzentrum in Zürich beträgt +0.28 V/m, im zentralen Wohngebiet in Neuenburg +0.21 V/m, im dezentralen Wohngebiet in Zürich +0.19 V/m, im zentralen Wohngebiet in Lausanne +0.18 V/m, im Wohngebiet in Pully +0.17 V/m und im Dorfzentrum von Dübendorf -0.16 V/m. Es ist ersichtlich, dass sich in diesen Fällen auch die Koordinaten, an denen die Messwerte erhoben wurden, zwischen der Erst- und Zweitmessung erheblich unterscheiden. Die Differenz in den Koordinaten kommt zustande, wenn die Messungen von zwei verschiedenen Personen durchgeführt werden. Trotz Karten wurden teilweise andere Wege genutzt. Eine gewisse Streuung in den abgelaufenen Wegen war durchaus erwünscht, um zu evaluieren, wie sensitiv die Messwerte auf Abweichungen in der Route reagieren. Die Abbildungen zeigen klar, dass dies einen merkbaren Einfluss haben kann, obwohl es auch Beispiele gibt, wo die Messwerte trotz Abweichungen in den Routen ähnlich waren.

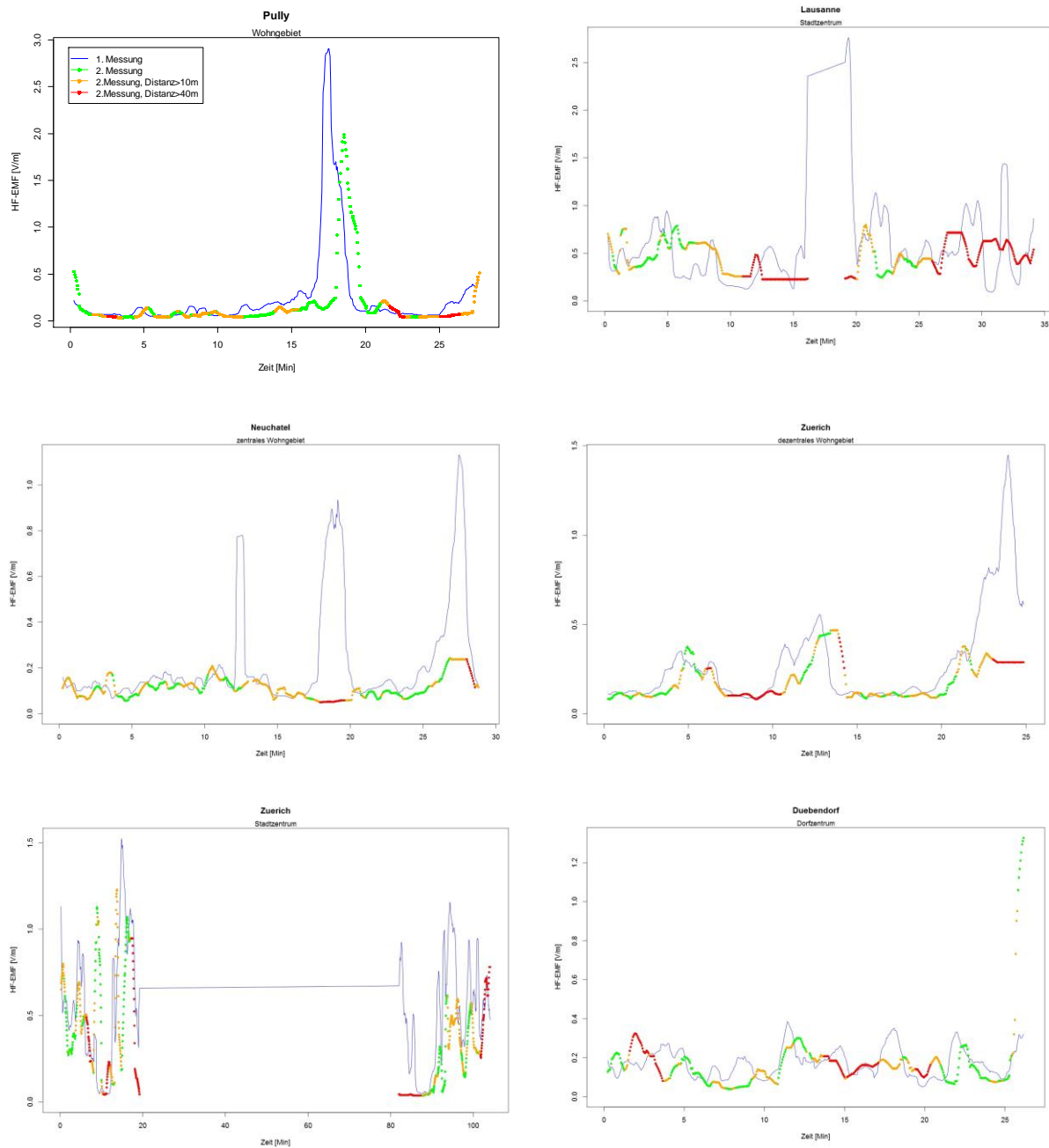


Abbildung 46: Vergleich der Erst- und Zweitmessung entlang desselben Messpfads für die sechs Mikroumgebungen mit den grössten Abweichungen zwischen den beiden Messdurchgängen (Pilot 2014; HF-EMF total; siehe auch Kapitel 5.3.2).

Im Rahmen der Schulbesuche in der HERMES-Studie wurden Messungen im Abstand eines Jahres im gleichen Schulhaus durchgeführt. Das Messgerät wurde dabei während der Studieninformation, der Fragebogenbeantwortung oder der Durchführung der kognitiven Tests am Computer im Schulzimmer bzw. Computerraum platziert. Das heisst, dass die

Messungen nicht immer im gleichen Raum durchgeführt wurden. Während den Messungen wurde das Gerät dabei nach Möglichkeit ab und zu leicht verschoben. Abbildung 47 zeigt einen Vergleich der Messungen vom ersten mit dem zweiten Jahr, jeweils als Durchschnitt pro Schulhaus, falls mehrere Messungen pro Schulhaus gemacht wurden. Grundsätzlich sind die Messwerte sehr tief und die Hauptbeiträge stammen von Uplink und W-LAN. Es zeigt, dass die relativen Unterschiede zwischen den beiden Messungen gross sind. Dafür gibt es drei Gründe: tiefe Messwerte, das unsystematische Messverfahren und eine zu erwartende grosse Variabilität für Uplink und W-LAN, da sich die Emissionssituation laufend ändert und vom Nutzungsverhalten in der Umgebung abhängt.

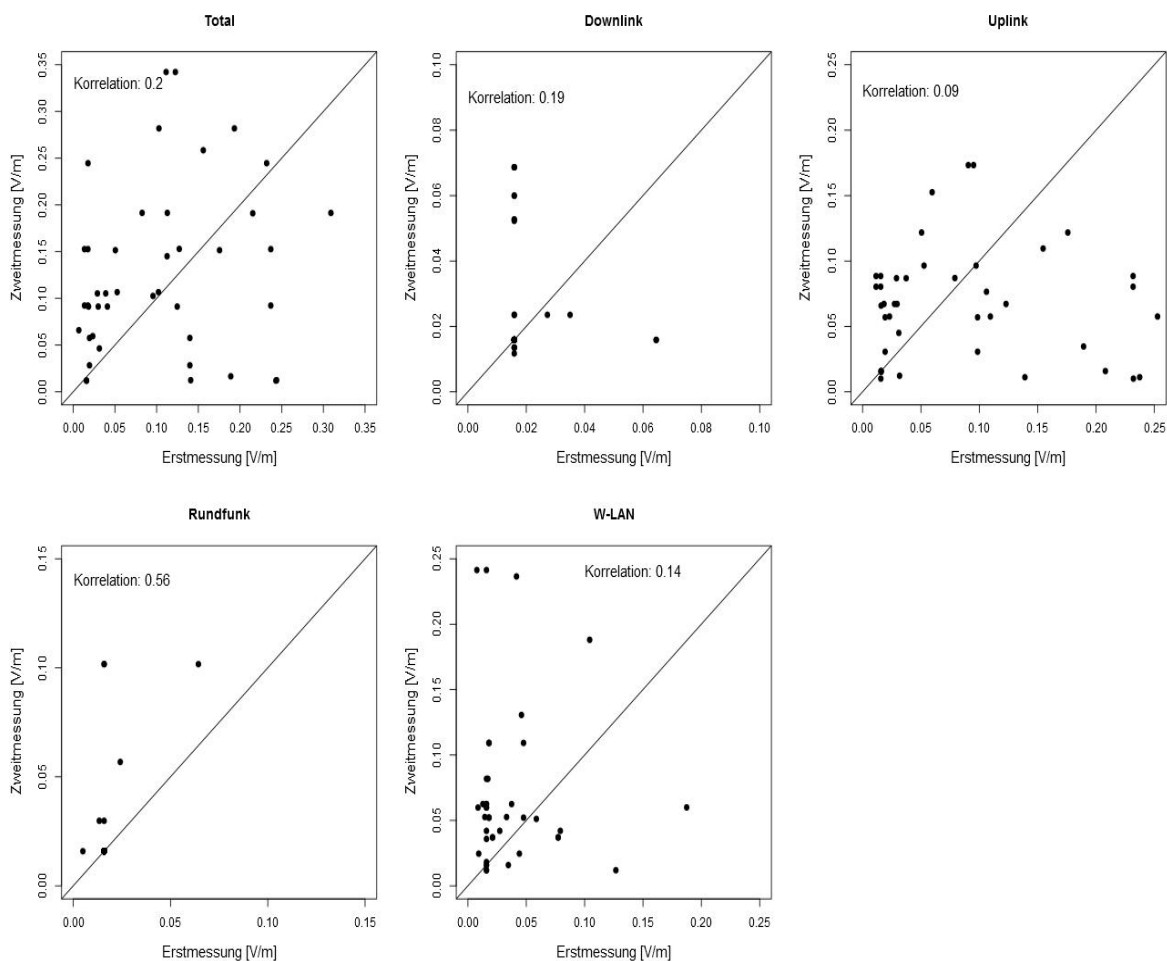


Abbildung 47: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte pro Schulhaus von zwei Messungen im Abstand eines Jahres (HERMES-Studie).

5.4 Variabilität der Exposition innerhalb einer Mikroumgebung

Kapitel 5.3 hat gezeigt, dass Exposimetermessungen auf dem gleichen Messpfad gut wiederholbar sind. Grössere Unterschiede in den Messergebnissen kamen insbesondere

dann zustande, wenn es bei Wiederholungsmessungen Abweichungen beim Messpfad gab. Damit stellt sich im Hinblick auf die Planung eines Monitorings die Frage, wie repräsentativ ein gewählter Messpfad für die jeweilige Mikroumgebung ist, oder anders gefragt, wie kritisch die Wahl des konkreten Messpfades für das Messergebnis ist. Für ein Monitoring wäre eine möglichst hohe Repräsentativität wünschbar. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Messergebnisse der beiden Messpfade verglichen, die im Pilot 2014 für jede der untersuchten Mikroumgebungen erhoben wurden (siehe dazu Kap. 3.3.4). Weiter wird evaluiert, wie lange ein Messpfad sein muss, damit ein stabiler Mittelwert für die entsprechende Mikroumgebung resultiert.

5.4.1 Literaturübersicht

Es ist allgemeint bekannt, dass HF-EMF-Expositionen auf kleinem Raum sowohl drinnen wie auch draussen stark variieren können. Es gibt jedoch noch keine Publikationen, wie sich dies bei solchen Exposimeter- bzw. Pfadmessungen auswirkt.

5.4.2 Eigene Auswertungen

In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind für alle Gemeinden und Mikroumgebungen des Pilots 2014 die arithmetischen HF-EMF Mittelwerte pro Messpfad und Messdurchgang dargestellt. Die quadratischen Symbole beziehen sich jeweils auf die Messungen des ersten, Kreise auf den 2. Messpfad. Zwischen dem ersten und zweiten Messdurchgang eines Messpfades wird farblich unterschieden. Im Allgemeinen stimmen sowohl die Erst- und die Zweitmessung als auch die Messung auf dem 1. Pfad mit derjenigen auf dem 2. Pfad gut überein. Es gibt aber durchaus auch Ausnahmen. Gross ist der Unterschied zwischen dem 1. und dem 2. Messpfad im Stadtzentrum und zentralen Wohngebiet von Lausanne, im Dorfzentrum von Münchenstein, im Stadtzentrum von Neuenburg, im Wohngebiet von Pully, im Industriegebiet von Rümlang und im Wohngebiet von St. Blaise. Die grössten Unterschiede zwischen der Erst- und Zweitmessung (rot/orange vs. grün) stellt man für die in Kapitel 5.3.2 (unterhalb Abbildung 39) diskutierten Orte fest. Im Allgemeinen ist die Übereinstimmung für den geometrischen Mittelwert pro Messpfad besser als für den arithmetischen Mittelwert.

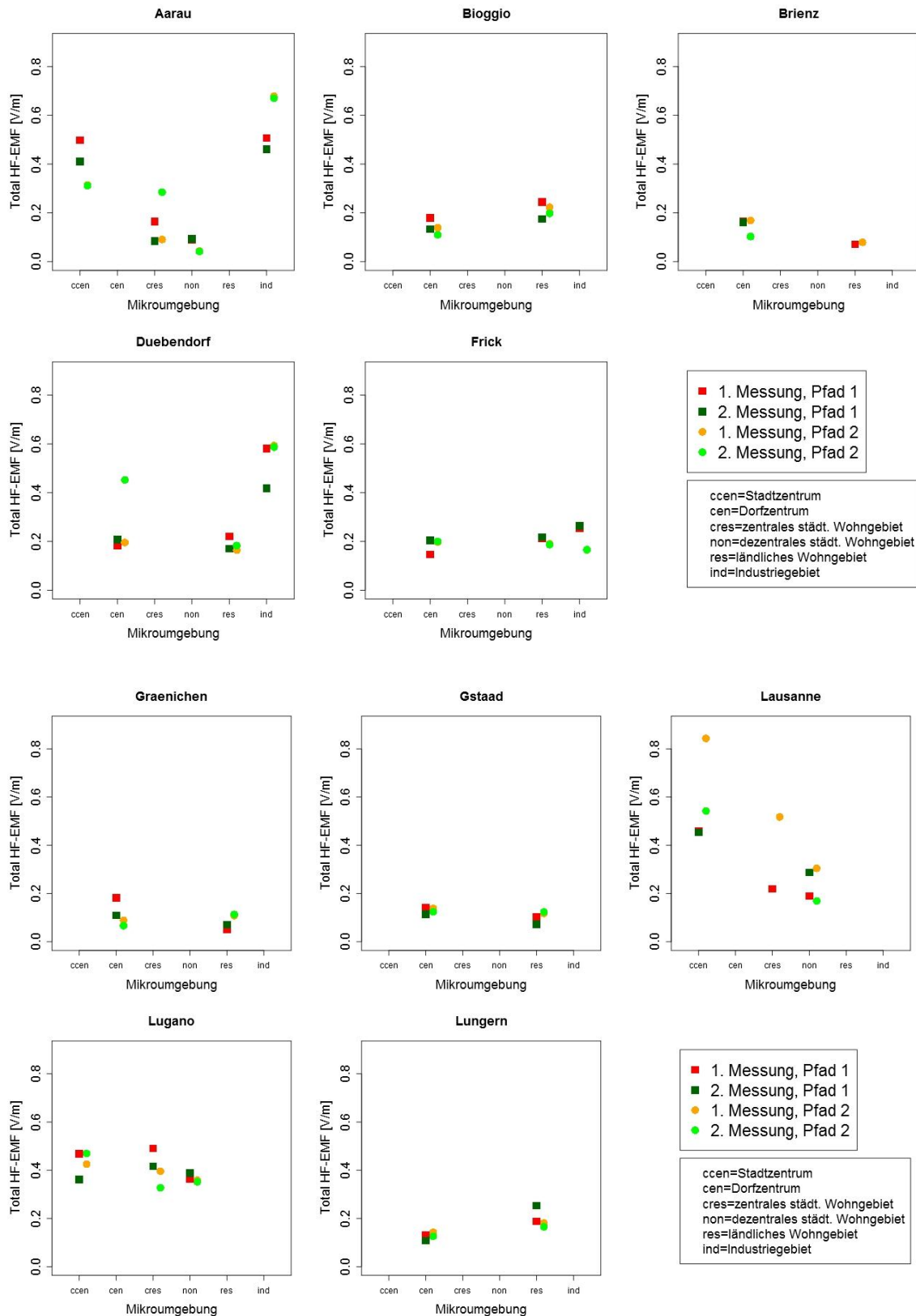


Abbildung 48: Arithmetische HF-EMF Mittelwerte pro Messpfad und Messdurchgang in den einzelnen Mikroumgebungen und Gemeinden (Pilot 2014).

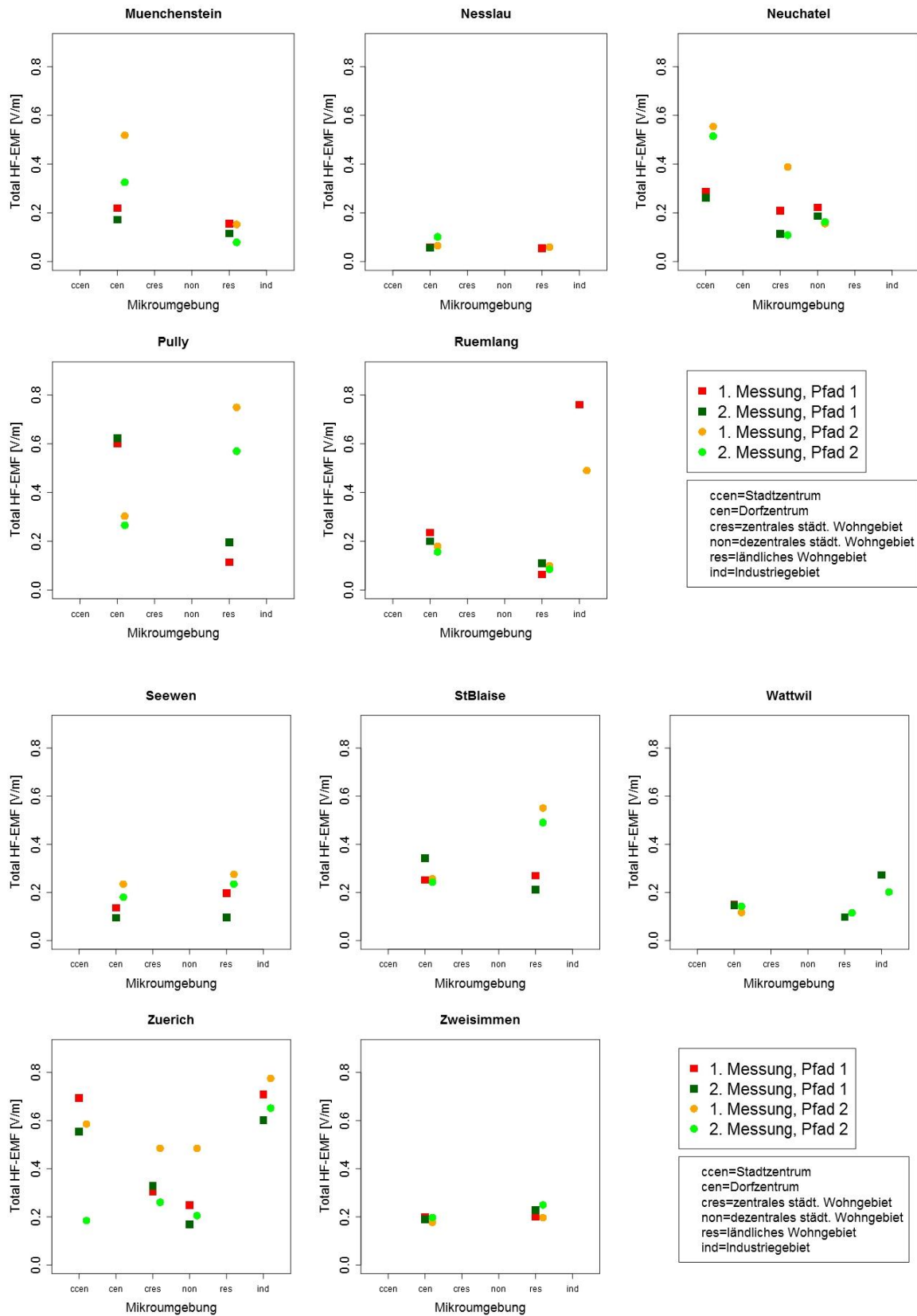


Abbildung 49: Arithmetische HF-EMF Mittelwerte pro Messpfad und Messdurchgang in den einzelnen Mikroumgebungen und Gemeinden (Pilot 2014).

