

Grolimund + Partner AG

Waldeggstrasse 42a, 3097 Liebefeld-Bern, T 031 356 20 00
www.grolimund-partner.ch

Fields at Work GmbH

Hegibachstrasse 41, 8032 Zürich, T 044 382 38 31
<https://fieldsatwork.ch/>



Schlussbericht

Monitoring adaptiver Antennen mittels eines räumlichen
Sensornetzes an einem stark frequentierten Ort:
Bürkliplatz-Bellevue Zürich

Im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, UR, ZG, ZH

A7433

11. Mai 2026

11. Mai 2026

Impressum

Auftraggeber:

Kanton Aargau
Kanton Basel-Stadt
Kanton Basel-Land
Kanton Bern
Kanton Freiburg
Kanton Uri
Kanton Zug
Kanton Zürich

Auftragnehmer:

G+P
Grolimund + Partner AG
Entfelderstrasse 45
5000 Aarau

FaW
Fields at Work GmbH
Hegibachstrasse 41
8032 Zurich

Projektteam

Dominik Haas, Grolimund und Partner
Toni Ziegler, Grolimund und Partner
Marco Zahner, Fields at Work
Jürg Fröhlich, Fields at Work

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.1	11.05.2026	dh,zi,mz,jf	Schlussbericht	Auftraggeber

11. Mai 2026

Inhalt

1. Projektübersicht.....	3
2. Standort und Sensormontage	4
2.1 Standort Bürkliplatz und Bellevue	4
2.2 Sensormontage.....	5
3. Upgrade Peak-Detektor Low-Cost Sensoren.....	6
4. Messprogramm.....	7
5. Messvorgehen.....	8
5.1 Werkzeuge und Methoden.....	8
5.2 Statische Messungen.....	8
5.3 Routenmessungen	8
6. Datenanalyse horizontale Anordnung Bürkliplatz/Bellevue.....	9
6.1 Unterschied Feldstärkeverteilung zwischen Bürkliplatz/Bellevue und Irchel	9
6.2 Vergleich forcierter Download-Normalbetrieb horizontales Sensornetzwerk.....	12
6.3 Statische Messungen vor jedem Sensor ohne forcierten Download, Einfluss Mikrozelle.....	13
6.4 Statische Messungen vor jedem Sensor mit forciertem Download	14
6.5 Routenmessungen horizontale Sensoranordnung	18
6.6 Nachabschaltung 5G-Bänder.....	19
7. Parallelmessungen mit dem ExpoM-RF	21
7.1 Vergleichsmessungen im Frequenzband 3400 - 3800 MHz	21
7.2 Gesamtmission und Anteile der verschiedenen Technologien im Vergleich	23
8. Schlussfolgerungen und Fazit	25
9. Literaturverzeichnis	26
I Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messwerte der horizontalen Sensoranordnung	27
II Statistische Kennwerte für den Normalbetrieb und den forcieren Download	28
III Nachabschaltung 5G-Bänder Nacht.....	30
IV ExpoM-RF Messung: Stündliche Median-Umgebungsfeldstärken nach Kategorien	31
V Statistische Daten der ExpoM-RF Messung (RMS-Werte).....	32
VI Statistische Daten der ExpoM-RF Messung (Peak-Werte).....	33

1. Projektübersicht

Im Auftrag der Kantone AG, BE, BS, BL, FR, UR, ZG, ZH und des BAFU führten die Grolimund und Partner AG und die Fields at Work GmbH eine Studie über das «Monitoring adaptiv betriebener Mobilfunkantennen mittels eines räumlichen Sensornetzes» auf dem Campus Irchel der Universität Zürich durch [1], [2], [3]. Das Hauptziel der Studie lag in der Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Dynamik von adaptiven 5G-Antennen. Für die Messungen wurde ein neuartiges Sensornetzwerk entwickelt, welches die simultane Erfassung mehrerer 5G-Beams ermöglicht. Der Campus Irchel bot einen weitestgehend ungestörten Hintergrund mit geringer Mobilfunknutzerdichte

11. Mai 2026

für die Messungen, so dass die zeitliche und räumliche Dynamik bei forciertem Download aufgezeigt werden konnten.

In dieser Nachfolgestudie wird das Sensornetz im öffentlichen Raum zwischen dem Bürkliplatz und der Haltestelle Bellevue in Zürich installiert und kommt somit an einem stark frequentierten Ort zum Einsatz. Es soll untersucht werden, ob sich das Sensornetz auch für ein Feldstärkemonitoring in Szenarien mit hoher Dynamik eignet und inwiefern sich dieses Szenario von den Messungen auf dem Campus Irchel unterscheidet. Beim Bürkliplatz gibt es mehrere Mobilfunkantennen des gleichen Anbieters. Dies stellt ideale Voraussetzungen dar, um ein 'Handover' zwischen den Mobilfunkantennen zu beobachten, wenn sich der Mobilfunknutzer räumlich verschiebt. Bei der Haltestelle Bellevue befinden sich auch mehrere Kleinzellen mit einer Sendeleistung weniger als 6 W. Der Einfluss dieser Zellen auf die NIS-Exposition wird untersucht. Zusätzlich werden Feldstärkeunterschiede zwischen der Tages- und Nachtzeit aufgezeigt, welche vor allem auch durch die Nachtschaltung gewisser Dienste (5G) hervorgerufen werden. In dieser Nachfolgestudie kommt ein horizontales Netzwerk mit insgesamt 12 Sensoren zum Einsatz. Das Sensornetz wurde überarbeitet und verfügt über eine verbesserte Peak-Detektion.

2. Standort und Sensormontage

Vor der Auswahl der Standorte wurden die Anforderungen an die Messumgebung, die organisatorischen Anforderungen an den Messstandort und die technischen Anforderungen an die Antennensysteme eruiert.

Die Standortauswahl für die Messung ist mit organisatorischen Anforderungen verknüpft. Für die Montage muss ein Stromanschluss vorhanden sein. Dieser wurde vom EWZ Zürich eingerichtet. Zusätzlich musste für die Querung der Tramleitung eine Bewilligung der VBZ eingeholt werden und der Kabelabschnitt der Querung wurde von der VBZ verlegt. Der Messort sollte gegenüber Witterung geschützt sein und Schutz vor Vandalismus bieten. Ein zentraler Aspekt stellt auch die Erreichbarkeit der Installation für Wartungsarbeiten dar.

Für die Studie muss die Antenne mit der NR 5G Technologie im Frequenzbereich 3400-3800 MHz betrieben werden und über adaptives Beamforming verfügen. Vorzugsweise werden Antennen mit 16 und mehr Sub-Arrays berücksichtigt, da eine grosse Anzahl an Sub-Arrays zu kleineren Öffnungswinkeln (HPBW, half power beam width) des Beams führt. Für eine eingehende Prüfung der Eignung der Antenne für das Messvorhaben ist die Kenntnis weiterer technischer Parameter notwendig, welche den Standortdatenblättern entnommen werden können.