Der Vergleich zwischen den beiden HF-EMF Messungen entlang der beiden Messpfade in derselben Mikroumgebung ist in Abbildung 50 dargestellt. Jeder Messdurchgang auf den Messpfaden 1 und 2 ergibt einen Punkt in der Abbildung. Die Pearson-Korrelation für HF-EMF total beträgt 0.65. Sie ist damit geringer als zwischen der Erst- und Zweitmessung auf demselben Messpfad (Abbildung 41), die 0.87 beträgt. Vergleichbares gilt für den Downlink (Korrelation 0.65 vs. 0.87) und für Uplink (0.31 vs. 0.53). Für Rundfunk (0.81 vs. 0.79) sind die Werte ähnlich. Das bedeutet, dass für die beiden letzteren Bänder zwei Messpfade pro Mikroumgebung anstatt nur einem praktisch keinen Zusatzgewinn bringen, da sich die Streuung im Rahmen bewegt, die man aufgrund von wiederholten Messungen auf demselben Messpfad erwarten würde. Die tiefere Korrelation für Downlink (und demgemäss auch für HF-EMF) zeigt, dass es zwischen den zwei Messpfaden zusätzliche Unterschiede gibt, die über die zu erwartende Streuung bei wiederholten Messungen hinausgeht. Dennoch verbleibt eine erhebliche Korrelation zwischen den Messungen der beiden Messpfade in derselben Mikroumgebung.

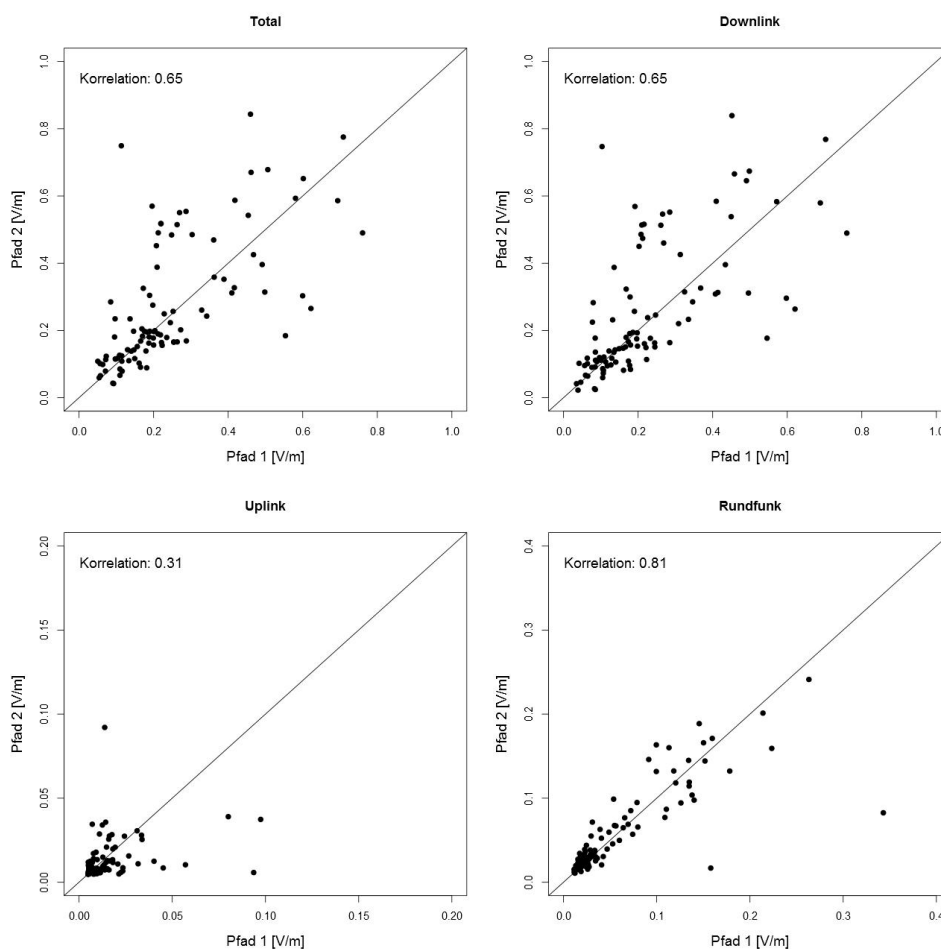


Abbildung 50: Vergleich der *arithmetischen* Mittelwerte entlang den beiden Messpfaden in derselben Mikroumgebung jeweils vom gleichen Tag (Pilot 2014).

Dasselbe Bild ergibt sich auch, wenn man die Verteilung der Differenzen der Messungen zwischen den beiden Pfaden in derselben Mikroumgebung anschaut (Tabelle 24). Für Downlink und Uplink ist die Streuung (SD) und der maximale Bereich grösser als bei den wiederholten Messungen pro Messpfad (Tabelle 23). Beim Rundfunk dagegen ähnlich und für die geometrischen Mittelwerte ist die Übereinstimmung zwischen Pfad 1 und Pfad 2 sehr hoch (0.96), hingegen ist die Korrelation für Downlink (0.73) und Uplink (0.70) und demzufolge HF-EMF deutlich tiefer (0.74) (Abbildung 51). Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass sich die typischen Downlink-Expositionen innerhalb eines Gebietes zwischen den Messpfaden unterscheiden und die Streuung in den Daten nicht nur auf einige wenige einflussreiche Punkte zurückzuführen ist, wie das bei der Reproduzierbarkeit der Messungen innerhalb des gleichen Messpfades der Fall war (Abbildung 42).

Tabelle 24: Differenz der arithmetischen Mittelwerte entlang den beiden Messpfaden in derselben Mikroumgebung (Pilot 2014; Daten und Berechnungen in V/m).

Frequenz-	Typ Mikroumgebung	Anzahl Mikro-	mittlere						
band		umgebungen	Differenz	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.	SD
Total	alle	97	-0.028	-0.636	-0.078	-0.006	0.043	0.369	0.149
Total	Stadtzentrum	10	-0.030	-0.384	-0.216	-0.023	0.105	0.369	0.232
Total	Dorfzentrum	30	0.004	-0.299	-0.017	-0.001	0.042	0.357	0.123
Total	zentrales städt. Wohngebiet	9	-0.058	-0.298	-0.182	0.006	0.074	0.095	0.154
Total	dezentrales städt. Wohngebiet	10	-0.004	-0.236	-0.026	0.031	0.050	0.119	0.103
Total	ländliches Wohngebiet	28	-0.064	-0.636	-0.052	-0.016	0.011	0.088	0.154
Total	Industriegebiet	10	-0.015	-0.209	-0.144	-0.031	0.084	0.270	0.150
Downlink	alle	97	-0.029	-0.644	-0.089	0.000	0.045	0.369	0.153
Downlink	Stadtzentrum	10	-0.031	-0.388	-0.217	-0.025	0.107	0.369	0.233
Downlink	Dorfzentrum	30	0.005	-0.300	-0.021	0.001	0.042	0.357	0.125
Downlink	zentrales städt. Wohngebiet	9	-0.068	-0.304	-0.203	0.007	0.079	0.101	0.166
Downlink	dezentrales städt. Wohngebiet	10	0.000	-0.262	-0.001	0.032	0.060	0.121	0.112
Downlink	ländliches Wohngebiet	28	-0.064	-0.644	-0.056	-0.012	0.009	0.094	0.155
Downlink	Industriegebiet	10	-0.025	-0.207	-0.170	-0.039	0.081	0.270	0.158
Uplink	alle	97	0.002	-0.078	-0.003	0.000	0.005	0.088	0.017
Uplink	Stadtzentrum	10	0.005	-0.021	-0.010	-0.005	0.006	0.060	0.026
Uplink	Dorfzentrum	30	0.002	-0.078	-0.001	0.001	0.004	0.088	0.022
Uplink	zentrales städt. Wohngebiet	9	0.006	-0.010	-0.006	0.001	0.003	0.047	0.019
Uplink	dezentrales städt. Wohngebiet	10	0.009	-0.005	0.002	0.004	0.011	0.037	0.012
Uplink	ländliches Wohngebiet	28	-0.003	-0.027	-0.004	-0.001	0.000	0.009	0.008
Uplink	Industriegebiet	10	0.004	-0.005	-0.001	0.003	0.006	0.017	0.007
Rundfunk	alle	97	0.002	-0.064	-0.011	-0.001	0.007	0.261	0.036
Rundfunk	Stadtzentrum	10	-0.004	-0.043	-0.010	-0.003	0.006	0.020	0.017
Rundfunk	Dorfzentrum	30	0.000	-0.064	-0.003	0.001	0.009	0.042	0.020
Rundfunk	zentrales städt. Wohngebiet	9	0.018	-0.032	-0.011	-0.004	0.022	0.141	0.054
Rundfunk	dezentrales städt. Wohngebiet	10	-0.008	-0.055	-0.016	-0.012	0.006	0.032	0.023
Rundfunk	ländliches Wohngebiet	28	-0.006	-0.045	-0.012	-0.006	-0.001	0.034	0.015
Rundfunk	Industriegebiet	10	0.030	-0.016	-0.008	0.002	0.014	0.261	0.083

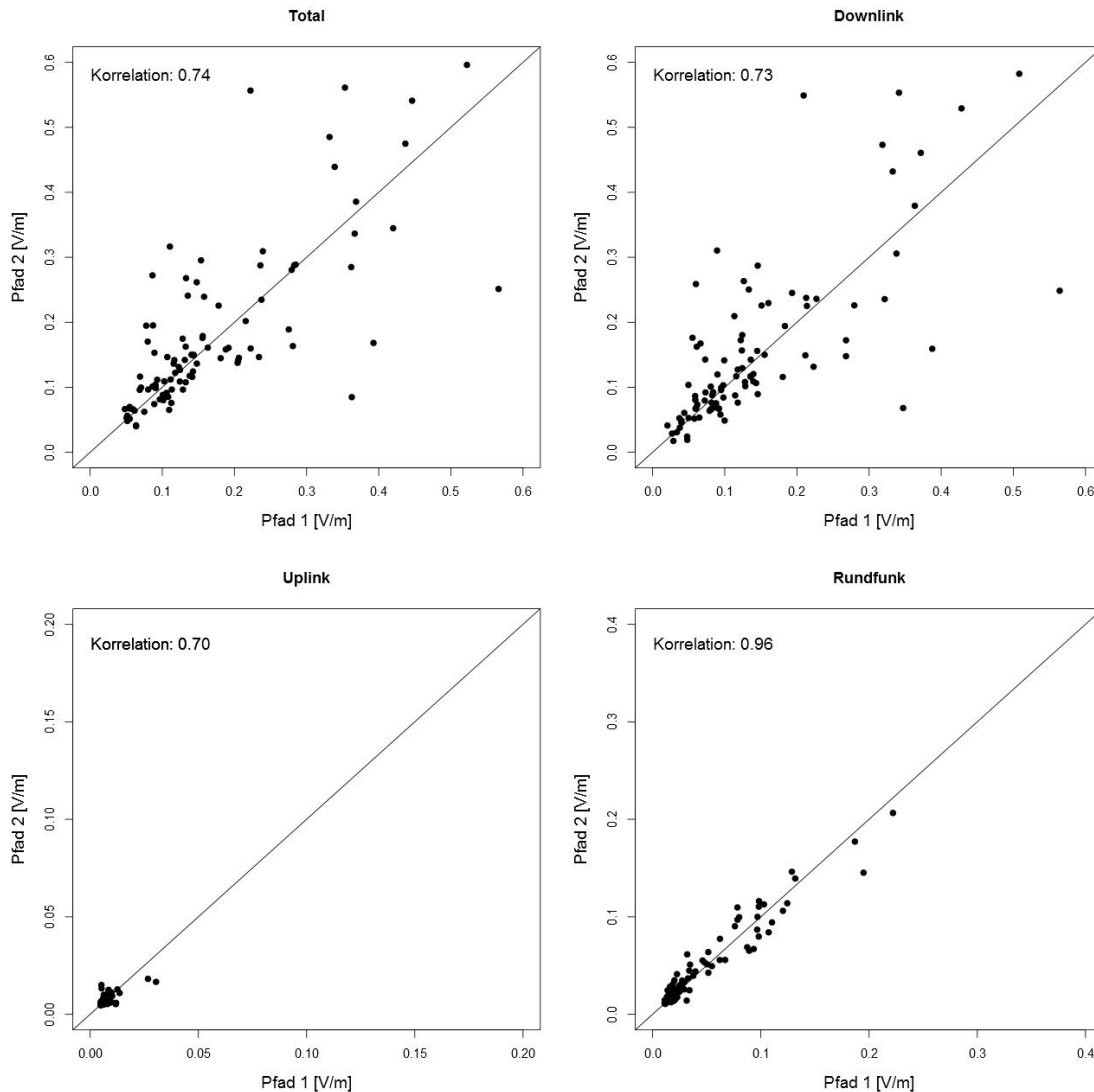


Abbildung 51: Vergleich der *geometrischen* Mittelwerte entlang den beiden Messpfaden in derselben Mikroumgebung (Pilot 2014).

Um zu evaluieren wie lange ein Messpfad sein muss, um einen stabilen Mittelwert für die entsprechende Mikroumgebung zu messen, wird im Folgenden der Einfluss der Messdauer und damit indirekt der Länge der Messpfade auf das Messergebnis dargestellt. Abbildung 52 bis Abbildung 54 zeigen für die Basler Vertiefungsmessungen jeweils den aktuellen Messwert und den kumulativen Mittelwert ab Messbeginn bis zum entsprechenden Zeitpunkt auf der x-Achse der Abbildung. Für HF-EMF und Downlink ist ersichtlich, dass im Stadtzentrum und Geschäftsgebiet die Werte höher sind und der kumulative Mittelwert über die Zeit weniger schwankt als in den Wohngebieten, wo deutlichere Spitzen auftreten. Die Uplink Messungen sind durch einzelne Messwerte charakterisiert und dementsprechend gibt es grössere Variationen beim kumulativen Mittelwert. Beim Rundfunk sind die Messwerte meistens unter der Messgrenze des EME SPY 120 und entsprechend wäre eine Darstellung

der Ergebnisse nicht informativ. Aussagekräftiger sind diesbezüglich die Pilotmessungen aus dem Jahr 2014 mit dem EXPOM3, das eine tiefere Messgrenze hat.

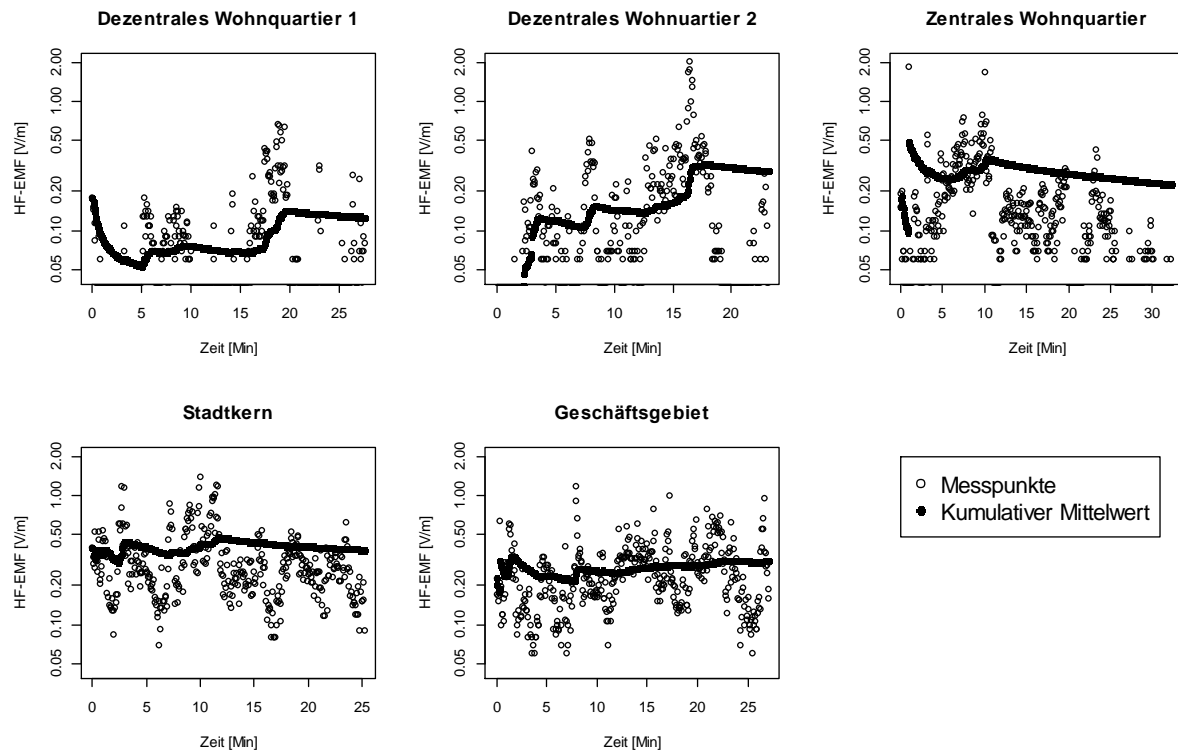


Abbildung 52: Einzelmesswerte und kumulativer Mittelwert ab Beginn der Pfadmessung in verschiedenen Quartieren in Basel am 24. 11. 2011 für *totale HF-EMF* (Vertiefungsmessung; Werte unterhalb der Nachweisgrenze nicht gezeigt).

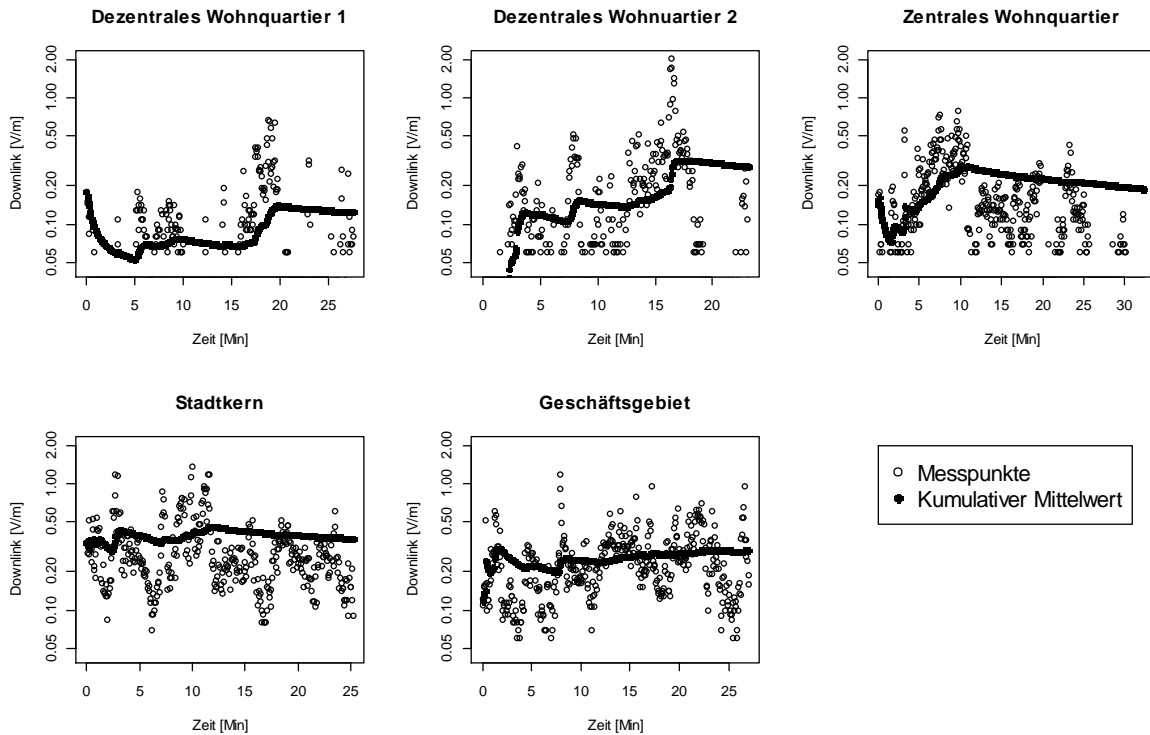


Abbildung 53: Einzelmesswerte und kumulativer Mittelwert ab Beginn der Pfadmessung in verschiedenen Quartieren in Basel am 24. 11. 2011 für die *drei Downlink Bänder kombiniert* (Vertiefungsmessung; Werte unterhalb der Nachweisgrenze nicht gezeigt).

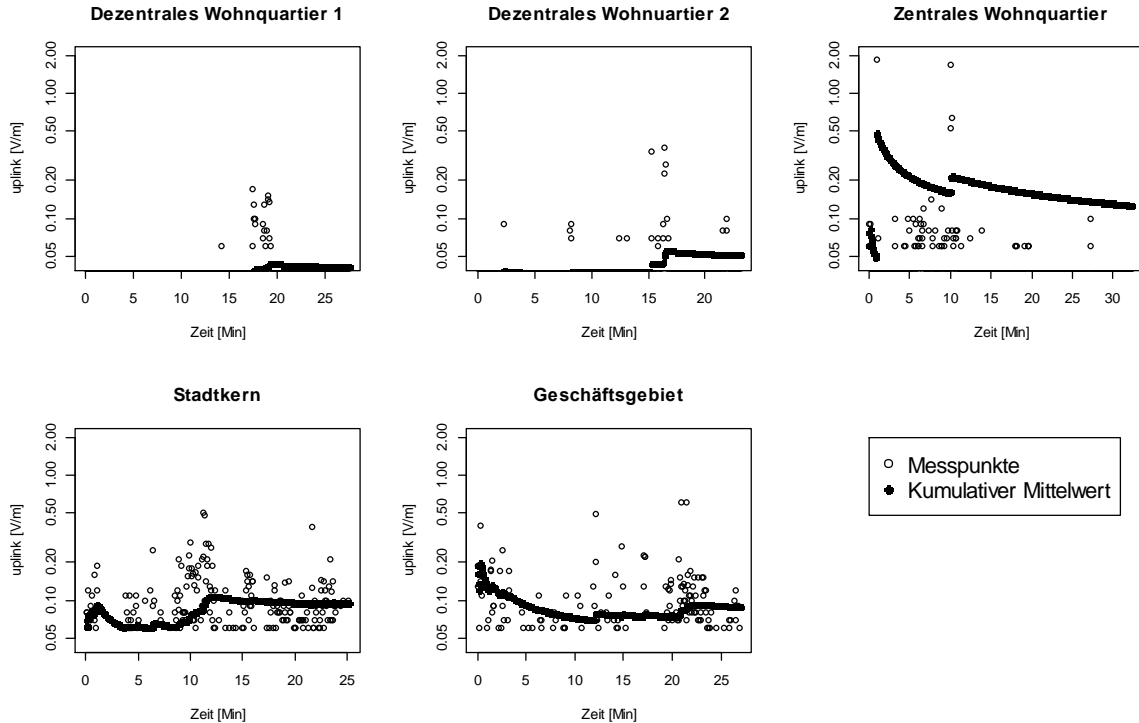


Abbildung 54: Einzelmesswerte und kumulativer Mittelwert ab Beginn der Pfadmessung in verschiedenen Quartieren in Basel am 24. 11. 2011 für die *drei Uplink Bänder kombiniert* (Vertiefungsmessung; Werte unterhalb der Nachweisgrenze nicht gezeigt).

Die obigen Abbildungen beziehen sich auf einen ausgewählten Messtag. An den anderen 23 Messtagen sieht es sehr ähnlich aus. In Tabelle 25 sind die Mittelwerte über alle 24 Messtage pro Mikroumgebung dargestellt und mit dem Mittelwert verglichen, der sich bei reduzierter Messdauer (5, 10 und 20 Minuten) ergeben würde. Wie zu erwarten nimmt die Abweichung vom Mittelwert mit zunehmender Messdauer ab. Eine längere Messdauer bedeutet einen längeren Messpfad und impliziert damit eine grössere örtliche Stichprobe. Nach 5 Minuten liegt der Bereich der Abweichungen in V/m gemessen zwischen -65% und +45%, nach 10 Minuten zwischen -56% und +43% und nach 20 Minuten -0.7% und +13.3%.

Tabelle 25: Differenz der Mittelwerte nach 5, 10 und 20 Minuten Messdauer im Vergleich zum Mittelwert der vollständigen Pfadmessung (Vertiefungserhebung; alle Werte in V/m).

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Dauer [min]	Mittelwert gesamt	Mittelwert 5 min	% Abw. (5 min)	Mittelwert 10 min	% Abw. (10 min)	Mittelwert 20 min	% Abw. (20 min)
Total	dezentrales Wohnquartier 1	25	0.097	0.075	-22	0.079	-18	0.103	6.3
Total	dezentrales Wohnquartier 2	21	0.309	0.113	-63	0.136	-56	0.317	2.4
Total	zentrales Wohnquartier	28	0.195	0.177	-9	0.274	40	0.221	13.3
Total	Stadtkern	22	0.348	0.349	0	0.391	12	0.358	2.7
Total	Geschäftsgebiet	22	0.307	0.259	-16	0.253	-18	0.308	0.4
Downlink	dezentrales Wohnquartier 1	25	0.093	0.075	-20	0.075	-20	0.099	6.4
Downlink	dezentrales Wohnquartier 2	21	0.287	0.101	-65	0.129	-55	0.294	2.3
Downlink	zentrales Wohnquartier	28	0.181	0.142	-22	0.260	43	0.206	13.6
Downlink	Stadtkern	22	0.326	0.341	5	0.373	15	0.335	2.9
Downlink	Geschäftsgebiet	22	0.293	0.233	-21	0.236	-19	0.295	0.6
Uplink	dezentrales Wohnquartier 1	25	0.039	0.036	-9	0.036	-8	0.040	2.0
Uplink	dezentrales Wohnquartier 2	21	0.050	0.042	-15	0.044	-12	0.050	0.1
Uplink	zentrales Wohnquartier	28	0.073	0.106	45	0.088	21	0.080	9.3
Uplink	Stadtkern	22	0.098	0.074	-24	0.096	-2	0.099	0.7
Uplink	Geschäftsgebiet	22	0.072	0.077	6	0.067	-8	0.072	-0.7
Rundfunk	dezentrales Wohnquartier 1	25	0.038	0.035	-6	0.041	9	0.038	2.5
Rundfunk	dezentrales Wohnquartier 2	21	0.037	0.036	-3	0.036	-3	0.036	-0.7
Rundfunk	zentrales Wohnquartier	28	0.045	0.037	-18	0.040	-11	0.047	6.3
Rundfunk	Stadtkern	22	0.065	0.044	-33	0.040	-38	0.066	0.5
Rundfunk	Geschäftsgebiet	22	0.051	0.065	27	0.056	10	0.052	1.2

5.5 Einflussfaktoren auf Exosimetermessungen

Im Folgenden werden Faktoren identifiziert, die das Ergebnis von Exosimetermessungen beeinflussen. Dabei kann es sich einerseits um Faktoren handeln, die eine Verfälschung des Messwertes verursachen wie z.B. die Abschattung durch den eigenen Körper oder das eigene Handy. Der Einfluss solcher Faktoren ist bei der Durchführung von zukünftigen Messungen zu vermeiden. Andererseits werden auch technologiebedingte (örtliche und zeitliche) Schwankungen der Exposition analysiert, die bei der Planung und Selektion von Messgebieten bei einem allfälligen zukünftigen Monitoring zu berücksichtigen sind.

Schliesslich wird mit Hilfe von Regressionsmodellen der Einfluss der Bebauung und Raumnutzung auf die mittlere Exposition statistisch untersucht.

5.5.1 Literaturübersicht

Wenn die Person mit dem Exposimeter ein eingeschaltetes Mobiltelefon mit sich trägt, beeinflusst dieses die Messungen, und zwar nicht nur, wenn es aktiv gebraucht wird, sondern auch, wenn es sich im Stand-by (Ruhe-) Modus befindet (Urbinello und Rööslü 2013). Insbesondere wenn man unterwegs ist, kann dieser Expositionsbeitrag substantiell sein, so dass eine Exposimetermessung erheblich beeinflusst wird. Es scheint auch, dass Smartphones mehr emittieren als die älteren Mobiletelefone aufgrund der Aktualisierungen von Web-basierten Applikationen oder Diensten. Grundsätzlich ist es in Expositionsstudien natürlich erwünscht, auch diesen Expositionsbeitrag zu erfassen, da er für die persönliche Exposition relevant ist. Das Problem ist, dass der von einem Exposimeter erfasste Wert stark von dessen Distanz zum Mobiltelefon abhängt. Häufig ist in diesen Situationen das Mobiltelefon direkt am Körper, während das Messgerät deutlich weiter vom Mobiltelefon entfernt ist. Entsprechend sind die Messungen nicht repräsentativ für die Exposition des Körpers. Natürlich kann es auch umgekehrt sein, dass nämlich das Mobiltelefon und das Messgerät nahe beieinander in einer Tasche mitgetragen werden und gleichzeitig deutlich entfernt vom Körper sind. Wiederum repräsentiert in diesem Fall die gemessene Exposition aber nicht die tatsächliche Exposition der Person. Aus diesem Grund wird in den Pfadmessungen durch instruiertes Personal dessen Telefon ausgeschaltet oder im Flugmodus betrieben. Damit kann man sicherstellen, dass die gemessene Uplink Exposition nur von den Mobiltelefonen von anderen Leuten stammt. Will man die Gesamtexposition eines Körpers berechnen, kann man für die Exposition durch das eigene Mobiltelefon dosimetrische Abschätzungen durchführen und eine Gesamtdosis berechnen (Lauer et al. 2013). In Messstudien verzichten die Probanden jedoch kaum darauf, ein eigenes Mobiltelefon dabei zu haben und gelegentlich auch zu benutzen. Aus diesem Grund wurden z.B. in der QUALIFEX-Studie die Teilnehmenden gebeten, eigene Telefonate in einem Tagebuch zu notieren. Die Messwerte während dieser Zeit wurden dann von der Datenauswertung ausgeschlossen, um eine Abschätzung der Fernfeldexpositionen ohne das eigene Mobiltelefon zu erhalten. Es zeigte sich, dass der Unterschied in der durchschnittlichen Exposition relativ klein ist. Ohne Telefonate war die mittlere persönliche Exposition 0.22 V/m, mit Telefonaten 0.24 V/m (Frei et al. 2010). Mit diesem Ansatz können jedoch die Emissionen des eigenen Mobiltelefons im Stand-by Modus nicht ausgeschlossen werden und es ist auch zu erwarten, dass die Einträge der eigenen Anrufe nicht immer

korrekt und vollständig sind. So zeigte sich in der QUALIFEX-Studie, dass eine Korrelation zwischen dem durchschnittlichen Telefongebrauch und der Uplink-Exposition bestand. Dies deutet darauf hin, dass die Uplink-Expositionsmessung vom eigenen Mobiltelefon beeinflusst ist. Ein weiteres Indiz für diese Tatsache ist auch in Tabelle 15 zu sehen, wo der Anteil der Uplink-Expositionen in den QUALIFEX-Daten draussen deutlich höher ist als bei den Monitoringmessungen mit ausgeschaltetem Mobiltelefon.

Neben dem eigenen Mobiltelefon wurde in der QUALIFEX-Studie eine weitere Reihe von Einflussfaktoren identifiziert, die mit der persönlichen Exposition korrelieren: Eigenschaften der Wohnung (Art der Mauer, Verglasung, Stockwerk), ob man ein W-LAN oder ein DECT zu Hause hat, die Aufenthaltszeit draussen, beim Einkaufen, in Restaurants und im Auto sowie das Arbeitspensum (Frei et al. 2009a).

Für Pfadmessungen finden alle bisherigen Studien in städtischen Gebieten höhere HF-EMF-Expositionen als in ländlichen Gebieten (detailliert in Kapitel 5.1.1 diskutiert). Ansonsten wurde der Einfluss von geographischen Variablen auf HF-EMF-Expositionen bisher nicht untersucht.

Tageszeitliche und Wochentagunterschiede wurden in einigen Studien analysiert. In der französischen Probandenstudie wurde praktisch kein Unterschied zwischen der HF-EMF-Exposition in der Nacht und am Tag gefunden (0.197 V/m vs. 0.204 V/m) (Viel et al. 2009a). Wochentagunterschiede waren auch gering; die Exposition bewegte sich zwischen 0.206 V/m (Samstag) und 0.216 V/m (Sonntag) (Viel et al. 2011).

In der holländischen Probandenstudie war die HF-EMF-Exposition am Abend (18:00-23:00) am grössten (0.38 V/m), während sie am Tag und in der Nacht nur 0.26 V/m bzw. 0.19 V/m betrug (Bolte und Eikelboom 2012). Dies ist aber nicht nur auf die zeitliche Variabilität der Quellen zurückzuführen, sondern in erster Linie durch die unterschiedlichen Aktivitäten der Probanden zu den verschiedenen Tageszeiten bedingt. Entsprechend ändert sich auch die Quellenzusammensetzung über den Tag. Wenn die Probanden am Messtag gearbeitet hatten, war die Exposition höher als an freien Tagen (0.31 vs. 0.23 V/m).

In der griechischen Studie in 40 Innenräumen war der Unterschied zwischen Messungen am Tag (0.47 V/m) und in der Nacht (0.45 V/m) gering (Markakis und Samaras 2013). (Vermeeren et al. 2013) berechneten für jede halbe Stunde des Tages das Verhältnis zum maximalen Halbstundenwert. In Belgien lagen die Verhältnisse sowohl für Total HF-EMF als auch für GSM900 Downlink zwischen 0.85 und 1.0, wobei die höchsten Werte zwischen 10:00 und 18:00 auftraten. In Griechenland war die zeitliche Variabilität grösser und lag zwischen ca. 0.60 und 1.0 für totale HF-EMF und 0.7 und 1.0 für GSM900. Die höchsten

Werte traten zwischen 12:00 und Mitternacht auf. Ein ähnliches tageszeitliches Muster wurde in GSM und UMTS Basisstationsmessungen in Paris beobachtet (Mahfouz et al. 2012).

Tabelle 26: Analyse der Datenvarianz von den Messungen aus Basel und Amsterdam in der Vertiefungserhebung (Urbinello et al. 2014a).

Source	d.f.	Explained variance ^a	F	p
<i>Total</i>				
Measurement day	11	0.30	0.15	0.10
Time of the day ^b	2	0.18	0.51	0.60
City	1	44.84	247.92	<0.001
Area	4	32.93	45.52	<0.001
Whole model	18	83.54	25.66	<0.001
<i>Downlink</i>				
Measurement day	11	0.59	0.33	0.98
Time of the day ^b	2	0.20	0.61	0.55
City	1	47.37	292.5	<0.001
Area	4	31.31	48.34	<0.001
Whole model	18	85.26	29.25	<0.001
<i>Uplink</i>				
Measurement day	11	3.62	0.9	0.54
Time of the day ^b	2	1.51	2.06	0.13
City	1	39.41	107.63	<0.001
Area	4	15.88	10.84	<0.001
Whole model	18	67.41	10.23	<0.001

^a Percentage of total variance.

^b 3 categories: 09:15–11:59; 12:00–12:59 and 13:00–16:50.

Im Rahmen der Vertiefungserhebung wurde anhand der Messungen von Basel und Amsterdam eine Varianzanalyse durchgeführt (Urbinello et al. 2014a). Diese ergab, dass der Wochentag und die Tageszeit keinen nennenswerten Einfluss auf die in Pfadmessungen erhobenen Mittelwerte der Exposition hatten (Tabelle 26). Die Messungen wurden alle an Werktagen zu Arbeitszeiten durchgeführt.

5.5.2 Eigene Auswertungen

Um bestimmende Faktoren (Determinanten) für die im Pilot 2014 gemessene Downlink-, Uplink- sowie Rundfunkexposition zu identifizieren, wurden hierarchische Regressionsmodelle für die Mittelwerte pro Messpfad gerechnet. Da Feldstärken nur in Bezug auf Leistungsflussdichten additiv sind, sind alle Berechnungen in mW/m² durchgeführt worden und auch entsprechend berichtet. In einem ersten Modell wurde die Exposition mit

dem Typ Mikroumgebung verglichen und in einem zweiten Modell mit der ARE- und BfS-Gemeindetypologie. In einem dritten Schritt wurden mittels iterativen Variablen-selektionsprozess geographische Variablen gesucht, die unabhängig vom Typ der Mikroumgebung oder von der Gemeindetypologie mit der Exposition assoziiert sind. Anschliessend wurde geprüft, ob die Variablen „Typ Mikroumgebung“ oder „Gemeindetypologie“ das Modell gemäss dem AIC (Akaike Informations-Kriterium) weiter verbessern. Zuletzt wurden in das so erhaltene Modell noch die Tageszeit und der Wochentag der Messung als mögliche Determinanten für die zeitliche Variabilität eingeschlossen.

Tabelle 27 zeigt, dass in Dorfzentren und allen Wohngebieten die Downlink-Exposition 0.38 bis 0.48 mW/m² geringer ist als im Stadtzentrum. Noch etwas höher ist die Exposition in den Industriegebieten. Das Modell reflektiert die in Abbildung 25 dargestellten Unterschiede zwischen den einzelnen Typen von Mikroumgebungen. Es ist auch ersichtlich, dass tendenziell im ländlichen Wohngebiet die Exposition tiefer ist als in dezentralen oder zentralen städtischen Wohngebieten. In Bezug auf die ARE-Gemeindetypologie ergeben sich die geringsten Werte für Agrargemeinden (Referenz in Tabelle 28). Am höchsten ist die Downlink-Exposition in Grosszentren, deren Nebenzentren und in Mittelzentren. Dies deutet darauf hin, dass die Downlink-Exposition mit zunehmender Urbanisierung zunimmt. Im dritten Modell wird dieser Befund auch in Bezug auf die Charakteristik der Mikroumgebungen bestätigt. Neben dem Industrieanteil pro Mikroumgebung ist die mittlere Anzahl Geschosse pro Mikroumgebung und die Dichte an Mobilfunkbasisstationen positiv mit der Downlink-Exposition korreliert (Tabelle 29). Es hat sich gezeigt, dass weder der Typ der Mikroumgebung noch die Gemeindetypologie einen darüber hinaus gehenden Erklärungswert haben, und entsprechend sind die in Tabelle 27 und Tabelle 28 dargestellten Ergebnisse eine Folge in Tabelle 29 aufgelisteten Einflussfaktoren.