Der Standortauswahl liegt die öffentlich zugängliche Funksender-Datenbank des BAKOMS zugrunde [4]. Bei Eignung der Messumgebung wurde bei den Kantonen Einsicht in die entsprechenden Standortdatenblätter erfragt. Bei technischer Eignung der Antenne wurde der Standort als potenzieller Kandidat vermerkt. Es wurde eine Begehung der Standorte vorgenommen.

2.1 Standort Bürkliplatz und Bellevue

Die Zone Bürkliplatz bis Bellevue wurde ausgewählt, da sie annähernd den Idealfall für diese Nachfolgestudie darstellt. Es handelt sich um einen innerstädtischen Raum, der stark frequentiert ist und mehrere Mobilfunkantennen verschiedener Anbieter aufweist. Der Bürkliplatz ist eine gemischte Verkehrszone aus Tram- und Strassenverkehr sowie Fussgängern. Insbesondere auf der

11. Mai 2026

Brücke gibt es keine dämpfenden Strukturen, welche die Sicht auf die Antennen einschränken. Bei der Haltestelle Bellevue sind mehrere Kleinzellen mit einer Sendeleistung von weniger als 6 W installiert. Auch Mikrozellen können über adaptives Beamforming verfügen und ihre Beams räumlich auslenken. Abbildung 1 zeigt die Lage der Sensorelemente sowie die Antennenstandorte und deren Hauptcharakteristik. Es gilt zu beachten, dass nur Antennen mit Emissionen im 5G-Band von den Sensoren detektiert werden. Sensor S1 wurde so ausgerichtet, dass die Antennenöffnung in Richtung ZBQB zeigt. Aufgrund der geraden Montagefläche der Kandelaber auf der Quaibrücke liegt der Normalenvektor der Antennenöffnungen von S2-S7 rechtwinklig zur Brückenkante und zeigt in Richtung Zürichsee. Die Antennenöffnungen der Sensoren S8-S12 wurden bei der Montage so ausgerichtet, dass sie in Richtung ZSEP zeigen.

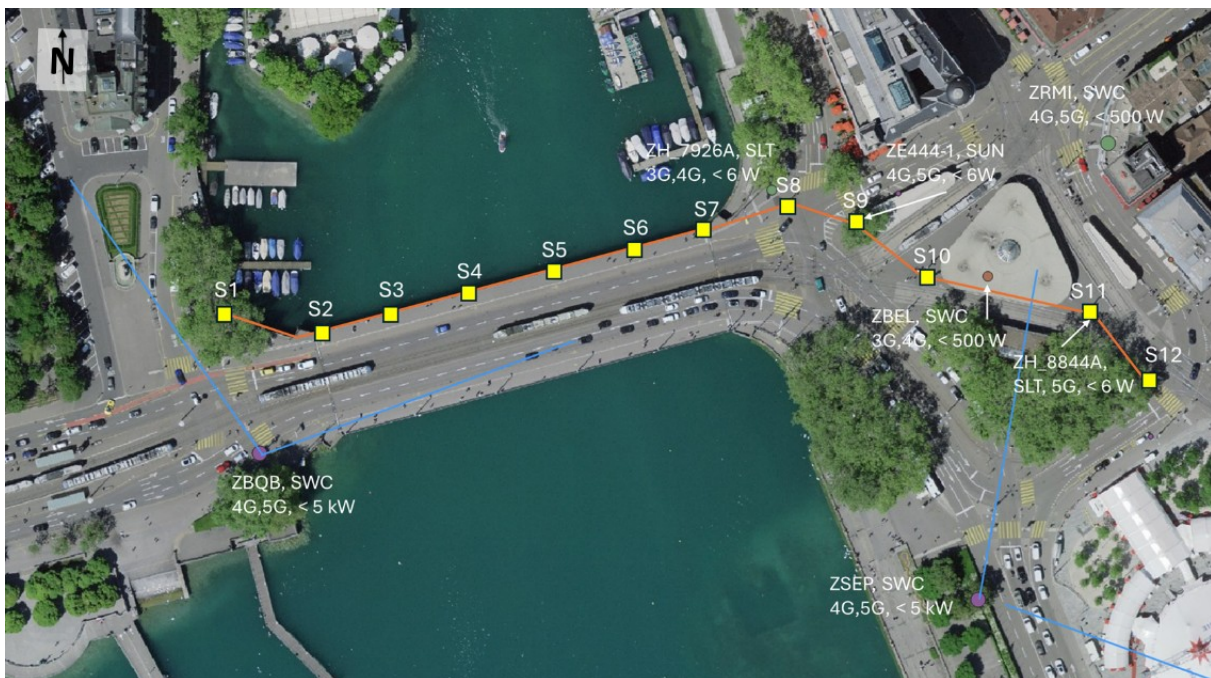


Abbildung 1: Übersicht des ausgewählten Mess-Standorts zwischen dem Bürkliplatz und der Haltestelle Bellevue. Die gelben Punkte kennzeichnen die Sensorstandorte und die orange Linie kennzeichnet den Verlauf des Datenkabels zwischen den Sensoren. Die Antennenstandorte werden durch farbige Punkte dargestellt und bei den leistungsstarken Swisscom-Antennen wird die Hauptstrahlrichtung durch blaue Pfeile gekennzeichnet. Die weissen Annotationen bezeichnen die Antennenstandorte und geben Auskunft über die aufgeschalteten Dienste (3G, 4G, 5G) und die Sendeleistung, gemäss [4]. (Karte: Google Maps).

2.2 Sensormontage

Die Montage der Sensoren fand am 18. und 19. August 2025 statt und verlief weitgehend reibungslos. Der erste Teil des Sensorstrangs bis Sensor S8 (siehe Abbildung 1) konnten wir selbst installieren, da er nicht an heikle oder gefährliche Infrastruktur befestigt werden musste.

11. Mai 2026



Abbildung 2: Impressionen der Sensormontage. Links: Montage von Sensor S12; Mitte: Verlegung der Verbindungskabel über den Fahrleitungen durch die VBZ; rechts: Sensor auf Brücken-Kandelaber

Die Verbindungskabel für die Sensoren S8 - S12 mussten allerdings über die VBZ-Fahrleitungen geführt werden. Die Installation des entsprechenden Abschnitts wurde deshalb durch die VBZ durchgeführt und fand in der Nacht vom 18. auf den 19. August 2025 nach Betriebsschluss statt (Abbildung 2). Die Fahrleitung wurde während der Dauer der Arbeiten abgeschaltet.