Tabelle 27: Regressionsmodell für die Höhe der Downlink-Exposition in Abhängigkeit vom Typ der Mikroumgebung (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Stadtzentrum	0	(Referenz)	
Dorfzentrum	-0.475	0.073	0.000
zentrales städt. Wohngebiet	-0.376	0.091	0.000
dezentrales städt. Wohngebiet	-0.446	0.089	0.000
ländliches Wohngebiet	-0.478	0.073	0.000
Industriegebiet	0.106	0.089	0.237

Tabelle 28: Regressionsmodell für die Höhe der Downlink-Exposition in Abhängigkeit von der ARE Klassierung (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Agrargemeinden	0	(Referenz)	
Einzelzentren	0.017	0.129	0.895
Grosszentren	0.459	0.098	0.000
Gürtel der Grosszentren	0.122	0.111	0.274
Gürtel der Mittelzentren	0.134	0.114	0.243
Kleinzentren	0.073	0.138	0.598
Mittelzentren	0.262	0.102	0.011
Nebenzentren der Grosszentren	0.340	0.102	0.001
periurbane ländliche Gemeinden	0.036	0.109	0.744
Touristische Gemeinden	-0.012	0.118	0.920

Tabelle 29: „Bestes“ Regressionsmodell für die Höhe der Downlink-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Details siehe Text) (*Dichte von mittleren und starken Mobilfunkbasisstationen [Anzahl/km²]).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Anteil Industrie	0.518	0.074	0.000
Mittlere Anzahl Geschosse	0.062	0.016	0.000
Dichte von Basisstationen	0.004	0.001	0.000

Ergänzt man das Downlink Modell mit dem Wochentag und der Tageszeit, haben beide Variablen keinen zusätzlichen Erklärungswert und verbessern das Modell (gemäss AIC-Kriterium) nicht (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: Einfluss von Wochentag und Tageszeit auf die Höhe der Downlink-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (*Dichte von mittleren und starken Mobilfunkbasisstationen [Anzahl/km²], **Anfangszeit der Messung auf dem entsprechenden Pfad).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Anteil Industrie	0.556	0.075	0.000
Mittlere Anzahl Geschosse	0.051	0.016	0.002
Dichte von Basisstationen	0.004	0.001	0.000
Montag	0	(Referenz)	
Dienstag	-0.112	0.070	0.108
Mittwoch	-0.010	0.080	0.898
Donnerstag	-0.052	0.069	0.455
Freitag	0.023	0.073	0.759
Samstag	0.046	0.135	0.732
Sonntag	0.177	0.101	0.081
bis 10:00	0	(Referenz)	
10:00-12:00	0.048	0.058	0.404
12:00-13:00	0.020	0.068	0.766
nach 13:00	-0.002	0.064	0.978

Die Uplink-Exposition ist im Stadtzentrum höher als in den anderen Typen von Mikroumgebungen (Tabelle 31). In Bezug auf die ARE Klassierung gibt es keine Unterschiede zwischen den Gemeindetypen. Tendenziell ist in Gebieten mit tiefer Bevölkerungsdichte gemäss CORINE-Klassierung (LDRES) die Uplink-Exposition etwas erniedrigt. Der einzige signifikante Faktor ist eine Zunahme der Uplink-Exposition mit zunehmender Dichte an Mobilfunkbasisstationen. Der Koeffizient ist jedoch sehr gering. Die maximale Dichte betrug in den untersuchten Mikroumgebungen 92 Mobilfunkbasisstationen pro Quadratkilometer, was gemäss Regressionsmodell zu einer Zunahme der Uplink-Exposition um annähernd 2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ führen würde. Der Wochentag hatten keinen Einfluss auf die Uplink-Exposition, während ein schwacher Tagesgang erkennbar war (Tabelle 33).

Tabelle 31: Regressionsmodell für die Höhe der Uplink-Exposition in Abhängigkeit vom Typ der Mikroumgebung (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Stadtzentrum	0	(Referenz)	
Dorfzentrum	-0.003	0.001	0.002
zentrales städt. Wohngebiet	-0.002	0.001	0.033
dezentrales städt. Wohngebiet	-0.003	0.001	0.004
ländliches Wohngebiet	-0.003	0.001	0.000
Industriegebiet	-0.003	0.001	0.001

Tabelle 32: „Bestes“ Regressionsmodell für die Höhe der Uplink-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Modelle in mW/m² gerechnet, *Dichte von mittleren und starken Mobilfunkbasisstationen [Anzahl/km²]).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
LDRES	-0.001	0.001	0.214
Dichte von Basisstationen	0.00002	0.00001	0.034

Tabelle 33: Einfluss von Wochentag und Tageszeit auf die Höhe der Uplink-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Modelle in mW/m² gerechnet, *Dichte von mittleren und starken Mobilfunkbasisstationen [Anzahl/km²], **Anfangszeit der Messung auf dem entsprechenden Pfad).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
LDRES	0.000	0.001	0.531
Dichte von Basisstationen	0.00003	0.00001	0.011
Montag	0	(Referenz)	
Dienstag	0.001	0.001	0.435
Mittwoch	0.000	0.001	0.661
Donnerstag	0.001	0.001	0.325
Freitag	0.000	0.001	0.858
Samstag	0.001	0.002	0.659
Sonntag	-0.001	0.001	0.615
bis 10:00	0	(Referenz)	
10:00-12:00	0.000	0.001	0.860
12:00-13:00	0.002	0.001	0.052
nach 13:00	0.001	0.001	0.306

Immissionen durch Rundfunksender waren im zentralen städtischen Wohngebiet höher als im Stadtzentrum (Tabelle 34) und in Bezug auf die ARE-Typologie in Grosszentren und

periurbanen ländlichen Gemeinden etwas höher als in Agrargemeinden und in Mittel- und Kleinzentren (Tabelle 35). Der einzige Faktor, der signifikant mit Rundfunksendern assoziiert war, war LDRES (Tabelle 36). In Gebieten mit tiefer Bevölkerungsdichte war die Exposition tendenziell höher als in den anderen Gebieten (z.B. Industrie, Landschaft, HDRES). Messungen, die nach 12:00 begonnen wurden, sind zwar signifikant höher als diejenigen, die vor 10:00 gemacht wurden (Tabelle 37), dennoch hat ein Modell mit Einschluss der Tageszeit keinen besseren Erklärungswert als ein Modell nur mit der Bevölkerungsdichte als erklärende Variable. Wochentage sind offensichtlich nicht mit Immissionen von Rundfunksendern korreliert.

Tabelle 34: Regressionsmodell für die Höhe der Rundfunk-Exposition in Abhängigkeit vom Typ der Mikroumgebung (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Stadtzentrum	0	(Referenz)	
Dorfzentrum	-0.006	0.009	0.483
zentrales städt. Wohngebiet	0.029	0.011	0.011
dezentrales städt. Wohngebiet	0.005	0.011	0.636
ländliches Wohngebiet	-0.002	0.009	0.831
Industriegebiet	0.021	0.011	0.056

Tabelle 35: Regressionsmodell für die Höhe der Rundfunk-Exposition in Abhängigkeit von der ARE Klassierung (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Agrargemeinden	0	(Referenz)	
Einzelzentren	0.010	0.013	0.432
Grosszentren	0.041	0.010	0.000
Gürtel der Grosszentren	0.020	0.011	0.088
Gürtel der Mittelzentren	-0.005	0.012	0.689
Kleinzentren	-0.002	0.014	0.905
Mittelzentren	-0.002	0.011	0.877
Nebenzentren der Grosszentren	-0.002	0.011	0.866
periurbane ländliche Gemeinden	0.027	0.011	0.019
Touristische Gemeinden	0.005	0.012	0.693

Tabelle 36: „Bestes“ Regressionsmodell für die Höhe der Rundfunk-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Modelle in mW/m² gerechnet).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
LDRES	0.036	0.005	0.000

Tabelle 37: Einfluss von Wochentag und Tageszeit auf die Höhe der Rundfunk-Exposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Modelle in mW/m^2 gerechnet, *Anfangszeit der Messung auf dem entsprechenden Pfad).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
LDRES	-0.025	0.006	0.000
Montag	0	(Referenz)	
Dienstag	0.020	0.009	0.031
Mittwoch	-0.002	0.011	0.861
Donnerstag	0.012	0.009	0.183
Freitag	-0.005	0.010	0.593
Samstag	-0.008	0.018	0.677
Sonntag	-0.010	0.013	0.427
bis 10:00	0	(Referenz)	
10:00-12:00	0.006	0.008	0.430
12:00-13:00	0.024	0.009	0.008
nach 13:00	0.023	0.008	0.006

Da Pfadmessungen typischerweise 1 bis 1.5 m über Boden durchgeführt werden, stellt sich die Frage, ob in höheren Stockwerken höhere Werte gemessen würden. Es wurde deshalb von den Punktmessungen in den Schlafzimmern der QUALIFEX-Studienteilnehmenden die mittlere Exposition in Abhängigkeit vom Stockwerk berechnet. Aus Tabelle 38 ist ersichtlich, dass im gesamten QUALIFEX-Kollektiv die HF-EMF-Exposition zu höher gelegenen Stockwerken hin deutlich zunimmt. Das liegt daran, dass gezielt Messungen bei stark exponierten Personen gemacht wurden und diese Expositionssituation in städtischen Gebieten häufiger in den oberen Stockwerken anzutreffen ist. Bezieht man sich nur auf das nicht-selektierte Kollektiv (Bevölkerungsstichprobe), ist der Anstieg der Exposition pro Stockwerk geringer. Im 4. Stock beträgt das mittlere HF-EMF 0.21 V/m. Dieser Wert ist eher tiefer als der Durchschnitt der Qualifexmessungen inkl. Aussenmessungen und auch tiefer als die typischen Werte, die man im Pilot 2014 draussen auf Strassenniveau gemessen hat. Das liegt neben einem möglichen Anstieg der HF-EMF-Exposition in den letzten Jahren in erster Linie daran, dass an Aussenplätzen das HF-EMF nicht gedämpft wird und deshalb die Expositionen im Allgemeinen höher sind als drinnen. In der deutschen Studie, wo HF-EMF Messungen in 1'348 verschiedenen Schlafzimmern stattfanden, war nur ein kleiner Stockwerkunterschied erkennbar. Am höchsten war die HF-EMF-Exposition in Wohnungen oberhalb des 5. Stocks (0.131 V/m) gefolgt von 4. und 5. Stockwerk (0.127 V/m). Im 2. Und 3. Stockwerk sowie im 1. Stock/Erdgeschoss war die Exposition 0.11 V/m. Erwartungsgemäss war der Stockwerkgradient nur für die Bänder UKW Radio, TV und

Mobilfunkbasisstationen ersichtlich mit dem grössten Gradient für Letztere (ca. Faktor 3 in V/m zwischen Wohnen oberhalb des 5. Stocks und Erdgeschoss/1. Stock) (Breckenkamp et al. 2012). Der noch grössere Stockwerkunterschied in der QUALIFEX-Studie im Vergleich zur deutschen Studie liegt möglicherweise daran, dass bei dieser Auswertung noch der Effekt der Urbanisierung überlagert ist. Wie in Tabelle 29 gezeigt, ist die Downlink-Exposition in Gebieten mit höheren Gebäuden auch am Boden tendenziell höher als in Gebieten mit weniger hohen Gebäuden.

Tabelle 38: Mittlere EMF-Exposition in Abhängigkeit vom Stockwerk aus den Qualifex-Schlafzimmermessungen (alle Messwerte in V/m).

Kollektiv	n Stockwerk	HF-EMF	Downlink	Uplink	Rundfunk
alle	17 Erdgeschoss	0.105	0.035	0.010	0.096
alle	50 1. Stock	0.122	0.062	0.011	0.103
alle	26 2. Stock	0.139	0.105	0.013	0.086
alle	21 3. Stock	0.171	0.153	0.011	0.057
alle	15 4. Stock	0.249	0.234	0.010	0.060
alle	11 >4. Stock	0.491	0.485	0.011	0.073
Bevoelkerungsstichprobe	14 Erdgeschoss	0.044	0.029	0.011	0.021
Bevoelkerungsstichprobe	44 1. Stock	0.092	0.050	0.011	0.074
Bevoelkerungsstichprobe	21 2. Stock	0.098	0.081	0.014	0.041
Bevoelkerungsstichprobe	17 3. Stock	0.146	0.127	0.012	0.050
Bevoelkerungsstichprobe	11 4. Stock	0.214	0.196	0.010	0.067
Bevoelkerungsstichprobe	5 >4. Stock	0.107	0.099	0.010	0.037

6 Resultate für niederfrequente Felder

6.1.1 Literaturübersicht

In einer Zufallsstichprobe von österreichischen Wohnungen war das mittlere elektrische Feld im Bereich von 30 V/m (Tomitsch und Dechant 2012). Das 50 Hz Magnetfeld lag am Tag bei rund 0.05 μT und das 16.7 Hz Feld (Bahnstrom) bei 0.002 μT . In der Nacht war das Magnetfeld im Frequenzbereich 50-2000 Hz im Durchschnitt bei rund 0.025 μT . Im Jahr 2006 lagen 41 von 226 Messungen der Kurzzeitwerte oberhalb von 0.1 μT . Der Grund dafür war ein hoher Stromfluss ($n=18$), ein Radiowecker (17), ein 12 V Halogensystem (2) oder andere Transformatoren. Im Jahr 2009 war der Wert von 0.1 μT bei 28 von 213 Messungen überschritten, wiederum meistens wegen hohen Stromflüssen (15). Nach den ersten NF-MF Messungen wurde nach Möglichkeit versucht, die Expositionssituation um das Bett zu verbessern, beispielsweise durch das Entfernen von Geräten oder Verkabelungen. Dadurch konnte im Durchschnitt das Magnetfeld um etwa die Hälfte reduziert werden (Tomitsch et al. 2010).

In einer Schweizer Studie aus den 90er Jahren wurden bei 552 Personen die persönliche niederfrequente Magnetfeld (NF-MF) Exposition während 24 Stunden mit einem EMDEX II gemessen (Stratmann et al. 1995). Die täglichen Mittelwerte lagen für 75 % der Teilnehmer unterhalb von 0.2 μT , wobei die höchsten Werte am Arbeitsplatz gemessen wurden. Der Einfluss verschiedener Quellen auf die niederfrequente Magnetfeldexposition wurde evaluiert. Beispielsweise konnte festgestellt werden, dass in der Nachtphase die Distanz zwischen dem Messgerät, das unter dem Kopfkissen deponiert werden sollte und netzwerkbetriebenen Geräten (z.B. Radiowecker) eine wichtige Rolle spielte. Insbesondere bei Abwesenheit von nahen netzbetriebenen Geräten konnte ein Einfluss von nahe gelegenen Freileitungen auf die Expositionshöhe festgestellt werden.

Im Schweizer Teil von TransExpo wurden Punktmessungen in Wohnungen von 18 Häusern mit Transformatoren durchgeführt. In acht Wohnungen, die direkt neben oder über dem Raum mit dem Transformator lagen, betrug die mittlere Magnetfeldexposition 0.59 μT (Rösli et al. 2011). In den zehn Wohnungen, die nur mit den Ecken an den Transformatorenraum grenzten, war die Exposition 0.14 μT . In 21 Wohnungen aus denselben Gebäuden, die in keiner Weise an einen Transformatorenraum grenzten, war die Magnetfeldexposition 0.10 μT . Die Studie zeigt, dass nur Bewohner von Wohnungen in unmittelbarer Nähe von Transformatorenräumen deutlich erhöhten Magnetfeldexpositionen ausgesetzt sind. Es zeigte sich auch, dass diese Unterschiede mit Messungen an der

Türschwelle nicht vollständig erfasst werden. Die Magnetfeldexposition zeigte im zeitlichen Verlauf die höchsten Werte am Tag, wobei in vielen Wohnungen erkenntlich war, dass in der Nacht mit Niedertarif ein relevanter Stromkonsument zugeschaltet wird (siehe z.B. um 2:00 in Abbildung 55).

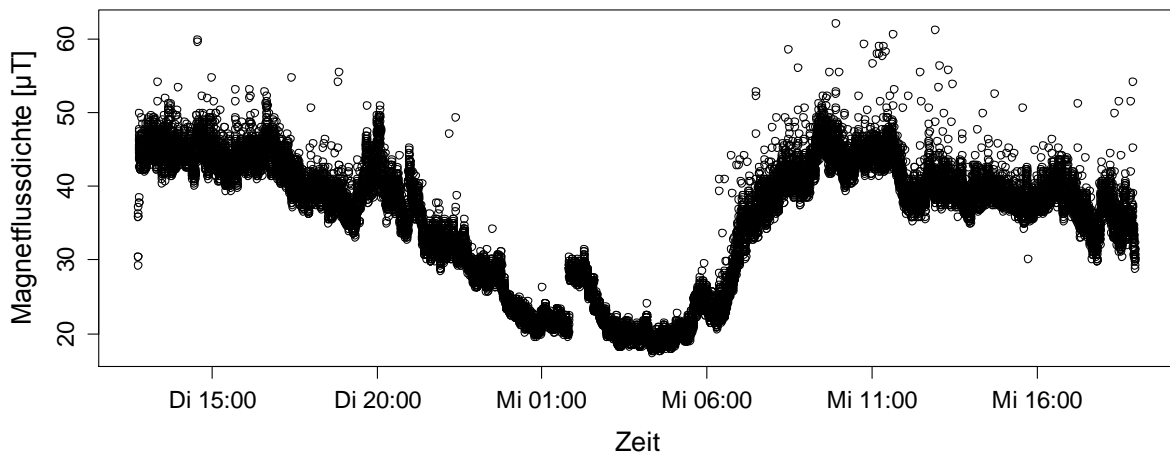


Abbildung 55: 24h Messung der NF-MF im Raum einer Transformatorenstation, adaptiert von Rösli et al. (2011).

In der ARIMMORA Studie wurde bei 172 italienischen und Schweizer Kindern zwischen 5-13 Jahren die persönliche Exposition während mindestens 24 Stunden im Sommer- und Winterhalbjahr gemessen. Die mittlere persönliche Magnetfeldexposition war $0.04 \mu\text{T}$, wobei personenbezogene Mittelwerte bis $1.2 \mu\text{T}$ aufgetreten sind. Die mittlere Magnetfeldexposition in den Kinderzimmern war $0.06 \mu\text{T}$ (maximaler Mittelwert eines Studienteilnehmenden: $0.7 \mu\text{T}$).

Mittels hierarchischer Modelle wurden mögliche Determinanten für die Ergebnisse der personenbezogenen und der Kinderzimmermessungen untersucht. Kinder, die näher als 100 m von einer Höchstspannungsleitung ($\geq 220 \text{ kV}$) wohnten oder zur Schule gingen, hatten ungefähr eine drei Mal höhere Magnetfeldexposition als die anderen Kinder. Im Kinderzimmer war die Exposition im Durchschnitt sogar 4.5 Mal höher. Entgegen den Erwartungen hatten Kinder in Gebäuden mit Transformatoren keine erhöhten Expositionswerte aufgrund von personenbezogenen und Kinderzimmermessungen. Es grenzten jedoch praktisch keine Wohnungen der Studienteilnehmer unmittelbar an einen Transformatorenraum.

Im Winter waren die Ergebnisse der personenbezogenen und der Kinderzimmermessungen bei den wenigen hoch Exponierten etwas höher als im Sommer. Für das gesamte Kollektiv war dieser Effekt aber nicht sichtbar. Am Wochenende war die Exposition im Kinderzimmer gleich wie unter der Woche. Die persönliche Exposition war bei Kindern in der Nähe von Höchstspannungsleitungen am Wochenende im Vergleich zu Werktagen jedoch etwas erhöht, weil sie dann mehr Zeit zu Hause verbrachten. Der Vergleich von Sommer- und Wintermessungen bei den gleichen Probanden ergab eine tiefe Variabilität der Kinderzimmermessungen (Spearman Korrelation von 0.86 für den geometrischen und 0.82 für den arithmetischen Mittelwert). Für die personenbezogene Messung war die Reproduzierbarkeit etwas tiefer aber immer noch recht hoch (0.79 für den geometrischen bzw. 0.60 für den arithmetischen Mittelwert). Die Korrelation zwischen personenbezogener und Kinderzimmermessung betrug 0.86 für den geometrischen und 0.76 für den arithmetischen Mittelwert.

6.1.2 Eigene Auswertungen

Tabelle 39 gibt einen Überblick über die Punktmessungen in der TransExpo Studie (siehe Kapitel 3.2.3).

Tabelle 39: Variation von Punktmessungen in der TransExpo-Studie. Alle Werte in μT (ausser CV=Variationskoeffizient).

Frequenzband	Gebiet	Anzahl		Mittelwert plus					SD	CV
		Mittelwerte	Mittelwert	Min.	25. Perz.	Median	75. Perz.	Max.		
gesamte Wohnung	hoch exponiert	18	0.339	0.066	0.102	0.175	0.375	1.295	0.703	1.075
gesamte Wohnung	mittel exponiert	10	0.142	0.030	0.050	0.081	0.140	0.438	0.286	1.017
gesamte Wohnung	tief exponiert	11	0.067	0.018	0.047	0.059	0.066	0.203	0.115	0.716
Wohnzimmer	hoch exponiert	17	0.281	0.043	0.087	0.129	0.239	1.802	0.703	1.506
Wohnzimmer	mittel exponiert	8	0.123	0.035	0.054	0.069	0.106	0.448	0.263	1.130
Wohnzimmer	tief exponiert	11	0.066	0.013	0.040	0.053	0.062	0.257	0.131	0.996
Schlafzimmer	hoch exponiert	18	0.405	0.046	0.083	0.152	0.480	2.001	0.941	1.322
Schlafzimmer	mittel exponiert	10	0.134	0.012	0.055	0.072	0.134	0.438	0.275	1.057
Schlafzimmer	tief exponiert	11	0.072	0.012	0.042	0.064	0.075	0.236	0.130	0.821

Die mittlere Magnetfeldexposition in der Wohnung, die jeweils am nächsten beim Transformatorenraum war, betrug $0.339 \mu\text{T}$ (hoch exponiert). In der nächstgelegenen Wohnung direkt neben der am höchsten exponierten betrug die Exposition $0.142 \mu\text{T}$ und in den übrigen Wohnungen im selben Haus $0.067 \mu\text{T}$. Die Expositionsverteilung in den Wohnzimmern und Schlafzimmern war relativ ähnlich für die drei Gruppen. Die Wohnungsmittelwerte stammen je nach Wohnungsgrösse von 3-7 Räumen und es zeigte sich, dass der Variationskoeffizient (CV) für diese Werte etwas geringer war als für die Werte von einzelnen Zimmern. Das zeigt, dass eine solche Messung weniger Streuung aufweist und die mittlere Exposition der Wohnung repräsentativer abbildet als Werte, die nur von

einem Zimmer stammen. Der Unterschied ist jedoch insbesondere bei den tief Exponierten relativ gering. Das ist zu erwarten, da man bei den hoch Exponierten einen relativ grossen Expositionsgradienten durch die lokale Quelle im Haus hat. Bei den tief Exponierten ist dies nicht mehr der Fall. Die tief Exponierten entsprechen eher der Datenverteilung, die man in einer zufällig gewählten Stichprobe von Wohnungen erwarten würde. Das zeigt, dass man in solchen Wohnungen mit zusätzlichen Raummessungen nur noch wenig neue Informationen erhält.

Abbildung 56 zeigt die Verteilung aller NF-MF Messungen, die im Rahmen des Pilots 2014 erhoben wurden. Es ist ersichtlich, dass die Werte sehr schief verteilt sind. Selbst nach einer logarithmischen Transformation sind die Werte noch sehr schief verteilt mit sehr vielen Messwerten im unteren Spektrum. Vereinzelt treten aber auch sehr hohe Werte auf. Von den 160'396 Messwerten sind 287 Messwerte höher als 10 μT (Maximum: 32 μT). rund 1% der Messwerte ist höher als 1 μT und rund 11% höher als 0.4 μT . Der harmonische Anteil (100-800 Hz) ist deutlich geringer. Nur 0.3% aller Messwerte sind höher als 1 μT .

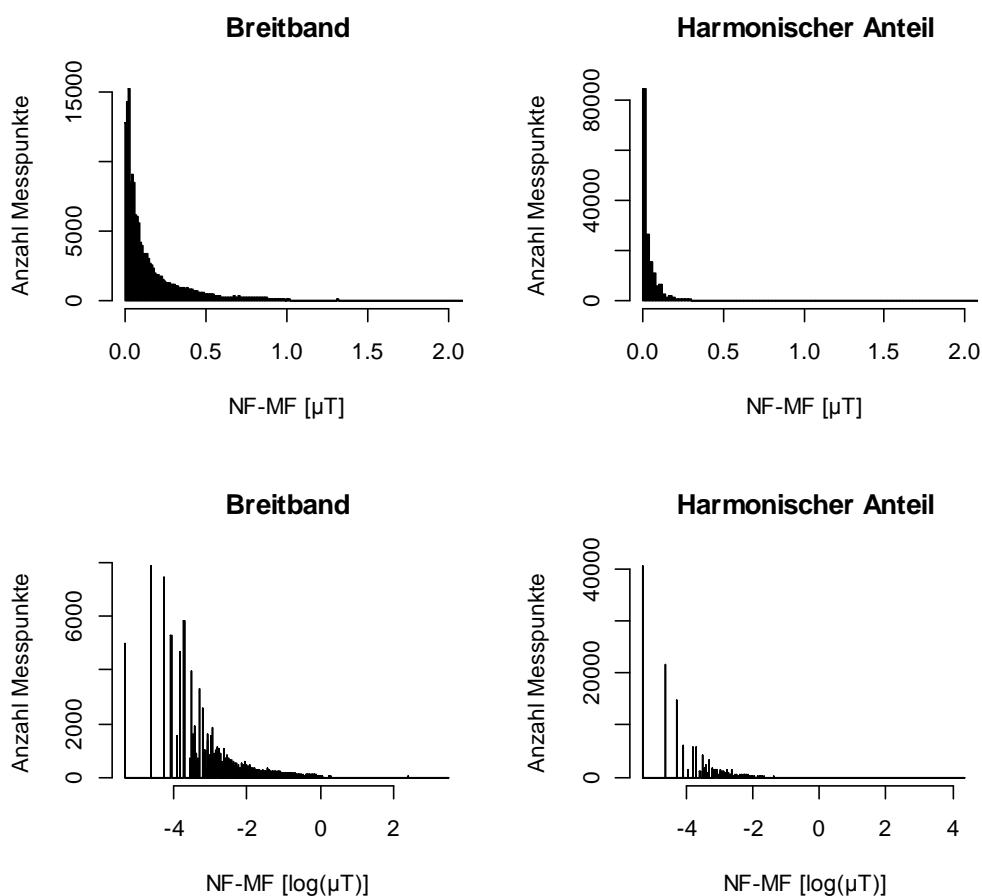


Abbildung 56: Verteilung aller NF-MF Messwerte des Pilots 2014 jeweils für Breitband (40-800 Hz) und für den harmonischen Anteil (100-800 Hz).

Abbildung 57 zeigt die mittlere NF-MF-Exposition in den sechs Typen von Mikroumgebungen und in den öffentlichen Verkehrsmitteln, wobei zu beachten ist, dass Gleichstrom von Tram und 16.7 Hz Strom der Bahn nicht erfasst wurden. Abrupte Stromänderungen („Transienten“) können aber in den Frequenzbereich des Messgerätes (40-800 Hz) einfließen. Am höchsten ist die NF-MF-Exposition in Stadtzentren und Bussen (rund 0.3 μT), am tiefsten in Industrie- und ländlichen Wohngebieten (rund 0.15 μT). Die harmonischen Oberwellen machen im Tram rund 0.1 μT aus und sind wiederum in Industrie- und ländlichen Wohngebieten mit rund 0.04 μT am geringsten (Abbildung 58).

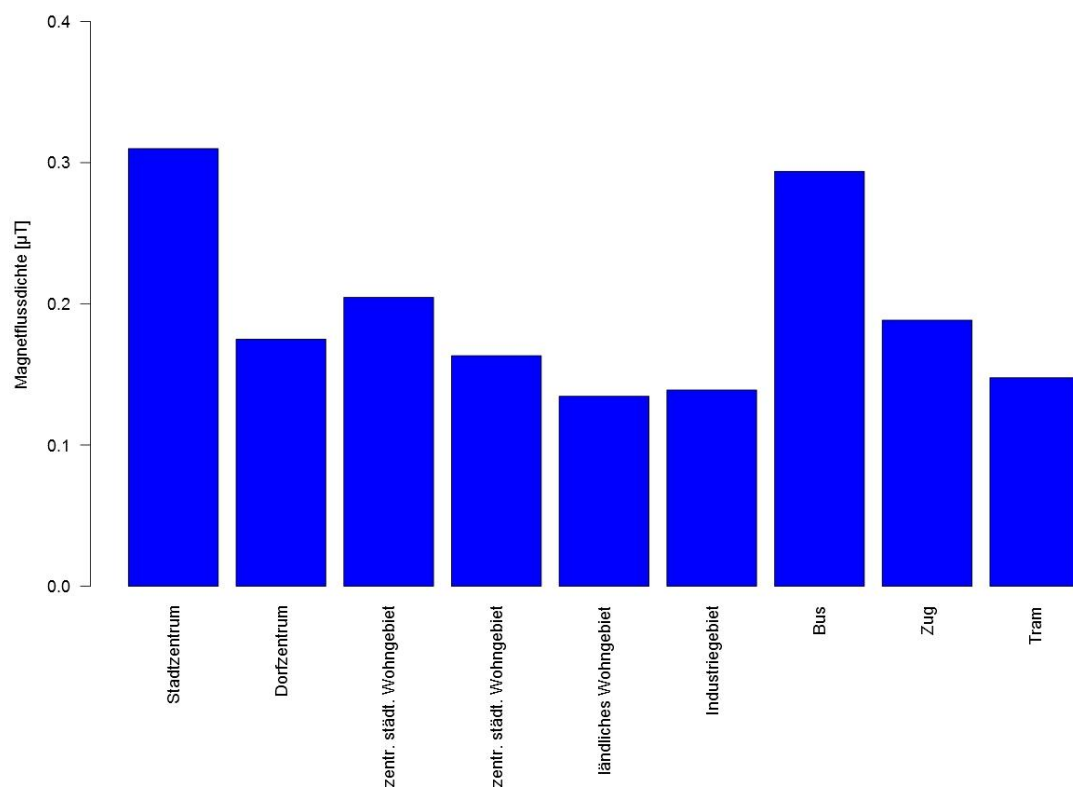


Abbildung 57: Mittlere Magnetfeldexposition im Frequenzbereich 40-800 Hz in den verschiedenen Typen von Mikroumgebungen.

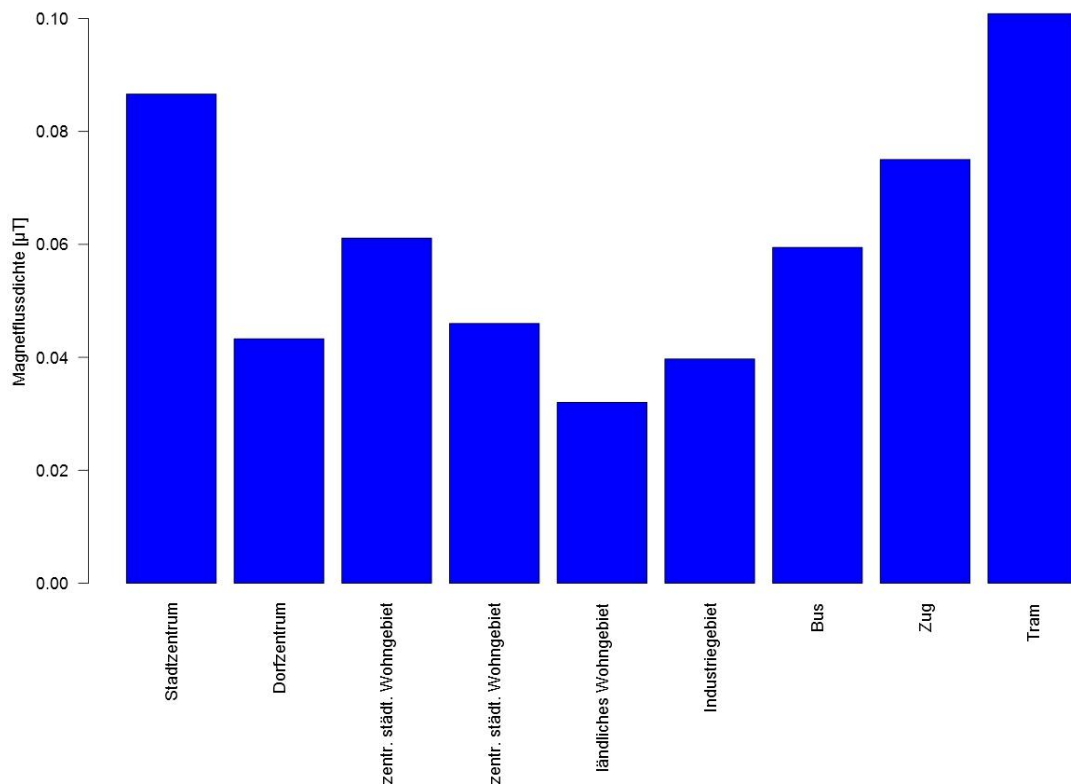


Abbildung 58: Mittlere Exposition durch harmonische Oberwellen (100-800 Hz) des Magnetfelds in den verschiedenen Typen von Mikroumgebungen.

Die Korrelation zwischen der ersten und der zweiten Messung der NF-MF-Exposition ist in Abbildung 59 dargestellt. Sie beträgt 0.68 für Mittelwerte pro Mikroumgebung und 0.60 bzw. 0.63 für Mittelwerte pro Messpfad. Sie ist damit geringer als für HF-EMF und Downlink (Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41).

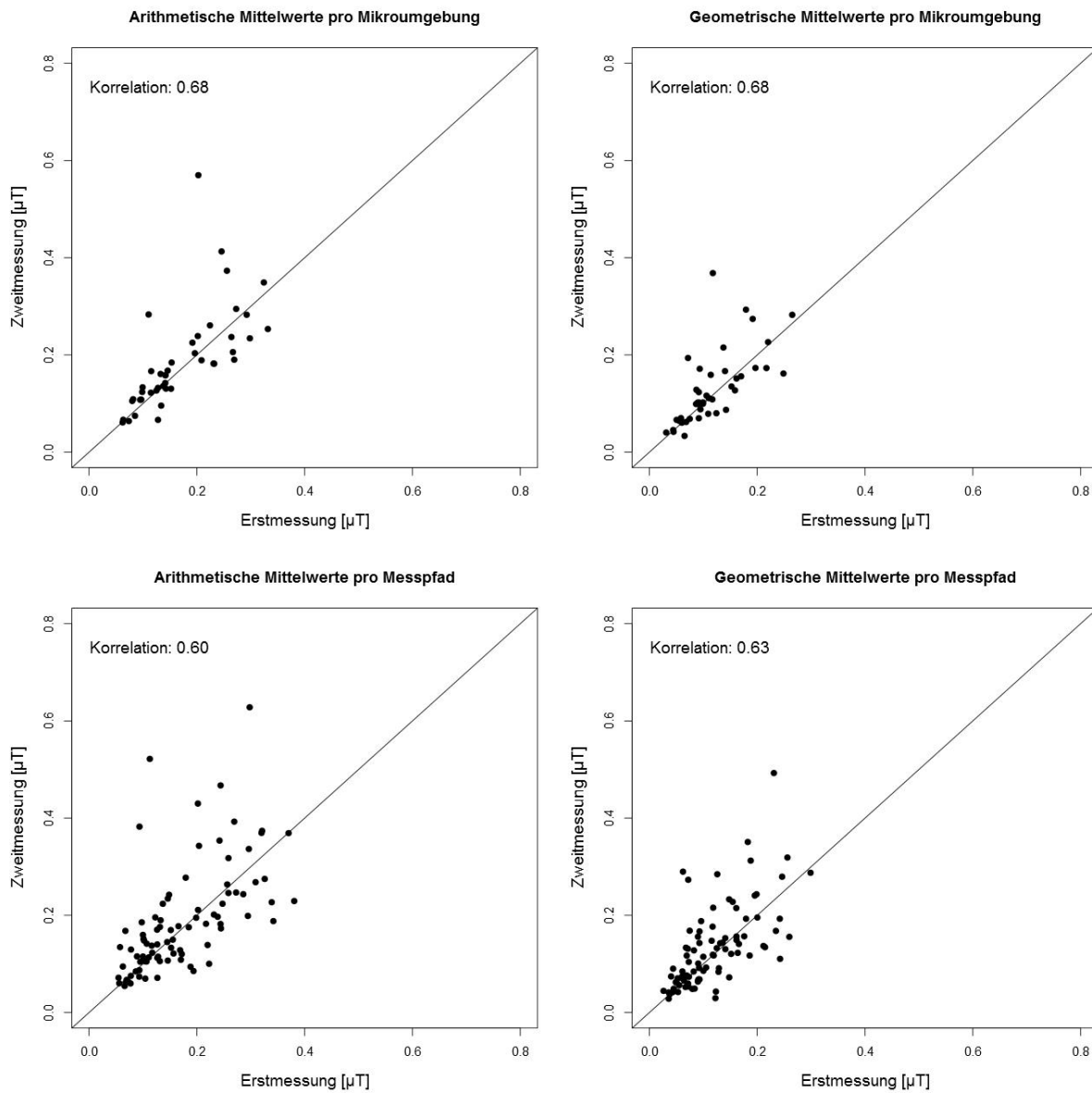


Abbildung 59: Vergleich der arithmetischen bzw. geometrischen Mittelwerte an zwei verschiedenen Messtagen (NF-MF; Aussenmessungen des Pilots 2014)
oben: Mittelwerte pro Mikroumgebung
unten: Mittelwerte pro Messpfad

Auch die Korrelation der Messwerte zwischen Pfad 1 und Pfad 2 in derselben Mikroumgebung (Abbildung 60) ist mit 0.63 (arithmetischer Mittelwert) und 0.59 (geometrischer Mittelwert) etwas geringer als für die HF-EMF-Expositionen (Abbildung 50 und Abbildung 51)

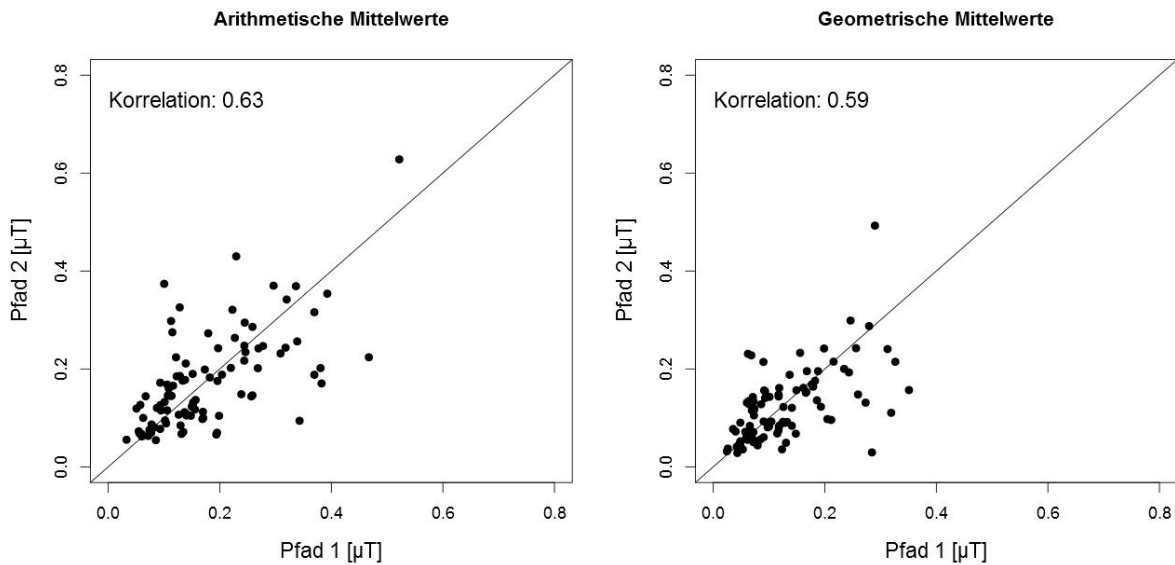


Abbildung 60: Vergleich der *arithmetischen* und *geometrischen* Mittelwerte entlang den beiden Messpfaden in derselben Mikroumgebung (NF-MF; Pilot 2014).

Einige typische Beispiele für den Verlauf der kumulativen Mittelwerte während einer Pfadmessung sind in Abbildung 61 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es in den Messungen häufig lokale Spitzen gibt. Dabei handelt es sich wohl meistens um unterirdische Kabel. Da das Magnetfeld mit der Distanz zu diesen Kabeln innerhalb von wenigen Metern abnimmt, ist es nicht erstaunlich, dass die Reproduzierbarkeit für diese Messungen nicht so gut ist wie für die HF-EMF Messungen.