Abbildung 3: Sicht auf die Quai-Brücke mit installiertem Sensornetzwerk. Im Vordergrund ist Sensor S4 auf dem Kandelaber erkennbar.

3. Upgrade Peak-Detektor Low-Cost Sensoren

Im Rahmen der Vorgängerstudie wurde das Verhalten der Peak Detektion der Sensoren charakterisiert. Dabei stellten wir fest, dass kurze Peaks in der Grössenordnung von Mikrosekunden nur dann mit der vollen Amplitude erfasst werden, wenn sie mehrmals innerhalb einer Messperiode auftreten. Isolierte Einzelereignisse mit einer Dauer von weniger als 1 Millisekunde wurden deshalb potenziell verpasst oder deren Amplitude unterschätzt. Um diesen Nachteil zu minimieren bzw. zu beheben, wurden sämtliche Sensoren vor der Durchführung der Messkampagne mit einem verbesserten Peak-Detektor ausgestattet. Dieses Upgrade setzt sich aus einer Kombination von Software- und Hardwaremodifikationen zusammen und konnte erfolgreich auf der bestehenden

11. Mai 2026

Hardware implementiert werden. Durch das Upgrade konnte die 3 dB Reaktionszeit des Peak-Detektors für Einzelereignisse um rund drei Grössenordnungen (von ursprünglich 1 ms auf ca. 1 μ s) verbessert werden. Abbildung 4 zeigt die Auswirkungen des Upgrades im Vergleich zur Originalkonfiguration auf einer logarithmischen Zeitskala.

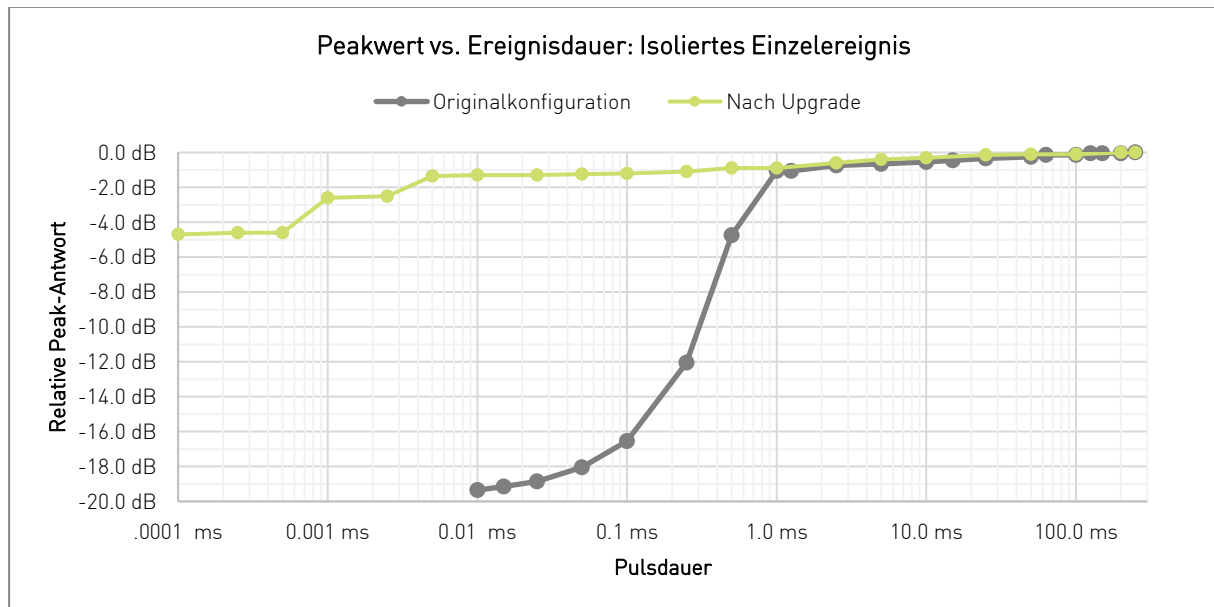


Abbildung 4: Vergleich der Peak-Detektor Kennlinie vor und nach dem Upgrade der Sensoren. Die Kurven zeigen den erfassten Peak-Wert abhängig von der Pulsdauer eines Einzelpulses innerhalb des Messintervalls.

4. Messprogramm

Das Sensornetz wurde gemäss den Angaben in Tabelle 1 installiert, betrieben und abgebaut. Die Messungen fanden während des Zeitraums vom 20. August bis zum 5. September 2025 statt. Dieser Zeitraum liegt ausserhalb der Sommerferien. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Messungen unter für den Standort charakteristischen Bedingungen durchgeführt wurden.

Datum	Beschreibung
18.08.2025	Beginn Installation Sensornetz
19.08.2025	Installation Querung von der Quaibrücke zum Bellevue
19.08.2025	Start Messung mit allen Sensoren
04.09.2025	Forcierter Download und Routenmessungen
05.09.2025	Ende der Messungen
05.09.2025	Abbau Sensornetz

Tabelle 1: Messzeiträume und Messkampagnen. Das Sensornetz wurde in horizontaler Konfiguration installiert.

11. Mai 2026

5. Messvorgehen

5.1 Werkzeuge und Methoden

Innerhalb der Messperioden, in denen das Messnetzwerk aktiv war, wurden am Donnerstag, 4. September 2025 Messungen mit forciertem Download durchgeführt, um den adaptiven Betrieb der Antenne zu testen (vgl. Tabelle 1). Für den forcierten Download wurden 5G-fähige Smartphones mit einer SIM-Karte und einem Abo, das unlimitierte mobile Daten beinhaltet, ausgestattet. Für die forcierten Downloads wurden SIM-Karten von Swisscom, Sunrise und Salt eingesetzt. Zudem wurden die SIM-Karten in verschiedenen Gerätetypen verwendet: Pixel 5a (Salt), Samsung Galaxy A52 (Sunrise), iPhone 14 Pro Max (Swisscom).

Eine 10 GB grosse Test-Datei, die sich auf dem Webserver von Fields at Work befindet, wurde damit (ggf. mehrmals hintereinander) via 5G Mobilfunknetz heruntergeladen. Zusätzlich wurden auch Streaming Tests mit der Netflix FAST Applikation durchgeführt. Das Ziel der Messungen mit forciertem Download ist das gezielte Herbeiführen von Situationen mit besonders intensiver 5G Downlink-Aktivität auf der beobachteten Basisstation. Bei adaptivem Betrieb ist davon auszugehen, dass dabei auch ein «Beam» der Antenne in Richtung Mobiltelefon gebildet wird und bei Bewegung des Endgeräts entsprechend nachgeführt wird. Im Rahmen dieser Studie wurden diverse statische und dynamische Szenarien durchgespielt, um die Auswirkungen und Ausprägung dieses «Beamforming»-Effekts in der Praxis zu visualisieren.