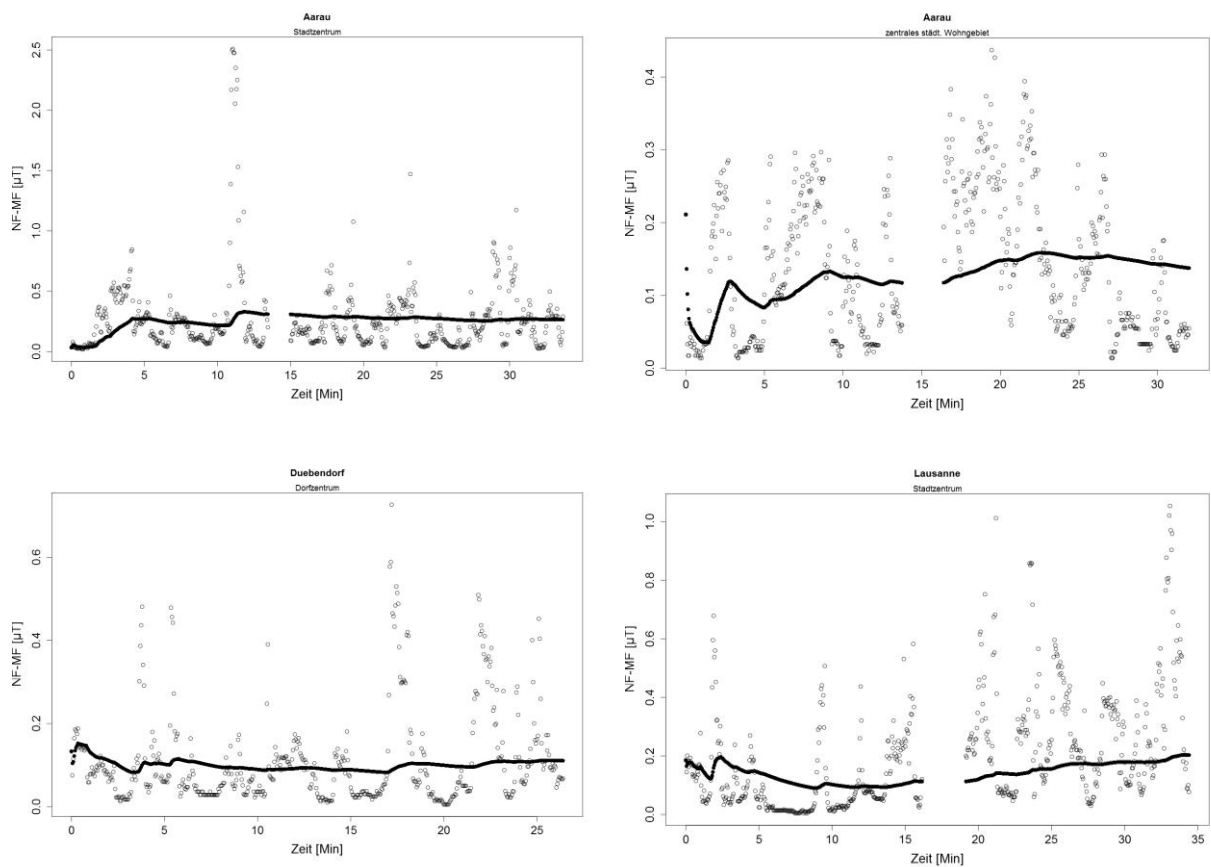


Abbildung 61: Einzelmesswerte und kumulativer Mittelwert ab Beginn der Pfadmessung in verschiedenen Mikroumgebungen (NF-MF; Pilot 2014).

Analoge Regressionsmodelle wie für HF-EMF (siehe 5.5.2) zeigen, dass im Stadtzentrum die NF-MF-Exposition höher ist als in den übrigen Gebieten (Tabelle 40). In Bezug auf die ARE-Gemeindetopologie ist der grösste Unterschied zwischen Einzelzentren und Grosszentren zu beobachten (Tabelle 41). Wiederum sind die gebiets- und gemeindetypologischen Unterschiede mit anderen geographischen Variablen erklärbar. In Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte gemäss CORINE (HDRES) ist die Magnetfeldexposition erhöht (Tabelle 42). Zudem ist eine positive Korrelation zwischen NF-MF und mittlerer Anzahl Geschosse ersichtlich. Wochentag und Tageszeit haben keinen zusätzlichen Erklärungswert (Tabelle 43).

Tabelle 40: Regressionsmodell für die Höhe der Magnetfeldexposition in Abhängigkeit vom Typ Mikroumgebung.

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Stadtzentrum	0	(Referenz)	
Dorfzentrum zentrales städtisches Wohngebiet	-0.139	0.022	0.000
dezentrales städtisches Wohngebiet	-0.109	0.028	0.000
ländliches Wohngebiet	-0.149	0.027	0.000
Industriegebiet	-0.179	0.023	0.000
	-0.172	0.027	0.000

Tabelle 41: Regressionsmodell für die Höhe der Magnetfeldexposition in Abhängigkeit von der ARE Klassierung.

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Agrargemeinden	0	(Referenz)	
Einzelzentren	-0.022	0.037	0.558
Grosszentren	0.136	0.028	0.000
Gürtel der Grosszentren	0.045	0.032	0.162
Gürtel der Mittelzentren	0.054	0.033	0.100
Kleinzentren	-0.020	0.040	0.621
Mittelzentren	0.077	0.029	0.009
Nebenzentren der Grosszentren	0.080	0.029	0.007
periurbane ländliche Gemeinden	0.015	0.033	0.650
Touristische Gemeinden	0.093	0.034	0.007

Tabelle 42: „Bestes“ Regressionsmodell für die Höhe der Magnetfeldexposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Details siehe Text).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
HDRES	0.110	0.018	0.000
Mittlere Anzahl Geschosse	0.125	0.022	0.000

Tabelle 43: Einfluss von Wochentag und Tageszeit auf die Höhe der Magnetfeldexposition in Abhängigkeit von geographischen Variablen (Details siehe Text, *Anfangszeit der Messung auf dem entsprechenden Pfad).

Variable	Modell- koeffizient	Standard- fehler	P-Wert
Populationsdichte	0.106	0.024	0.000
Mittlere Anzahl Geschosse	0.014	0.005	0.007
Montag	0	(Referenz)	
Dienstag	-0.038	0.024	0.119
Mittwoch	-0.045	0.029	0.121
Donnerstag	-0.029	0.024	0.218
Freitag	-0.016	0.025	0.514
Samstag	-0.053	0.048	0.275
Sonntag	0.020	0.034	0.567
bis 10:00*	0	(Referenz)	
10:00-12:00	-0.059	0.020	0.004
12:00-13:00	-0.024	0.024	0.323
nach 13:00	-0.039	0.022	0.083

7 Diskussion

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Studie zeigt, dass draussen die Hauptbeiträge für die HF-EMF-Exposition von Mobilfunkbasisstationen stammen. In öffentlichen Verkehrsmitteln spielen auch Uplink-Verbindungen von Mobiltelefonen eine wichtige Rolle. W-LAN ist nur marginal vorhanden, obwohl in öffentlichen Verkehrsmitteln (z.B. Bus und Trams) oder öffentlichen Aussenplätzen in den letzten Jahren viele Hotspots eingerichtet wurden. Die HF-EMF-Exposition nimmt mit zunehmender Urbanisierung tendenziell zu. Relativ hoch ist sie auch in Industriegebieten und öffentlichen Verkehrsmitteln (besonders im Tram). Gering ist die HF-EMF-Exposition in ländlichen Wohngebieten und in Schulhäusern. Die NF-MF-Exposition ist im Stadtzentrum und in Bussen am höchsten (ca. 0.3 μ T).

Verschiedene Untersuchungen in Messlabors haben gezeigt, dass Exposimeter das gesamte HF-EMF genau messen. Im Rahmen des Pilots 2014 wurden die Daten des EXPOM3 mit denjenigen des EME SPY 140 verglichen. Für das gesamte HF-EMF und für Downlink war die Korrelation der Mittelwerte pro Mikroumgebung sehr hoch (0.98). Für Uplink weist das EME SPY 140 jedoch systematisch höhere Werte auf (Pearson-Korrelation: 0.42). Beim Rundfunk misst das EXPOM3 im Allgemeinen etwas mehr als das EME SPY 140, obwohl letzteres im Rundfunkfrequenzbereich ein breiteres Spektrum abdeckt (Korrelation: 0.82). Diese beiden Aspekte müssen noch vertieft untersucht werden, haben aber wenig Einfluss auf die Messwerte der gesamten NIS-Exposition an Aussenplätzen, da Uplink und Rundfunk nur wenig dazu beitragen.

Cross-Talk (Übersprechen der Bänder), ein Problem für Exposimetermessungen, ist physikalisch bedingt. Problematisch ist vor allem die Abgrenzung zwischen GSM1800 Downlink und DECT sowie UMTS Uplink und DECT. Ebenfalls problematisch sind sogenannte harmonische Oberwellen von GSM1800 Uplink auf WiMax sowie GSM1800 Uplink, GSM1800 Downlink, DECT und UMTS Uplink auf W-LAN im 5 GHz Frequenzband. Wimax wird in der Schweiz nur vereinzelt genutzt und stellt deshalb kein Problem dar. Draussen ist kaum DECT-Exposition zu erwarten und zumindest zurzeit wird auch das W-LAN im 5 GHz Frequenzband kaum für Hotspots genutzt. Insofern ist der Cross-Talk für Aussenmessungen nicht problematisch. Es scheint auch möglich, Post-hoc Korrekturalgorithmen anzuwenden, um zumindest die Mittelwerte pro Mikroumgebung genauer abschätzen zu können. Schwieriger ist der Cross-Talk für Innenraummessungen, da dort DECT- und W-LAN5-Expositionen einen grösseren Teil an der Gesamtexposition

ausmachen können. Auch in diesem Fall scheinen Post-hoc Korrekturalgorithmen das Messergebnis erheblich zu verbessern. Dies muss aber noch vertieft untersucht werden und eine gewisse physikalisch bedingte Unsicherheit wird bestehen bleiben.

In dieser Studie waren Pfadmessungen, die durch instruiertes Personal in einer definierten Mikroumgebung in einem Quartier durchgeführt werden, sehr gut reproduzierbar. Im Pilot 2014 wurden die meisten Messungen eines Pfades von zwei verschiedenen Personen an zwei unterschiedlichen Tagen gemacht. Trotz Plänen mit den eingezeichneten Messrouten gab es ab und zu Abweichungen von dieser, und es hat sich gezeigt, dass bereits relativ geringe Abweichungen bei der ausgemessenen Strecke einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können, aber nicht in jedem Fall haben müssen. Aus diesem Grund ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Pilots 2014 etwas geringer als bei den Basler Monitoringmessungen, die immer von der gleichen Person durchgeführt wurden. Das bedeutet, dass insbesondere in ländlichen Gebieten mit einem oder nur wenigen starken Sendern, die exakte Routenwahl die Expositionshöhe zu einem grossen Teil bestimmt. Die Repräsentativität der erhobenen Daten für die Exposition im jeweiligen Quartier (Mikroumgebung) ist daher etwas eingeschränkt. Dennoch können mit den erhobenen Daten von mehreren Quartieren (Mikroumgebungen) und Gemeinden Expositionsunterschiede zwischen verschiedenen Typen von Mikroumgebungen gesamthaft nachgewiesen werden.

Relativ gross ist auch die Expositionsvariabilität in Innenräumen. Insbesondere zwischen Wohnungen können sehr grosse Unterschiede auftreten. In Schulhäusern ist die HF-EMF-Exposition häufig gering, insbesondere der Beitrag von Downlink (Mobilfunkbasisstation). Die Datenvariabilität ist deshalb weniger hoch in Bezug auf die absolut gemessenen Werte. Messungen im Rahmen der HERMES-Studie zeigten jedoch, dass die relative Veränderung der HF-EMF-Expositionen in Schulhäusern innerhalb eines Jahres erheblich sein kann und die Reproduzierbarkeit von Punktmessungen damit deutlich geringer ist als für Pfadmessungen draussen. Dies liegt daran, dass die Hauptbeiträge in Schulen von W-LAN und Uplink stammen. Es ist auch zu betonen, dass Pfadmessungen draussen und in öffentlich zugänglichen Innenräumen organisatorisch deutlich weniger aufwendig sind als Messungen in privaten Innenräumen, für die zuerst ein Kontakt mit den Bewohnern hergestellt werden muss.

Die Expositionshöhe in einer Mikroumgebung ist mit geographischen Charakteristiken assoziiert. In Industriegebieten und urbanen Gebieten ist die HF-EMF und Downlink-Exposition höher als am Stadtrand und in ländlichen Wohngebieten. Die mittlere Anzahl Geschosse und die Dichte von Mobilfunkbasisstationen sind die Haupteinflussfaktoren und

sollten neben dem Industrieanteil als Kriterium für die Gebietsauswahl in einem Monitoring berücksichtigt werden. Der Wochentag und die Tageszeit haben wenig Einfluss auf das Messergebnis, was die Durchführung von wiederholten Messungen organisatorisch erheblich vereinfacht. In Innenräumen spielt natürlich die Ausstattung mit HF-EMF emittierenden Geräten eine wichtige Rolle.

Da sich die Situation für private Innenräume im Vergleich zu öffentlichen Räumen sowohl in Bezug auf die Durchführung der Messungen als auch die Expositionssituation unterschiedlich darstellt, werden zwei verschiedene Stichprobenkonzepte vorgeschlagen.

7.2 Stichprobenkonzept für Aussenmessungen und öffentliche Verkehrsmittel

Ziel dieses Kapitels ist, ein Vorgehen für ein Monitoring zu beschreiben, das erlaubt, räumliche Unterschiede und die zeitliche Entwicklung von HF-EMF draussen und in öffentlichen Verkehrsmitteln sowie Bahnhöfen quellenspezifisch zu untersuchen.

Es wird empfohlen, eine Reihe von Mikroumgebungen auszuwählen und wiederholt auf dem exakt gleichen Messpfad Exposimetermessungen durchzuführen. Im Folgenden werden alle relevanten Aspekte für die Auswahl der Mikroumgebungen und die Durchführung der Messungen diskutiert.

7.2.1 Messkonzept

Die HF-EMF-Exposition ist in urbanen Gebieten am höchsten und es ist zu erwarten, dass dort auch zunehmend kleine HF-EMF Quellen fix installiert werden (W-LAN Hotspots, Mobilfunk-Femtozellen), für die Inputdaten für Modellierungen nicht zur Verfügung stehen. Zudem gibt es auch mehr Personen, die ein Mobiltelefon benutzen. Aus diesem Grund bildet die Mikroumgebungsexposimetrie in diesen Gebieten eine besonders informative Ergänzung zu einer flächendeckenden Modellierung von HF-EMF. Die grosse Quellendichte führt dazu, dass in urbanen Gebieten schon bereits auf einem relativ kurzen Messpfad ein stabiler Mittelwert erreicht wird. Aus diesem Grund ist eine Pfadlänge von etwa einem Kilometer mit einer Messdauer von 15 Minuten pro Mikroumgebung ausreichend. In ländlichen Gebieten gibt es weniger Quellen und eine einzelne Quelle (z.B. Mobilfunkbasisstation) kann einen grösseren Einfluss auf das Messresultat ausüben. Es wird daher ein eher längerer Messpfad von 1.5 bis 2 km mit einer Messdauer von 20-30 Minuten empfohlen. Der Messpfad sollte relativ grobmaschig angelegt werden, damit ein möglichst grosses Gebiet innerhalb der Mikroumgebung abgedeckt wird. Die HF-EMF-Exposition ist in ländlichen Gebieten im

Allgemeinen kleiner, kann aber im Einzelfall auch recht hoch sein. Um solche Fälle in einem Monitoring zu erfassen, sollten daher eine genügend grosse Anzahl ländlicher Mikroumgebungen miteingeschlossen werden.

Für die Auswahl der Gemeinden wird empfohlen, sich auf die ARE Klassierung abzustützen. Grundsätzlich sind alle Grosszentren zu berücksichtigen (Genf, Lausanne, Bern, Basel, Luzern, Lugano, Zürich, Winterthur, St. Gallen). Zusätzlich sind 5-7 Mittelzentren einzuschliessen. Um ländliche Gebiete abzudecken, können 5-7 periurbane Gemeinden, 5-7 Agrargemeinden und 5-7 touristische Gemeinden ausgewählt werden. Bei der Auswahl dieser Gemeinden ist darauf zu achten, dass möglichst alle Regionen der Schweiz vertreten sind.

Die Gemeinden und Mikroumgebungen sind so auszuwählen, dass möglichst alle in der Schweiz vorhandenen Standortsituationen berücksichtigt werden. Damit kann man die EMF-Exposition an verschiedenen Standorttypen charakterisieren, wie das bereits analog im Bereich Luftschadstoffe mit dem NABEL Messnetz gemacht wird. Relevante Standortcharakteristika sind neben Mobilfunkbasisstations-, Bebauungs- und Bevölkerungsdichte beispielsweise auch Nähe zu einer Bahn- oder Strassenhauptverkehrsader, Hochspannungsleitungen, TV- oder Radiosender, Bergtäler und Seeufer. Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass die Messergebnisse schwieriger zu kommunizieren sind, da ohne Kenntnis der Messstrategie Ortsunterschiede typischerweise als solche und nicht als Standortunterschied interpretiert werden. Es ist daher ratsam, dass man pro Gemeinde jeweils mindestens ein repräsentatives Wohngebiet auswählt. Diese Gebiete lassen sich in Bezug auf ihre Bebauungsdichte (Geschosshöhe), Bevölkerungsdichte und die NF- und HF-EMF emittierenden Anlagen charakterisieren. Es ist zu betonen, dass diese Wohngebiete typisch für die jeweilige Gemeinde und nicht identisch in Bezug auf die oben erwähnten Charakteristiken für alle Gemeinden sein sollten. Es ist nämlich zu erwarten, dass bei optimaler Vergleichbarkeit der ausgewählten Gebiete wenige Unterschiede in den NIS-Immissionen auftreten oder zumindest schwierig zu erklären sind.

In den Grosszentren sollte das Stadtzentrum, ein zentrales und ein dezentrales Wohngebiet (am Stadtrand) und ein Industriegebiet ausgewählt werden. Idealerweise werden zusätzlich auch ein bis zwei Wohn- und/oder Industriegebiete aus dem Gürtel der Grosszentren ausgewählt, so dass pro Zentrum sechs Typen von Mikroumgebungen abgedeckt sind. Für die Mittelzentren ist das Vorgehen ähnlich, wobei man sich auf fünf statt sechs Mikroumgebungen pro Zentrum beschränken könnte. Für die ländlichen Gebiete wird empfohlen jeweils das Dorfzentrum, ein typisches Wohngebiet und allenfalls ein

Industriegebiet oder einen anderen Standorttyp zu berücksichtigen. Mit diesem Auswahlverfahren ergäben sich ungefähr 140 ausgewählte Mikroumgebungen. Berücksichtigt man meteorologisch oder gerätebedingte Messausfälle wären für die Datenerhebung alleine rund zwei Monate zu veranschlagen.

Es wird vorgeschlagen die Datenerhebung jährlich zu wiederholen. Häufigere Messwiederholungen würden es erlauben, auch saisonale Unterschiede zu untersuchen. Bisher wurden aber in keiner EMF-Messstudie relevante saisonale Unterschiede gefunden. Teilweise könnte man für saisonale Analysen Daten von bestehenden fix installierten kantonalen Messeinrichtungen heranziehen, z.B. im Rahmen des Innerschweizer Monitorings (<http://www.e-smogmessung.ch/i4Def.aspx?tabindex=0&tabid=437>). Aus diesem Grund ist es effizienter, die vorhandenen Ressourcen in eine möglichst breite Auswahl von Messgebieten und Standorttypen zu investieren, als in eine häufigere Wiederholung von Messungen. Die Reproduzierbarkeit von Pfadmessungen mit einem Exposimeter ist relativ hoch, so dass allfällige zeitliche Trends schon nach wenigen Messungen ersichtlich sind.

Als Messgerät wird für das HF-EMF das EXPOM3 empfohlen. Ein Mehrfachantennenexposimeter (siehe 3.1.3) wäre prinzipiell auch sehr interessant. Voraussetzung ist jedoch, dass das technische Knowhow (z.B. Kalibration des Gerätes direkt an der Messperson) vor Ort verfügbar ist und weitere Tests dieser Messeinrichtung demonstrieren können, dass die Messgenauigkeit tatsächlich deutlich verbessert werden kann.

7.2.2 Organisation der Messung

Für die Durchführung der Messungen wird empfohlen, eine einfache Messeinrichtung wie beim Pilot 2014 anzuwenden, die es erlaubt, sich wie ein Passant zu bewegen. Eine sperrige oder eine auffällige Einrichtung, die Einfluss auf die Passanten in unmittelbarer Umgebung haben könnte, ist nicht zu empfehlen, da dies die Messungen beeinträchtigen könnte (v.a. Uplink-Exposition). Die gewählte Konstruktion sollte vor der definitiven Anwendung im Labor auf die Messgenauigkeit und Körpereinfluss getestet werden. Vor und nach jeder Messkampagne sollten die Messgeräte kalibriert werden. Dazwischen können einfach Funktionstests durchgeführt werden, damit grobe Funktionsstörungen eines Messgeräts entdeckt werden.

Grundsätzlich wäre es auch möglich, statt zu Fuss Messungen auf dem Fahrrad oder mit auf dem Auto montierten Geräten durchzuführen. Das wäre besonders für ländliche Gebiete interessant, da in der gleichen Zeit ein grösseres Gebiet abgedeckt - und somit der Einfluss

einzelner Quellen auf das Messergebnis reduziert werden kann. Dies wird dennoch nicht empfohlen, weil die Messpunkte räumlich weniger homogen verteilt sind (z.B. Kumulation von Messpunkten an Kreuzungen). Zudem bewegt man sich nicht genau an den Orten, wo sich Menschen aufhalten, was insbesondere für Uplink und W-LAN zu einer Unterschätzung der Exposition führen würde. Die Erfassung der letztgenannten Quellen ist jedoch ein Vorteil der Mikroumgebungsexposimetrie. Geht es um die flächendeckenden Analysen der Exposition, wird dies besser mit einer Ausbreitungsmodellierung durchgeführt.

Die Berücksichtigung des Dorfzentrums in jeder ausgewählten Gemeinde legt es nahe, dass man an die Messorte mit öffentlichen Verkehrsmitteln anreist. Dies hat zudem den Vorteil, dass während der An- und Rückreise ebenfalls Messdaten erhoben und ins Monitoring integriert werden können. Expositionen in öffentlichen Verkehrsmitteln, an Bahnhöfen und Haltestellen sind relativ hoch und deshalb relevant für die Bevölkerungsexposition. Das bedeutet, dass man die Anreise entsprechend organisiert und standardisiert, damit die Messungen vergleichbar sind. Neben dem Verkehrsmittel selber (für Züge unterteilt in Regional- und Fernverkehr) kann dabei dessen Belegung (Hauptverkehrszeiten vs. Nebenverkehrszeiten) ein zusätzliches Kriterium für die spätere Datenauswertung sein. Eine feinere Auftrennung (z.B. auf einzelne Fahrten) wird nicht empfohlen, da die Datenvariabilität hoch ist und Fahrplanwechsel auch zu Änderungen in den Reiserouten führen können.

An einem Messtag können je nach Anzahl ausgewählter Mikroumgebungen eine halbe bis maximal zwei Gemeinden gemessen werden. Für jeden Messtag ist ein Ablaufprotokoll zu erstellen, das über die genauen Zeiten und zu begehenden Routen inklusive Anreise informiert. Für die Reproduzierbarkeit der Messungen ist es unabdingbar, dass die Messpfade genau dokumentiert sind. Dies beinhaltet einerseits die genaue Wegstrecke, aber auch Details wie die benutzte Strassenseite, Strassenüber-/Unterführungen etc. Bei jährlichen Wiederholungen der Messungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Messperson alle diese Details memorieren kann. Zudem ist zu beachten, dass im Verlauf der Zeit personelle Wechsel auftreten können. Beim Messen ist idealerweise zu vermerken, wann der Messpfad bzw. das Verkehrsmittel betreten und wieder verlassen wird. Dies kann mit einer vorprogrammierten Applikation auf einem im Flugmodus betriebenen Mobiltelefon erfolgen. Da die tageszeitlichen Schwankungen der Immissionen relativ gering sind, ist auch die räumliche Vergleichbarkeit unkritisch, solange alle Messungen während Bürozeiten an Werktagen durchgeführt werden.

Im Pilot 2014 wurde bei Starkregen keine Messung durchgeführt. Dies wird auch im Rahmen eines zukünftigen Monitorings empfohlen, da eine hohe Feuchtigkeit in der Atmosphäre das

Messergebnis beeinträchtigen könnte. Bei der Durchführung der Messungen ist darauf zu achten, dass kein eingeschaltetes Mobiltelefon mitgetragen wird.

7.2.3 Datenverarbeitung

Die Rohdaten aller Messungen sind mit dem Aktivitätsprotokoll zu kombinieren, so dass jeder Messwert dem korrekten Messpfad oder Verkehrsmittel zugeordnet werden kann. Die Daten sind visuell auf Plausibilität zu prüfen und die Geokoordinaten der begangenen Messpfade sind in einem geographischen Visualisierungstool (z.B. Google Earth) aufzuzeichnen. Zeigen diese Qualitätskontrollen Probleme, sind die Messungen zu wiederholen. Anschliessend wird für jede Mikroumgebung eine Summenstatistik der einzelnen Messwerte berechnet. Der Anteil der Werte unterhalb der unteren und oberhalb der oberen Nachweisgrenze ist zu erfassen. Je nach Höhe und Anteil von Messwerten unter/oberhalb der Nachweisgrenze, empfiehlt es sich, bei der Berechnung von Summenstatistiken statistische Verfahren anzuwenden, die dies adäquat berücksichtigen. Die Summenstatistik beinhaltet neben dem arithmetischen Mittelwert idealerweise den geometrischen Mittelwert, den Median und Perzentilwerte (z.B. 90. 95. und 99. Perzentil). Maximalwerte sind typischerweise nicht sehr robust und aussagekräftig und abhängig von der Nachweisgrenze des Geräts.

Besondere Vorkommnisse und meteorologische Bedingungen während der Messung sollten ebenfalls in der Datenbank erfasst werden. Falls ein Ausbreitungsmodell für das Messgebiet zur Verfügung steht, könnte man eine Modellierung für alle Messpfade der Aussenmessungen durchführen. Das dient einerseits als Qualitätskontrolle für die Modellierung wie auch für die Messungen. Andererseits erlaubt es aber auch, die räumliche Repräsentativität der gemessenen Strecken auf einer grösseren Skala abzuschätzen.

7.2.4 Zu erwartende Resultate

Tabelle 44 gibt einen Überblick über die zu erwartende Präzision der arithmetischen Mittelwerte von Pfadmessungen für verschiedene Stickprobengrössen (abgeleitet von den Daten der Tabelle 18). Beispielsweise erwartet man für Stadtzentren, dass rund zwei Drittel der Downlinkmessungen zwischen 0.31 und 0.52 V/m liegen (\pm eine Standardabweichung). Führt man Messungen in zehn Stadtzentren durch, liegt das 95%-Konfidenzintervall zwischen 0.33 und 0.51 V/m. Für ländliche Wohngebiete wird bei den etwa 20 vorgeschlagenen Gemeinden das 95%-Konfidenzintervall zwischen 0.11 und 0.27 V/m liegen. Es ist zu betonen, dass dies nur grobe Abschätzungen sind, und sich bei einer Veränderung der Expositionssituation auch die Datenvariabilität ändern kann. Dennoch ist

ersichtlich, dass mit dem vorgeschlagenen Messkonzept bei 5-20 Messungen pro Mikroumgebungstyp vorhandene Unterschiede zwischen den einzelnen Typen von Mikroumgebungen deutlich und statistisch signifikant zu identifizieren sind. Stehen für einen Typ Mikroumgebung weniger als fünf Messungen zur Verfügung, ist die Präzision geringer und ein einzelner Ausreisser hat einen grossen Einfluss auf die Interpretation. Mit multiplen Regressionsmodellen kann man Standortcharakteristika unabhängig voneinander mit grösserer statistischer Präzision untersuchen. Da die arithmetischen Mittelwerte relativ stark durch einzelne hohe Messwerte beeinflusst sind, erreicht man für geometrische Mittelwerte oder Mediane eine grössere statistische Präzision und Robustheit. Mit mehrmaligem Wiederholen der Messungen steigt natürlich die statistische Präzision einer Gesamtauswertung. Dabei ist zu beachten, dass wiederholte Messungen nicht unabhängig sind und dass entsprechende statistische Verfahren anzuwenden sind (hierarchische Modelle). Bei der Publikation der Ergebnisse empfiehlt es sich, die Unsicherheiten (z.B. 95%-Konfidenzintervalle) zu kommunizieren.

Tabelle 44: Zu erwartende Präzision von arithmetischen Mittelwerten für verschiedene Stichprobengrössen (SD=Standardabweichung, KI=Konfidenzintervall; n= Anzahl Mikroumgebungen vom gleichen Typ; alle Werte in V/m).

Frequenzband	Typ Mikroumgebung	Mittelwert	Mittelwert minus SD	Mittelwert plus SD	n=5		n=10		n=20		n=40	
					unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI
Total	Stadtzentrum	0.44	0.33	0.53	0.34	0.52	0.37	0.50	0.39	0.48	0.41	0.47
Total	Dorfzentrum	0.22	<0	0.34	<0	0.33	0.09	0.30	0.14	0.28	0.17	0.27
Total	zentrales städt. Wohngebiet	0.30	0.17	0.39	0.19	0.38	0.23	0.36	0.25	0.34	0.27	0.33
Total	dezentrales städt. Wohngebiet	0.24	0.11	0.32	0.13	0.31	0.17	0.29	0.19	0.28	0.21	0.27
Total	ländliches Wohngebiet	0.22	<0	0.34	<0	0.33	0.08	0.30	0.14	0.28	0.17	0.26
Total	Industriegebiet	0.52	0.30	0.67	0.33	0.66	0.40	0.62	0.44	0.59	0.46	0.57
Downlink	Stadtzentrum	0.43	0.31	0.52	0.33	0.51	0.36	0.49	0.38	0.47	0.40	0.46
Downlink	Dorfzentrum	0.21	<0	0.34	<0	0.33	0.05	0.30	0.12	0.27	0.15	0.26
Downlink	zentrales städt. Wohngebiet	0.28	0.16	0.36	0.18	0.35	0.21	0.33	0.23	0.32	0.25	0.30
Downlink	dezentrales städt. Wohngebiet	0.23	0.11	0.30	0.13	0.29	0.16	0.27	0.18	0.26	0.20	0.25
Downlink	ländliches Wohngebiet	0.21	<0	0.33	<0	0.32	<0	0.29	0.11	0.27	0.15	0.25
Downlink	Industriegebiet	0.50	0.28	0.66	0.31	0.64	0.38	0.61	0.42	0.58	0.44	0.56
Uplink	Stadtzentrum	0.06	<0	0.08	<0	0.08	0.03	0.07	0.04	0.07	0.05	0.07
Uplink	Dorfzentrum	0.04	<0	0.05	<0	0.05	0.01	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04
Uplink	zentrales städt. Wohngebiet	0.04	<0	0.06	<0	0.06	0.02	0.06	0.03	0.05	0.03	0.05
Uplink	dezentrales städt. Wohngebiet	0.03	0.00	0.04	0.01	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03
Uplink	ländliches Wohngebiet	0.04	<0	0.07	<0	0.07	<0	0.06	<0	0.05	0.01	0.05
Uplink	Industriegebiet	0.04	<0	0.06	<0	0.06	0.01	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04
Rundfunk	Stadtzentrum	0.07	<0	0.12	<0	0.11	0.01	0.10	0.04	0.09	0.05	0.09
Rundfunk	Dorfzentrum	0.06	<0	0.09	<0	0.09	<0	0.08	0.03	0.08	0.04	0.07
Rundfunk	zentrales städt. Wohngebiet	0.11	<0	0.17	<0	0.17	<0	0.15	0.05	0.14	0.07	0.13
Rundfunk	dezentrales städt. Wohngebiet	0.07	<0	0.11	<0	0.11	0.02	0.10	0.04	0.09	0.05	0.09
Rundfunk	ländliches Wohngebiet	0.07	<0	0.12	<0	0.11	<0	0.10	0.03	0.09	0.04	0.09
Rundfunk	Industriegebiet	0.12	<0	0.17	<0	0.16	0.06	0.15	0.08	0.14	0.09	0.13

7.3 Stichprobenkonzept für private Innenräume

Menschen halten sich einen grossen Teil der Zeit in Innenräumen auf und aus diesem Grund ist es wichtig, diese Umgebung bei einem Monitoring mit zu berücksichtigen. Im Prinzip wäre

es denkbar, personenbezogene Messungen mit Exposimetern bei einer Bevölkerungsstichprobe durchzuführen. Da sich die Leute häufig in Innenräumen aufhalten, kann man so einiges über die Innenraumexposition erfahren. Dieses Vorgehen wurde in mehreren wissenschaftlichen Studien erfolgreich angewendet. Diese Studien hatten typischerweise zum Ziel, Einflussfaktoren auf die personenbezogene HF-EMF-Exposition zu identifizieren. Damit unterscheidet sich ihre Zielsetzung von einem Monitoring, bei dem die Repräsentativität der Daten für die Bevölkerung und das Erkennen zeitlicher Trends wichtig sind. In diesem Kontext haben Probandenerhebungen einige Nachteile. 1. Personenbezogene EMF-Messungen sind aufwendig für die Probanden und nur ein kleiner Teil einer zufällig ausgewählten Stichprobe ist bereit mitzumachen. Die Repräsentativität dieser Freiwilligen für die Gesamtpopulation ist schwierig abzuschätzen. 2. Es kann nur bedingt kontrolliert werden, wie gut das Messprotokoll befolgt wird und wie genau die Aktivitäten (Mikroumgebungen) registriert werden. Messungen könnten auch gezielt manipuliert werden, indem das Gerät absichtlich quellennah oder -fern platziert wird. Das könnte insbesondere ein Problem sein, wenn ein Monitoring bekannt wird und sich Probanden von den Messresultaten politische Auswirkungen erhoffen. 3. Einfluss von Körperabschirmung und der Einfluss von körpernah betriebenen Quellen (Tablets, Schnurlos- und Mobiltelefone) können nicht kontrolliert werden, wie das bei professionellen Pfadmessungen geschieht. 4. Die Datenvariabilität ist bei personenbezogenen Messungen sehr hoch und die Analyse von zeitlichen Trends kann durch die Probandenauswahl beeinflusst werden. Die Motivation an einer solchen Studie mitzumachen, könnte sich über die Zeit verändern, so dass sich unterschiedliche Leute für eine Teilnahme angesprochen fühlen.

Aus diesen Gründen wird empfohlen, für ein Monitoring der EMF-Exposition in Innenräumen auf personenbezogene Messungen zu verzichten und stattdessen Punktmessungen in zufällig ausgewählten Wohnungen/Arbeitsplätzen durch eine Fachperson durchführen zu lassen. Im Folgenden sind alle relevanten Aspekte der Auswahl der Innenräume und der Durchführung der Messungen diskutiert.

7.3.1 Messkonzept

In Kapitel 5.2 wurde gezeigt, dass die relative Variabilität von Innenraummessungen höher ist als für Pfadmessungen. Aus diesem Grund wird empfohlen, sich bei den Innenräumen auf private Wohnungen und Häuser zu fokussieren. Grundsätzlich wäre es auch denkbar, Arbeitsplätze miteinzubeziehen. Der Aufwand wäre aber entsprechend grösser, da typischerweise 5-10 Arbeitsplätze desselben Typs berücksichtigt werden müssten, um

Aussagen machen zu können. Allenfalls könnte man sich auf spezielle Arbeitsplätze fokussieren, wo viele HF-EMF Quellen im Einsatz sind.

Die Stichprobengrösse sollte etwa 150-200 Wohnungen betragen, damit man beispielsweise auch die Exposition in verschiedenen Bewohnergruppen und Gebäudecharakteristika (Alter, Familienstatus, Sprachregion, Haustyp, Urbanisierung, Stockwerk) vergleichen kann. Die Stichprobe sollte zufällig ausgewählt werden, wobei ein Quotensampling in Bezug auf Alter, Familienstatus und Sprachregion zu empfehlen ist, damit alle Bevölkerungsgruppen vertreten sind. Idealerweise bindet man das Monitoring an eine andere laufende repräsentative Erhebung an (z.B. Schweizer Gesundheitsbefragung, Haushaltspanel). Der Vorteil ist, dass zusätzliche Informationen vorhanden sind, um die ausgewählten Personen mit den nicht ausgewählten Personen in der gleichen Erhebung zu vergleichen. Damit lassen sich Rückschlüsse auf die Repräsentativität der erhobenen Daten ziehen. Zudem steht dann das Thema EMF bei der Rekrutierung der Probanden weniger im Vordergrund, so dass ein Selektionsbias möglicherweise verkleinert wird.

Für die Durchführung der Messung wird ein einfach zu bedienendes frequenzselektives Messgerät empfohlen (z.B. NARDA SRM-3000 oder neuer). Die Qualität der Filter zwischen den Frequenzbändern ist für dieses Gerät etwas höher im Vergleich zu Exposimetern und dies ist in Innenräumen besonders für DECT und W-LAN5 relevant.

Die Punktmessung sollte im Wohnzimmer gemäss einem von CENELEC adoptierten Messprotokoll durchgeführt werden (CENELEC 2008). Das Messgerät wird jeweils in jeder Ecke des Raums in einem Meter Distanz von den Wänden auf 1.5 m Bodenhöhe und in der Mitte des Raumes auf 1.1, 1.5 und 1.7 m über Boden platziert (siehe Abbildung 62). Die Messdauer pro Messpunkt beträgt 60 Sekunden. Zusätzlich kann mit der Schwenkmethode das Maximum im Raum ermittelt werden.

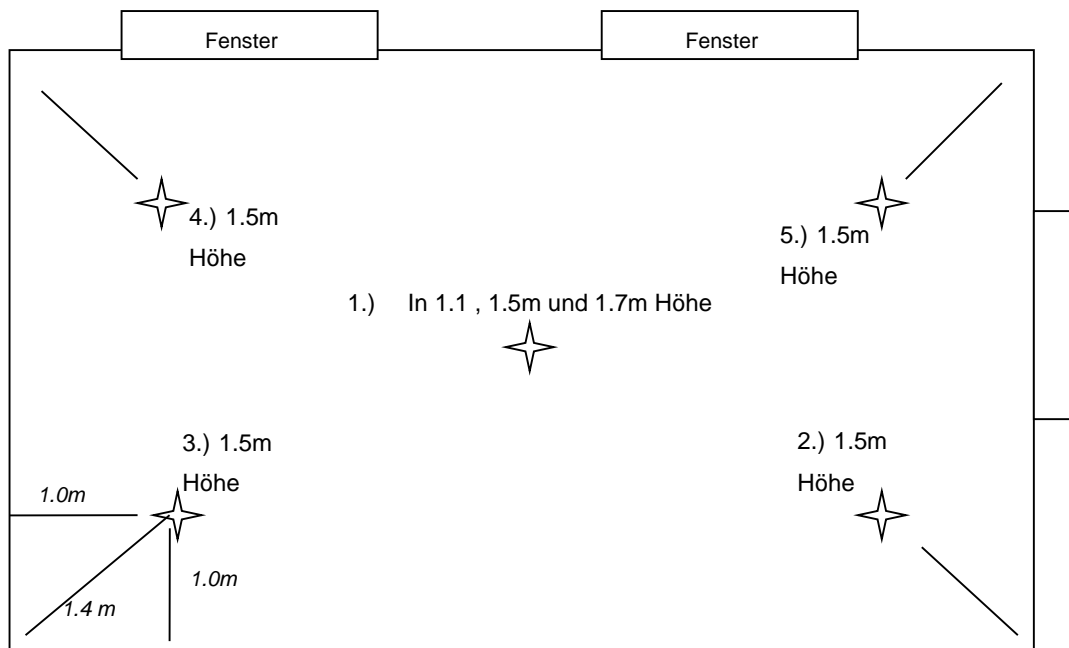


Abbildung 62: Beispiel einer Messanordnung für Punktmessung in Innenräumen.

Während der Messung sollen EMF-emittierende Geräte im Normalzustand betrieben werden, also so wie dies die Bewohner typischerweise machen, wenn sie zuhause sind. Grundsätzlich wäre eine Messung im Schlafzimmer ebenfalls erwünscht, da dort viel Zeit verbracht wird. Zumindest für NF-MF hat sich aber gezeigt, dass die Resultate nicht wesentlich anders sind und die Datenvariabilität mit mehreren Raummessungen pro Wohnung nicht stark reduziert werden kann (siehe Tabelle 39). Andererseits könnte es die Bereitschaft der Leute schmälern, Einlass in die Wohnung zu geben, wenn man zusätzlich Zugang zum Schlafzimmer haben möchte, um dort Messungen durchzuführen. Das schränkt die Repräsentativität ein und aus diesem Grund wird davon abgeraten.