5.2 Statische Messungen

Bei den statischen Messungen wurde vor jedem einzelnen Sensor ein forciertes Download während einer Dauer 2 Minuten durchgeführt. Dabei wurde das Mobiltelefon in der Hand gehalten und die Person stand mit dem Rücken zum Sensor. Zudem wurde darauf geachtet, dass sich das Mobiltelefon in einer gewissen minimalen Entfernung (ca. 3 m) zum jeweiligen Sensor befindet. Dies dient dem Ziel, eine Beeinflussung der Messung durch den Uplink-Anteil auf ein Minimum zu beschränken.

5.3 Routenmessungen

Am 04.09.2025 wurden Routenmessungen vor dem Sensornetzwerk durchgeführt. Die Messroute (siehe Abbildung 5) wurde mit einem Mobiltelefon in der Hand bei kontinuierlichem forciertem Download mittels Netflix FAST Applikation abgeschrieben. Diese Messung wurde insgesamt viermal durchgeführt. Zuerst mit jedem der drei Smartphones einzeln (Swisscom, Sunrise und Salt), anschliessend mit allen drei Smartphones gleichzeitig, um maximale und anbieterübergreifende Downlink Aktivität zu erzwingen. Das Abschreiten der Route fand im langsamen Schritttempo statt und dauerte jeweils 5-7 Minuten. Die Unterschiede sind unter anderem auf die variablen Wartezeiten bei den Strassenüberquerungen (Lichtsignale) zurückzuführen. Die Route wurde abwechselnd in beide Richtungen (S1 → S12 und S12 → S1) abgeschrieben.

11. Mai 2026

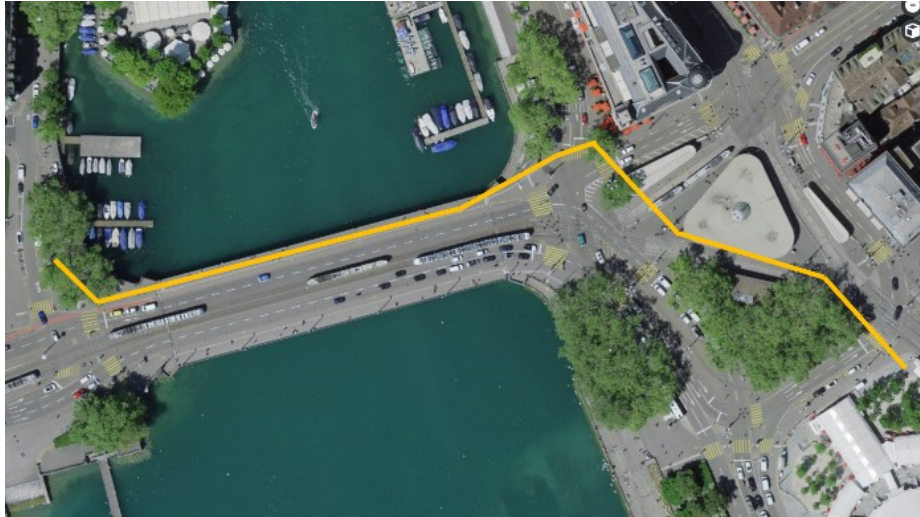


Abbildung 5: Messroute für die Routenmessungen mit forciertem Downlink. Die Route wurde im langsamen Schritttempo und abwechselnd in beide Richtungen abgeschritten.

6. Datenanalyse horizontale Anordnung Bürkliplatz/Bellevue

6.1 Unterschied Feldstärkeverteilung zwischen Bürkliplatz/Bellevue und Irchel

Die vom Sensornetzwerk erfasste horizontale Feldstärkeverteilung ist in Abbildung 6 dargestellt. Das linke Panel zeigt die Verteilung der erfassten RMS-Werte dieser Messkampagne zwischen dem Bürkliplatz und der Haltestelle Bellevue. Das rechte Panel zeigt die entsprechenden PEAK-Werte. Die Nummerierung der Sensoren in den Panels entspricht der Anordnung in Abbildung 1 für das Sensornetz zwischen Bürkliplatz und Bellevue. Es wird die bei jedem Sensor erfasste Immission ausgewiesen. Daher findet keine Korrektur für unterschiedliche Distanzen zwischen der Antenne und den einzelnen Sensoren statt.

Sowohl die RMS- wie auch die Peak-Verteilung weisen zwei Bereiche auf, in die Werte mit erhöhter Wahrscheinlichkeit fallen. Bei der RMS-Verteilung liegt die Basislinie bei niedriger Aktivität zwischen 0.03 und 0.04 V/m. Diese ist im Bereich der unteren Empfindlichkeitsgrenze der Sensoren und dürfte deshalb mit der Nachtabstaltung (siehe auch Abschnitt 6.6) zusammenhängen. Der zweite dichte Teil der Verteilung streut stärker und liegt zwischen 0.06 und 0.2 V/m. Dieser Teil umfasst RMS-Feldstärkewerte, die aufgrund von Mobilfunkaussendungen entstehen, welche in den vom Sensor erfassten Raumwinkel abgestrahlt werden. Gemäss Tabelle 2 im Anhang reichen die Medianwerte der Gesamtverteilung von 0.03 V/m bis 4.16 V/m bei Sensor S9. Die Verteilung bei Sensor S9 ist systematisch zu höheren Feldstärkewerten verschoben. Die Ursache hierfür liegt in der Nähe zur Sendeanlage ZE441-1.

Gegenüber den RMS-Werten weist die Verteilung der Peak-Werte höhere Feldstärkewerte auf. Bei niedriger Aktivität liegen die Peak-Werte der Basislinie zwischen 0.1 und 0.5 V/m. Zwischen den Sensoren ist die Basislinie Schwankungen unterworfen. Der dichte Teil der Peak-Verteilung direkt erfasster 5G-Mobilfunkaussendungen reicht von etwa 0.4 V/m bis 5 V/m. Auch bei den Peak-Werten ist die Feldstärkeverteilung bei Sensor S9 zu höheren Werten verschoben.