Wie im Kapitel 7.3.2 ausgeführt, ist eine solche Erhebung aufwändig. Eine Erhebung alle drei bis fünf Jahre ist wünschenswert, um den Einfluss der sich laufend verändernden Expositionsbedingungen erfassen zu können.

7.3.2 Organisation der Messung

Die Organisation von Punktmessungen ist aufwändig. Die ausgewählte Stichprobe ist schriftlich zu informieren und anschliessend telefonisch zu kontaktieren, um offene Fragen zu klären und bei Zustimmung einen Termin zu vereinbaren. In der Praxis wird es häufig schwierig sein, mehrere Termine zu kombinieren, da eine Zufallsstichprobe räumlich weit verteilt ist. Aus diesem Grund ist die Durchführung von mehr als einer Messung pro Tag als unrealistisch anzusehen.

Während der Durchführung der Messungen können die Bewohner einen Fragebogen mit expositionsrelevanten Fragen ausfüllen (siehe Kapitel 7.3.3). Damit können Unklarheiten der Bewohner bei technischen Fragen oder Sprachschwierigkeiten unmittelbar geklärt werden. Bei rasch wandelnden Technologien ist zu erwarten, dass neu eingeführte Technologien nicht immer der ganzen Bevölkerung bekannt sind.

Da viele Leute tagsüber nicht zu Hause sind, wird es nötig sein, auch abends Messungen durchzuführen. Zumindest bei einem Teil der Probanden könnte auch während 24 Stunden ein Exosimeter in der Wohnung deponiert werden. Damit lassen sich auch Daten zum zeitlichen Verlauf der Exposition sammeln. Die Emissionen von selbst genutzten Quellen wie W-LAN, Schnurlos- und Mobiltelefonen wird von der Aktivität der Bewohner abhängen.

7.3.3 Datenverarbeitung

Neben den Messergebnissen ist für jede Wohnung ein Datenblatt mit Informationen zur Wohnung und zu den Bewohnern auszufüllen. Dies beinhaltet Fragen zur Charakteristik der Wohnung und zu EMF emittierenden Quellen in und ausserhalb der Wohnung. Zudem werden alle Bewohner gebeten, einen Fragebogen zu expositionsrelevanten Verhaltensweisen auszufüllen. Primär von Interesse ist dabei das Verhalten zu Hause. Um jedoch auch integrale Abschätzungen der persönlichen Exposition zu machen, sind noch weitere Verhaltensweisen von Interesse, z.B. die Mobiltelefonnutzung. Datenblätter für Wohnungsmessungen und Fragebogen zur Expositionsabschätzung wurden im Rahmen des EU Projektes GERoNiMO (Generalized EMF research using novel methods) entwickelt. Aufgrund der raschen Entwicklung der Kommunikationstechnologien sind diese Fragebögen periodisch zu überarbeiten. Im EU Projekt MobiKids wurde eine App entwickelt, die bei Smartphones aufzeichnet, wie häufig in welchen Netzwerken (inkl. W-LAN) telefoniert, Textnachrichten geschrieben und Daten heruntergeladen werden. Voraussetzung hierfür ist ein Android-Betriebssystem. Diese App wird in GERoNiMO eingesetzt und könnte im Rahmen eines solchen Monitorings auch eingesetzt werden, um die Exposition durch die Nutzung von Kommunikationsgeräten besser abzuschätzen und mit den anderen Quellen zu vergleichen.

7.3.4 Zu erwartende Resultate

Tabelle 45 zeigt die zu erwartende Präzision von Punktmessungen in Innenräumen (abgeleitet von Tabelle 16). Die Zeilen „Schulhaus“ beziehen sich auf Messungen in der HERMES Studie, die Zeilen „zuhause“ auf die repräsentative Bevölkerungsstichprobe der QUALIFEX-Studie. Als Vergleich dazu ist die mittlere Exposition und Datenvariabilität auch

für diejenigen QUALIFEX-Probanden dargestellt, welche gezielt selektiert wurden, weil sie potentiell höher exponiert waren („zuhaus hoch“). Exemplarisch zeigt Tabelle 45, dass ein Unterschied des totalen HF-EMF dieser speziellen Gruppe im Vergleich zur Bevölkerungsstichprobe im QUALIFEX-Kollektiv bei 20 Messungen statistisch nachweisbar ist. Wiederum ist zu betonen, dass es sich dabei nur um Richtwerte handelt und die Präzision für robuste Masse wie geometrische Mittelwerte oder Mediane höher ist. Es ist auch schwierig abzuschätzen, ob diese Daten die heutige Expositionssituation noch adäquat repräsentieren.

Nimmt man die Wohnzimmermessungen in den tief exponierten Wohnungen der TransExpo Studie als Basis für die Berechnung der Variabilität (Tabelle 39) von NF-MF Messungen in Wohnungen, erhält man für Messungen in zehn Wohnungen ein 95%-Konfidenzintervall von 0.02-0.11 μT und für 100 Wohnungen von 0.05 bis 0.08 μT . Dieser Bereich unterscheidet sich deutlich von Messungen in Wohnräumen, die unmittelbar an einen Transformatorenraum grenzen (Mittelwert: 0.28 μT ; 95%-Konfidenzintervall 0.24-0.32 μT für 10 Messungen und 0.27 bis 0.29 μT für 100 Messungen). In einer Zufallsstichprobe von 200 Wohnungen wird man jedoch nur vereinzelt (wenn überhaupt) solche Situationen antreffen.

Tabelle 45: Zu erwartende Präzision von arithmetischen Mittelwerten bei Punktmessungen in Innenräumen für verschiedene Stichprobengrößen (SD=Standardabweichung, KI=Konfidenzintervall; n=Anzahl Innenräume; alle Werte in V/m; Erläuterungen siehe Text).

Frequenzband	Typ Mikro-umgebung	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	n=10		n=20		n=50		n=100	
			minus SD	plus SD	unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI	unteres 95% KI	oberes 95% KI
Total	zuhaus hoch	0.38	<0	0.64	<0	0.56	0.17	0.51	0.27	0.47	0.31	0.45
Total	zuhaus	0.12	<0	0.21	<0	0.18	0.02	0.17	0.07	0.15	0.09	0.14
Total	Schulhaus	0.14	0.06	0.19	0.10	0.17	0.11	0.16	0.12	0.15	0.13	0.15
Downlink	zuhaus hoch	0.35	<0	0.62	<0	0.54	0.06	0.49	0.22	0.44	0.26	0.42
Downlink	zuhaus	0.10	<0	0.19	<0	0.16	<0	0.15	0.04	0.13	0.06	0.12
Downlink	Schulhaus	0.03	<0	0.05	<0	0.04	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03
Uplink	zuhaus hoch	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Uplink	zuhaus	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Uplink	Schulhaus	0.11	0.04	0.15	0.07	0.13	0.08	0.13	0.09	0.12	0.10	0.12
Rundfunk	zuhaus hoch	0.16	<0	0.27	<0	0.23	0.05	0.21	0.10	0.19	0.12	0.18
Rundfunk	zuhaus	0.06	<0	0.12	<0	0.10	<0	0.09	0.02	0.08	0.04	0.07
Rundfunk	Schulhaus	0.02	<0	0.04	<0	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
DECT	zuhaus hoch	0.07	<0	0.13	<0	0.11	0.02	0.10	0.05	0.09	0.06	0.09
DECT	zuhaus	0.07	<0	0.12	<0	0.10	0.02	0.09	0.05	0.09	0.05	0.08
W-LAN	zuhaus hoch	0.05	0.03	0.07	0.04	0.06	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
W-LAN	zuhaus	0.06	<0	0.09	<0	0.08	0.03	0.07	0.04	0.07	0.05	0.07
W-LAN	Schulhaus	0.09	<0	0.13	0.03	0.12	0.05	0.11	0.07	0.10	0.07	0.10

8 Schlussfolgerung

Dieser Bericht zeigt auf, dass die Durchführung eines qualitativ guten Monitorings von EMF mit tragbaren Geräten möglich ist und wichtige Erkenntnisse über die Exposition der Allgemeinbevölkerung geben wird. Es wird empfohlen sich auf Messungen draussen, in öffentlichen Verkehrsmitteln, in öffentlich zugänglichen Räumen und in Wohnungen zu fokussieren.

Für die Messungen draussen und in öffentlichen Verkehrsmitteln werden Pfadmessungen durch instruiertes Personal mit den Geräten EXPOM3 und EMDEX empfohlen. In der ganzen Schweiz sind unter der Berücksichtigung von Bebauungs- und Bevölkerungsdichte, dem Standort von EMF emittierenden Anlagen und von geographischen Charakteristika rund 140 Mikroumgebungen aus 30-35 Gemeinden zu definieren, die einmal pro Jahr auf einem definierten Messpfad vermessen werden. Die Anreise zu und zwischen den Messgebieten erlaubt zusätzlich die Erfassung der Exposition in öffentlichen Verkehrsmitteln sowie an Bahnhöfen und Haltestellen.

Für das Monitoring in Wohnungen wird empfohlen, eine Stichprobenmessung im Wohnzimmer mit einem frequenzselektiven Messgerät und einem EMDEX durch eine Fachperson durchzuführen. Ergänzend können 24-Stunden Messungen an einem ausgewählten Messpunkt in einzelnen Wohnungen durchgeführt werden. Dazu sollen etwa 150 bis 200 Wohnungen zufällig ausgewählt werden. Neben den Messungen werden die Bewohner über expositionsrelevante Verhaltensweisen befragt. Das erlaubt die integrale Abschätzung der gesamten persönlichen HF-EMF-Exposition durch Umweltexpositionen und selbst genutzte Geräte. Da eine solche Erhebung relativ aufwendig ist, wird sie nur alle drei bis fünf Jahre durchgeführt.

9 Danksagung

Diese Studie ist vom Bundesamt für Umwelt finanziert. Wir danken Viktória Finta und Sanjay Gupta Sagar, die die Messungen gemacht haben.

10 Literaturverzeichnis

Beekhuizen J., Vermeulen R., Kromhout H., Burgi A., Huss A. 2013: Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Sci Total Environ*; 445-446 202-209.

Blas J., Lago F.A., Fernandez P., Lorenzo R.M., Abril E.J. 2007: Potential exposure assessment errors associated with body-worn RF dosimeters. *Bioelectromagnetics*; 28 (7): 573-576.

Bolte J.F., van der Zande G., Kamer J. 2011: Calibration and uncertainties in personal exposure measurements of radiofrequency electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 32 (8): 652-663.

Bolte J.F., Eikelboom T. 2012: Personal radiofrequency electromagnetic field measurements in The Netherlands: exposure level and variability for everyday activities, times of day and types of area. *Environ Int*; 48 133-142.

Bornkessel C., Blettner M., Breckenkamp J., Berg-Beckhoff G. 2010: Quality control for exposure assessment in epidemiological studies. *Radiat Prot Dosimetry*; 140 (3): 287-293.

Breckenkamp J., Blettner M., Schuz J., Bornkessel C., Schmiedel S., Schlehofer B., Berg-Beckhoff G. 2012: Residential characteristics and radiofrequency electromagnetic field exposures from bedroom measurements in Germany. *Radiat Environ Biophys*; 51 (1): 85-92.

Bürgi A., Frei P., Theis G., Mohler E., Braun-Fahrländer C., Fröhlich J., Neubauer G., Egger M., Rösli M. 2010: A model for radiofrequency electromagnetic field predictions at outdoor and indoor locations in the context of epidemiological research. *Bioelectromagnetics*; 31 (3): 226-236.

CENELEC 2008: EN 50492, basic standard for the in situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations. Brussels CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardisation.

Dürrenberger G., Bürgi A., Frei P., Fröhlich J., Kühn S., Kuster N., Lauer O., Rösli M. 2012: NIS-Monitoring Schweiz – Eine Konzept- und Machbarkeitsstudie. Zürich.

Estenberg J., Augustsson T. 2014: Extensive frequency selective measurements of radiofrequency fields in outdoor environments performed with a novel mobile monitoring system. *Bioelectromagnetics*; 35 (3): 227-230.

Frei P., Mohler E., Bürgi A., Fröhlich J., Neubauer G., Braun-Fahrländer C., Rösli M. a.t.Q.-t. 2009a: A Prediction Model for Personal Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure Science of the Total Environment; 408 (1): 102-108.

Frei P., Mohler E., Neubauer G., Theis G., Bürgi A., Fröhlich J., Braun-Fahrländer C., Bolte J., Egger M., Rösli M. 2009b: Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environ Res*; 109 (6): 779-785.

Frei P., Mohler E., Burgi A., Fröhlich J., Neubauer G., Braun-Fahrlander C., Roosli M. 2010: Classification of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) for epidemiological research: Evaluation of different exposure assessment methods. *Environ Int*; 36 (7): 714-720.

Frei P., Mohler E., Braun-Fahrlander C., Fröhlich J., Neubauer G., Rösli M. 2012: Cohort study on the effects of everyday life radio frequency electromagnetic field exposure on non-specific symptoms and tinnitus. *Environ Int*; 38 (1): 29-36.

Heinrich S., Thomas S., Heumann C., von Kries R., Radon K. 2011: The impact of exposure to radio frequency electromagnetic fields on chronic well-being in young people - A cross-sectional study based on personal dosimetry. *Environ Int*; 37 (1): 26-30.

Iskra S., McKenzie R., Cosic I. 2010: Factors influencing uncertainty in measurement of electric fields close to the body in personal RF dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry*; 140 (1): 25-33.

Iskra S., McKenzie R., Cosic I. 2011: Monte Carlo simulations of the electric field close to the body in realistic environments for application in personal radiofrequency dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry*; 147 (4): 517-527.

Joseph W., Frei P., Rösli M., Thuroczy G., Gajsek P., Trcek T., Bolte J., Vermeeren G., Mohler E., Juhasz P., Finta V., Martens L. 2010: Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe. *Environ Res*; 110 (7): 658-663.

Joseph W., Frei P., Rösli M., Vermeeren G., Bolte J., Thuroczy G., Gajsek P., Trcek T., Mohler E., Juhasz P., Finta V., Martens L. 2012: Between-country comparison of whole-body SAR from personal exposure data in Urban areas. *Bioelectromagnetics*; 10.1002/bem.21737.

Juhasz P., Bakos J., Nagy N., Janossy G., Finta V., Thuroczy G. 2011: RF personal exposimetry on employees of elementary schools, kindergartens and day nurseries as a proxy for child exposures. *Prog Biophys Mol Biol*; 107 (3): 449-455.

Lauer O., Leidenberger P., Müri M., Fröhlich J. A System Concept for Novel Band-Selective Personal Exposure Assessment. In: EBEA (ed.); 2011; Rome, 22-24 February, 2011.

Lauer O., Neubauer G., Rösli M., Riederer M., Frei P., Mohler E., Fröhlich J. 2012: Measurement setup and protocol for characterizing and testing radio frequency personal exposure meters. *Bioelectromagnetics*; 33 (1): 75-85.

Lauer O., Frei P., Gosselin M.C., Joseph W., Rösli M., Fröhlich J. 2013: Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: A reference case. *Bioelectromagnetics*; 34 (5): 366-374.

Mahfouz Z., Gati A., Lautru D., Wong M.F., Wiart J., Hanna V.F. 2012: Influence of traffic variations on exposure to wireless signals in realistic environments. *Bioelectromagnetics*; 33 288-297.

Markakis I., Samaras T. 2013: Radiofrequency exposure in Greek indoor environments. *Health Phys*; 104 (3): 293-301.

McDevitt J.J., Breyse P.N., Bowman J.D., Sassone D.M. 2002: Comparison of extremely low frequency (ELF) magnetic field personal exposure monitors. *J Expo Anal Environ Epidemiol*; 12 (1): 1-8.

Mohler E., Frei P., Aydin D., Bürgi A., Rösli M. 2009: Persönliche Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder in der Region Basel (Schweiz): Ein Überblick über die QUALIFEX-Studie. *Umweltmed Forsch Prax*; 14 (6): 329-338.

Mohler E., Frei P., Fröhlich J., Braun-Fahrländer C., Rösli M. 2012: Exposure to radiofrequency electromagnetic fields and sleep quality: a prospective cohort study. *PLoS One*; 7 (5): e37455.

Neubauer G., Cecil S., Giczi W., Petric B., Preiner P., Fröhlich J., Rösli M. 2010: The association between exposure determined by radiofrequency personal exposimeters and human exposure: a simulation study. *Bioelectromagnetics*; 31 (7): 535-545.

Radon K., Spegel H., Meyer N., Klein J., Brix J., Wiedenhofer A., Eder H., Praml G., Schulze A., Ehrenstein V., von Kries R., Nowak D. 2006: Personal dosimetry of exposure to mobile telephone base stations? An epidemiologic feasibility study comparing the Maschek dosimeter prototype and the Antennessa DSP-090 system. *Bioelectromagnetics*; 27 (1): 77-81.

Rösli M., Frei P., Mohler E., Braun-Fahrländer C., Bürgi A., Fröhlich J., Neubauer G., Theis G., Egger M. 2008: Statistical analysis of personal radiofrequency electromagnetic field measurements with nondetects. *Bioelectromagnetics*; 29 (6): 471-478.

Rösli M., Mohler E., Frei P. 2010: Sense and sensibility in the context of radiofrequency electromagnetic field exposure. *Comptes-Rendus Physique de l'Académie des Sciences*; 11 (9-10): 576-584.

Rösli M., Jenni D., Kheifets L., Mezei G. 2011: Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *Sci Total Environ*; 409 (18): 3364-3369.

Rösli M., Struchen B., Urbinello D. 2014: Unsichtbare Wellen: wie die Emissionen der mobilen Kommunikation und des Stroms unsere Gesundheit beeinflussen. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft beider Basel*; 15 11-22.

Stratmann M., Wernli C., Kreuter U., Joss S. 1995: Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder. Villigen.

Thielens A., De Clercq H., Agneessens S., Lecoutere J., Verloock L., Declercq F., Vermeeren G., Tanghe E., Rogier H., Puers R., Martens L., Joseph W. 2013: Personal distributed exposimeter for radio frequency exposure assessment in real environments. *Bioelectromagnetics*; 34 (7): 563-567.

Thuróczy G., Molnár F., Jánossy G., Nagy N., Kubinyi G., Bakos J., Szabó J. 2008: Personal RF exposimetry in urban area. *Ann. Telecommun.*; 63 87-96.

Tomitsch J., Dechant E., Frank W. 2010: Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in lower Austria. *Bioelectromagnetics*; 31 (3): 200-208.

Tomitsch J., Dechant E. 2012: Trends in residential exposure to electromagnetic fields from 2006 to 2009. *Radiat Prot Dosimetry*; 149 (4): 384-391.

Urbiniello D., Rössli M. 2013: Impact of one's own mobile phone in stand-by mode on personal radiofrequency electromagnetic field exposure. *J Expo Sci Environ Epidemiol*; 23 (5): 545-548.

Urbiniello D., Huss A., Beekhuizen J., Vermeulen R., Rössli M. 2014a: Use of portable exposure meters for comparing mobile phone base station radiation in different types of areas in the cities of Basel and Amsterdam. *Sci Total Environ*; 468-469 1028-1033.

Urbiniello D., Joseph W., Verloock L., Martens L., Roosli M. 2014b: Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environ Res*; 134C 134-142.

van Deventer E., van Rongen E., Saunders R. 2011: WHO research agenda for radiofrequency fields. *Bioelectromagnetics*; 32 (5): 417-421.

Vermeeren G., Markakis I., Goeminne F., Samaras T., Martens L., Joseph W. 2013: Spatial and temporal RF electromagnetic field exposure of children and adults in indoor micro environments in Belgium and Greece. *Prog Biophys Mol Biol*; 113 (2): 254-263.

Viel J.F., Cardis E., Moissonnier M., de Seze R., Hours M. 2009a: Radiofrequency exposure in the French general population: band, time, location and activity variability. *Environ Int*; 35 (8): 1150-1154.

Viel J.F., Clerc S., Barrera C., Rymzhanova R., Moissonnier M., Hours M., Cardis E. 2009b: Residential exposure to radiofrequency fields from mobile phone base stations, and broadcast transmitters: a population-based survey with personal meter. *Occup Environ Med*; 66 (8): 550-556.

Viel J.F., Tiv M., Moissonnier M., Cardis E., Hours M. 2011: Variability of radiofrequency exposure across days of the week: a population-based study. *Environ Res*; 111 (4): 510-513.