11. Mai 2026

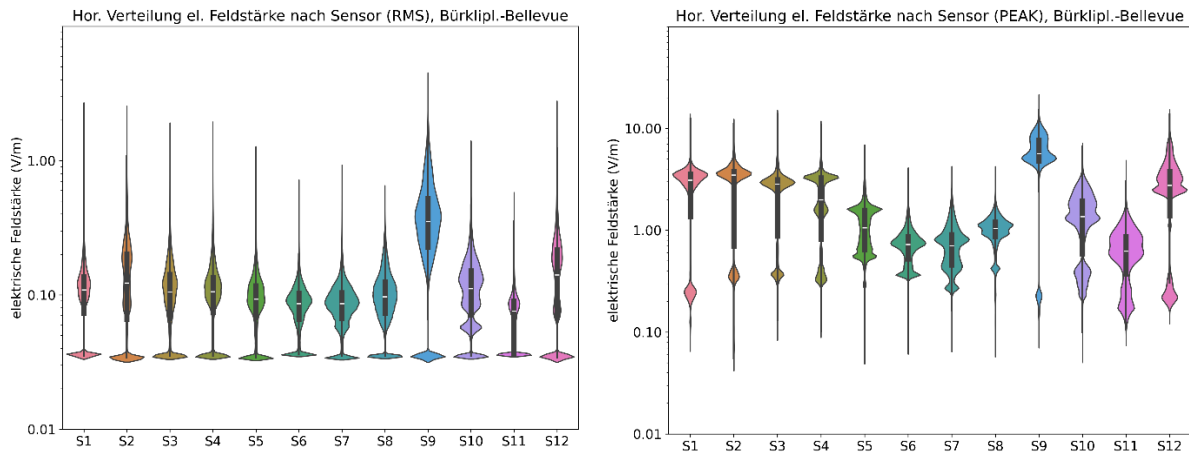


Abbildung 6: Elektrische Feldstärkeverteilung der horizontalen Sensorkonfiguration in V/m mit Log-Skala. **Linkes Panel:** Verteilung der RMS-Feldstärkewerte. **Rechtes Panel:** Verteilung der Peak-Feldstärkewerte. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 1. Die Analyse berücksichtigt einen Erfassungszeitraum von 16 Tagen zwischen dem 20. August und 4. September 2025. Der Tag der Sensormontage (18./19. August) und der Zeitraum mit forciertem Download (4. September) wurden nicht berücksichtigt. Der verwendete Datensatz weist für beide Panels eine Grösse von 4'810'589 Messpunkten auf. Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messungen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 des Anhangs I gelistet.

Der Verlauf der Medianwerte zeigt, dass die Feldstärkewerte von S1 (RMS: 0.11 V/m, Peak: 3.10 V/m) zu S2 (RMS: 0.12 V/m, Peak: 3.46 V/m) ansteigen und danach kontinuierlich abnehmen. Gemäss Abbildung 1 liegt Sensor S1 zwar in der Nähe der Antenne ZBQB, wird aber durch Bäume abgeschattet. Bei S2 besteht uneingeschränkte Sicht auf die Mobilfunkantennen und der Sensor liegt zwischen den beiden Hauptabstrahlrichtungen, was zur Verteilung mit den höchsten Medianwerten der Sensorgruppe Bürkliplatz/Quaibrücke führt. Die Sensorgruppe S3-S7 (RMS: 0.11-0.09 V/m, Peak: 2.84-0.71 V/m) liegt auf der Quaibrücke und die Distanz zur Mobilfunkanlage ZBQB nimmt kontinuierlich zu. Dies führt zu einer allmählichen Reduktion der gemessenen Median-Feldstärkewerte. Der Trend ist auch bei den PEAK-Messungen zu sehen. Der Standort S8 (RMS: 0.10 V/m, Peak: 1.04 V/m) liegt im Einflussbereich der Mikrozelle ZE444-1 von Sunrise und weist wieder leicht höhere Median-Feldstärkewerte auf. Aufgrund der Nähe zur Mikrozelle ZE444-1 von Sunrise ergeben sich bei S9 (RMS: 0.35 V/m, Peak: 5.65 V/m) die höchsten Medianwerte der gesamten Messkette. Die Sensoren S10-S12 (RMS: 0.08-0.14 V/m, Peak: 0.62-2.78 V/m) liegen auf der Verkehrsinsel der Haltestelle Bellevue und liegen im Einflussbereich mehrerer Mobilfunkantennen: ZSEP (Swisscom, <5 kW), ZRMI (Swisscom, <500 W), ZH_8844A (Salt, <6 W) und ZE444-1 (Sunrise, <6 W). Sensor S11 wird durch Bäume und am Kandelaber befestigte Metallschilder von der leistungsstarken Antenne ZSEP teilweise abgeschirmt, was in niedrigeren Feldstärkewerten resultiert.

Zum Vergleich mit den Feldstärkewerten in einer belebten innerstädtischen Umgebung (Bürkliplatz-Bellevue) mit mehreren Mobilfunkanlagen, sind in Abbildung 7 die Feldstärkewerteverteilungen aus der Vorstudie auf dem Universitätsgelände Irchel dargestellt. Die Feldstärkebeiträge auf dem Irchel stammen von einer einzelnen Mobilfunkanlage (ZHUJ) und die Nutzerdichte von Mobile-Dienstleistungen war auf dem Campus Irchel geringer. Die Medianwerte der RMS-Feldstärken liegen auf dem Irchel zwischen 0.03-0.08 V/m und bei der Installation Bürkliplatz/Bellevue zwischen 0.08-0.14 V/m (ohne S9). Die Hintergrundimmission in der stark frequentierten Zone

11. Mai 2026

Bürkliplatz-Bellevue ist somit ca. 1.8-2,7-mal so hoch wie auf dem Irchel. Die Medianwerte der Peak-Feldstärken liegen auf dem Irchel zwischen 0.59-2.62 V/m und bei der Messkette Bürkliplatz/Bellevue zwischen 0.62-3.46 V/m (ohne S9), also etwa gleich hoch bis 1.3-mal so hoch.

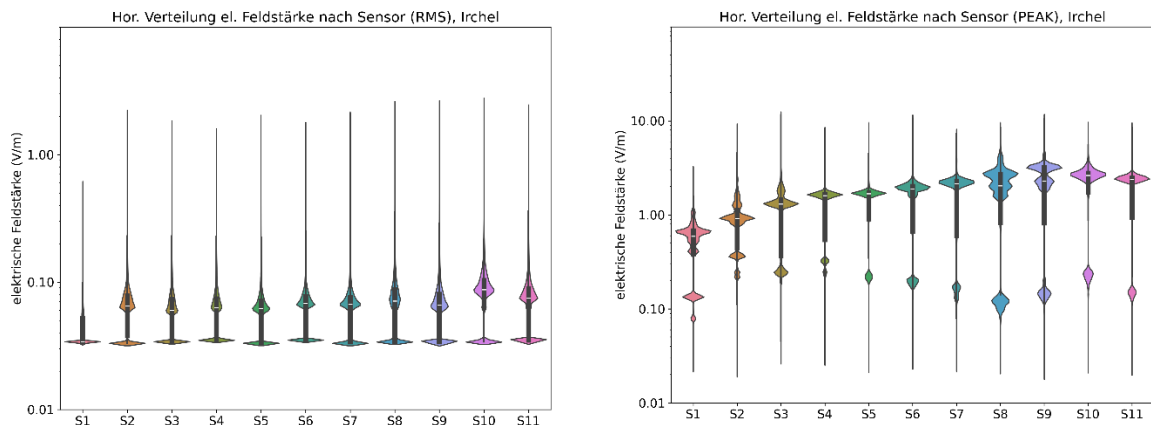


Abbildung 7: Elektrische Feldstärkeverteilung der horizontalen Sensorkonfiguration in V/m mit Log-Skala auf dem Irchel, siehe [1]. **Linkes Panel:** Verteilung der RMS-Feldstärkewerte. **Rechtes Panel:** Verteilung der Peak-Feldstärkewerte. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 3 aus [1]. Die Analyse berücksichtigt einen Erfassungszeitraum von 14 Tagen zwischen dem 15. März und 30. März 2024. Der Tag der Sensormontage (14. März) und der Zeitraum mit forciertem Download (26./28. März) wurden nicht berücksichtigt. Der verwendete Datensatz weist für beide Panels eine Grösse von 4'644'873 Messpunkten auf. Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messungen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 des Anhangs I von [1] gelistet.

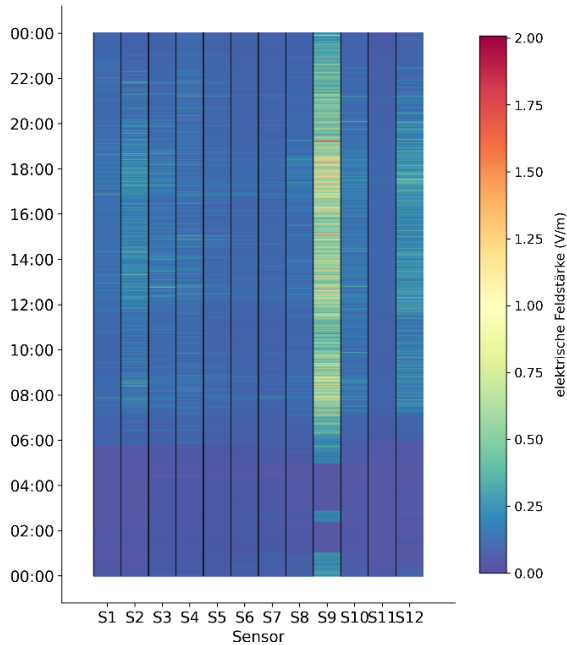
Beim SwissNIS-Projekt [5] werden die Feldstärkewerte im städtischen Raum mit zwei Langzeitmessstationen in Zürich und Aarau erfasst. Die Feldstärkemessgeräte befinden sich auf den Dächern von Gebäuden an erhöhter Lage. In Aarau wurden für das Jahr 2024 Medianwerte der elektrischen Feldstärke im 5G-Band gemessen: RMS: 0.12 V/m, Peak: 3.36 V/m. In Zürich lag der Medianwert der elektrischen Feldstärke bei: RMS: 0.16 V/m, Peak: 2.36 V/m. Ohne Berücksichtigung von S9 liegen die 5G Median-Feldstärkewerte zwischen Bellevue und Bürkliplatz mit 0.08-0.14 V/m (RMS) und mit 0.62-3.46 V/m (Peak) in einem ähnlichen Bereich.

11. Mai 2026

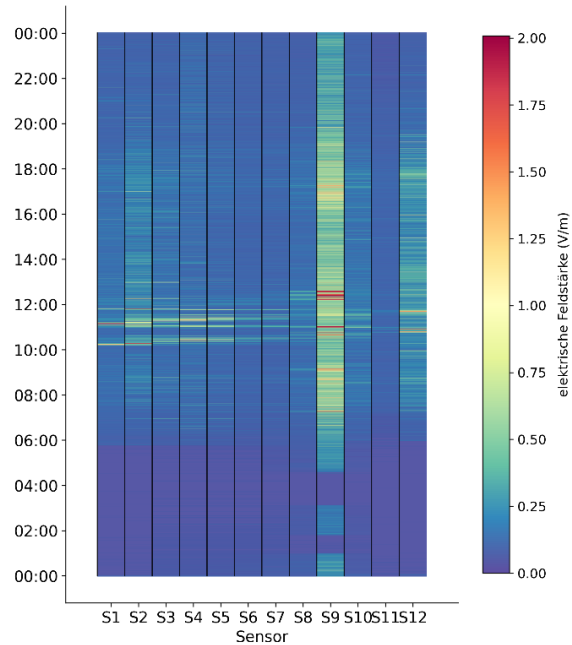
6.2 Vergleich forciertes Download-Normalbetrieb horizontales Sensornetzwerk

Die durch den forcierten Download hervorgerufene Feldstärkeverteilung hebt sich auf dem Sensornetzwerk deutlich vom Normalbetrieb ab, siehe Abbildung 8.

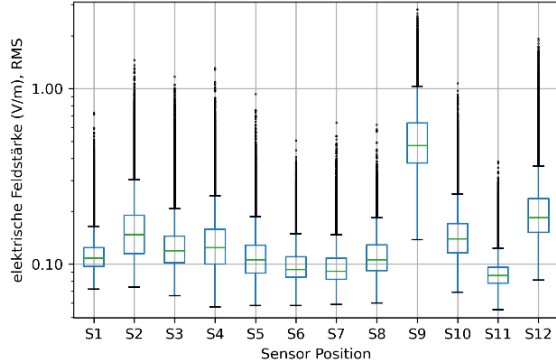
Hor. Netz., RMS, Donnerstag, 2025-08-28, Bürklipl.-Bellevue



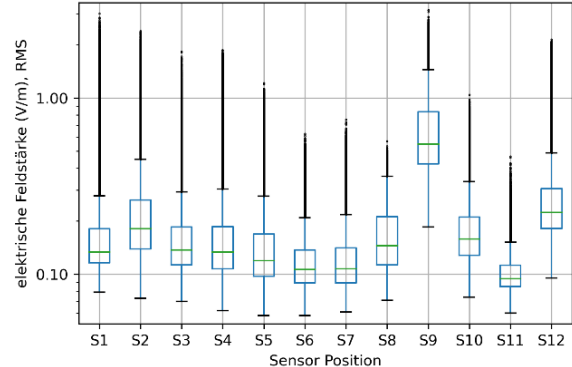
Hor. Netz., RMS, Donnerstag, 2025-09-04, Bürklipl.-Bellevue



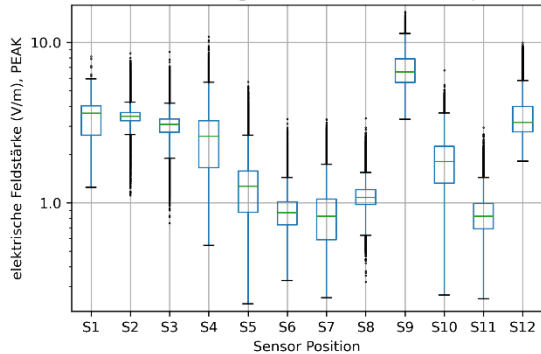
Hor. Netz., Donnerstag, 2025-08-28, RMS, Bürklipl.-Bellevue



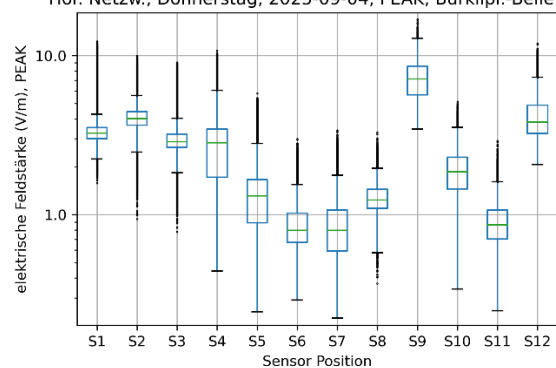
Hor. Netz., Donnerstag, 2025-09-04, RMS, Bürklipl.-Bellevue



Hor. Netz., Donnerstag, 2025-08-28, PEAK, Bürklipl.-Bellevue



Hor. Netz., Donnerstag, 2025-09-04, PEAK, Bürklipl.-Bellevue



11. Mai 2026

Abbildung 8: Zeitliche und räumliche Dynamik der vom Sensornetzwerk erfassten RMS-Feldstärken. Die forcierten Downloads wurden am 04.09.2025 zwischen 08:45 Uhr und 12:43 Uhr durchgeführt. **Oben links:** Sensoraufgelöstes Wasserfalldiagramm der gemessenen Feldstärken als zeitlicher Verlauf am Donnerstag, 28.08.25. **Unten links:** RMS und Peak Feldstärkeverteilung im Zeitraum von 08:45 bis 12:43 für den Normalbetrieb. **Oben rechts:** Sensoraufgelöstes Wasserfalldiagramm mit dem zeitlichen Verlauf der gemessenen Feldstärken an einem Tag mit forciertem Download, Donnerstag 04.09.2025. Die Farbskala wurde auf 2.0 V/m festgesetzt. **Unten rechts:** RMS und Peak Feldstärkeverteilung im Zeitraum von 08:45 bis 12:43 während des forcierten Downloads. Bei den Boxplot-Verteilungen in den unteren Panels zeigt die grüne horizontale Linie den Median und die obere/untere Kante des blauen Kastens kennzeichnet das 25./75. Perzentil. Ausreisser ausserhalb des 1.5-fachen Interquartilsabstand (IQR) werden durch Punkte dargestellt. Die statistischen Kenndaten befinden sich in Tabelle 4 bis Tabelle 7 des Anhangs II.

Die RMS-Feldstärkewerte liegen am 28.08.2025 (08:45-12:43) zwischen 0.09 V/m (S1) und 0.18 V/m (S12) und bei 0.47 V/m (S9) für den Median. Das 75. Perzentil liegt zwischen 0.10 V/m (S11) und 0.24 V/m (S12) und bei 0.64 V/m (S9). Der Median der Peakwerteverteilung reicht bei Normalbetrieb von 0.82 V/m (S7) bis 3.61 V/m (S1) und bei 6.54 V/m (S9). Das 75. Perzentil befindet sich im Bereich von 0.99 V/m (S11) bis 4.03 V/m (S1) und liegt für S9 bei 7.91 V/m.

Der forcierte Download am 04.09.2025 ist im unteren linken Panel von Abbildung 8 deutlich sichtbar. Zwischen 08:45 und 12:43 steigen die Medianwerte der RMS-Feldstärke bei allen Sensoren nur leicht an, 0.09 V/m (S11) bis 0.22 V/m (S12) und 0.55 V/m (S9). Wie aus dem rechten Teil von Abbildung 8 hervorgeht, treten erhöhte RMS-Feldstärkewerte bei forciertem Download häufiger auf und das 75. Perzentil liegt zwischen 0.11 V/m (S11) bis 0.3 V/m (S12) und 0.84 V/m bei S9. Die Medianwerte der Peak-Messungen liegen bei forciertem Download zum Teil leicht tiefer, 0.8 V/m (S1) bis 4.01 V/m (S2) und 7.12 V/m bei S9. Das 75. Perzentil der Peak-Messung liegt zwischen 1.02 V/m (S6) bis 4.87 V/m (S12) und 8.56 V/m bei S9 meist etwas höher.

Während des Normalbetriebs am 28.08.2025 weisen vor allem die Sensoren S1-S5 und S9, S10, S12 über den ganzen Tag verteilt RMS-Feldstärkewerte auf, welche sich von der Basislinie abheben. Interessant ist auch, dass bei S2-S5, S9, S10 und S12 in den Zeitbereichen 7-9 Uhr, 12-15 Uhr und 17-20 Uhr erhöhte Feldstärkewerte erkennbar sind. Dies dürfte auf ein erhöhtes Personenaufkommen zu den Stosszeiten sowie in der Mittagspause zurückzuführen sein.

6.3 Statische Messungen vor jedem Sensor ohne forcierten Download, Einfluss Mikrozele

Ein ExpoM-RF4 wurde am 25.08.2025 ohne forcierten Download entlang der Sensorkette getragen. Vor jedem Sensorelement wurde eine kurze Dauer verweilt, siehe Abbildung 9. 5G-Beiträge wurden in drei Frequenzbereichen mit je 100 MHz Bandbreite erfasst, so dass die Bereiche den jeweiligen Mobilfunkanbietern zugeordnet werden können. Abbildung 9 zeigt, dass die Exposition gegenüber der elektrischen Feldstärke bei S1-S4 hauptsächlich von der Swisscom-Anlage ZBQB (orange Kurve) stammt. Bei S8 und S9 steigt die gemessene Feldstärke bei der grünen Kurve im Frequenzband von Sunrise stark an, vermutlich aufgrund der Nähe zu ZE444-1. Bei S9 wurde der Sensor ca. 1.5 m unterhalb der Mikrozele an den gleichen Masten montiert. Mikrozellen bis 6 W benötigen für den Betrieb keine Baugesuchseingabe und unterliegen auch nicht der vorsorglichen Emissionsbegrenzung gemäss NISV. Unter der Annahme einer Abstrahlung von 6 Watt ERP (*Effectively Radiated Power*, relativ zum Halbwellendipol mit einem Gewinn von 2.15 dBi = 1.64) kann in 1.5 m Distanz folgender Feldstärkewert abgeschätzt werden, wobei P die effektiv abgestrahlte Sendeleistung bezeichnet und d die Distanz:

11. Mai 2026

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot 1.64}}{d} = 11.5 \text{ V/m.}$$

Dabei handelt es sich um die RMS-Feldstärke. Die kurzzeitigen Spitzenwerte können folglich deutlich höher ausfallen. Dies gilt auch für Messungen im Bereich der Hauptabstrahlrichtung der Antenne, da in diesen Raumwinkeln ein höherer Antennengewinn als 2.15 dBi zu erwarten ist. Die obige Abschätzung zeigt folglich, dass in kleiner Distanz zur Mikrozele durchaus RMS-Feldstärkewerte über 10 V/m auftreten können. Der Feldstärkewert der Abschätzung ist gut mit den gemessenen Werten aus Abbildung 9 vereinbar.

Der Sensor S10 wird vermutlich von den kombinierten Immissionen von ZSEP (Swisscom, < 5 kW) und ZE444-1 (Sunrise, < 6 W) beeinflusst. S11 liegt hinter einer Baumgruppe und wird auch partiell durch ein Gebäude abgeschirmt, was in niedrigen Feldstärkewerten resultiert. Die Antennenöffnung von S11 zeigt in Richtung Limmat. Somit befindet sich ZRMI (Swisscom, < 500 W) S12 liegt im Abstrahlbereich von ZSEP (Swisscom, < 5 kW).

Über die ganze Sensorkette hinweg wurden für Antennen von Salt nur niedrige Feldstärkewerte detektiert. Gemäss [4] gibt es im untersuchten Raum Bürkliplatz-Bellevue von Salt nur eine Mikrozele ZH_7926A (Salt, <6W), welche aber nicht über 5G verfügt und somit vom Sensornetz nicht erfasst wird.

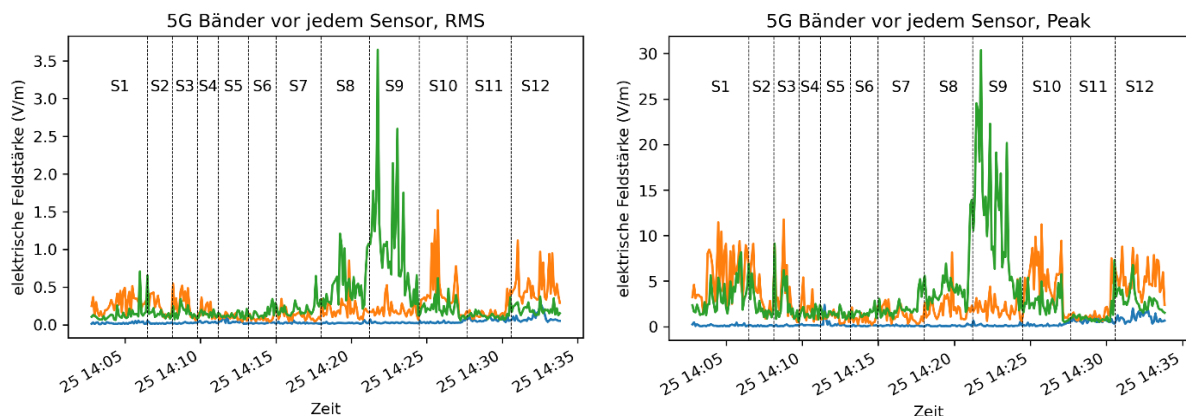


Abbildung 9: Feldstärkemessung vor jedem Sensorelement mit einem ExpoM-RF4. Die 5G-Bänder wurden mit einer Bandbreite von 100 MHz erfasst und die Mittenfrequenzen wurden so gewählt, dass die erfassten Frequenzbereiche den Mobilfunkanbietern zugeordnet werden können. Mittenfrequenz: **3475 MHz (Salt, blau)**, **3605 MHz (Swisscom, orange)**, **3735 MHz (Sunrise, grün)**. Links: RMS-Messwerte. Rechts: Peak-Messwerte.

6.4 Statische Messungen vor jedem Sensor mit forciertem Download

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wurden vor jedem Sensorelement statische Messungen mit forciertem Download während einer Dauer von ca. 2 Minuten durchgeführt. Die resultierenden RMS- und Peak-Feldstärkeverläufe für jedes Sensorelement sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt für die Messung bei der die drei verwendeten Mobiltelefone (Salt, Sunrise, Swisscom SIM) gleichzeitig aktiv waren. Der Einfluss auf sämtliche Sensoren bei forciertem Download vor einem bestimmten Sensor mit Nr. # kann durch Vergleich der Feldstärkemuster in der mit S# bezeichneten grauen vertikalen Spalte erkannt werden. Sofern keine Abschirmung oder grosse Distanzen zur Antenne vorliegen und die Mobiltelefone im 5G-Netz eingewählt sind, kann erwartet werden,

11. Mai 2026

dass die Feldstärkewerte vor dem entsprechenden Sensorelement aufgrund der Bildung eines aktiven *traffic beams* gegenüber der Basislinie ansteigen.

Bei den Sensoren S1 bis S4 ist die elektrische Feldstärke bei forciertem Download vor dem entsprechenden Sensorelement am grössten, da sich die Sensoren in nicht allzu grosser Distanz zur Mobilfunkanlage ZBQB befinden und das elektrische Feld bei Auslenkung steil in die Sensorantenne einfällt. Bei den Sensoren S5-S7 befindet sich das Feldstärkemaximum nicht mehr vor dem Sensor mit forciertem Download. Stattdessen weisen bis zu 4 nebeneinanderliegende Sensorelemente erhöhte Feldstärkewerte auf. Diese Sensoren liegen seitlich zur Hauptabstrahlrichtung von ZBQB mit Ausrichtung Bellevue. Die Öffnung der Sensorelemente liegt rechtwinklig zur Brückenkante. Je weiter die Sensoren in Richtung Bellevue liegen, desto flacher ist der Einfallwinkel des elektrischen Feldes, auch dann, wenn der Beam ausgelenkt wird. Zusätzlich führt der grössere Abstand der Sensoren zur Basisstation ZBQB zu einer räumlichen Aufweitung des Beams. Dies erklärt die Abnahme der Feldstärkewerte von S2 zu S7.

Die rote Sensorgruppe S8-S10 liegt im Einflussbereich der Mikrozelle ZE444-1 von Sunrise und der Anlagen ZBQB und ZSEP von Swisscom. Da die Hauptstrahlrichtung von ZE444-1 in Richtung Südosten liegt, sind die Feldstärkewerte bei S8 niedrig. Forcierter Download vor S9 führt auch bei S10 zu erhöhten Feldstärkewerten.

In der Gruppe S11-S12, weist S12 die höchsten Feldstärkewerte auf. S11 wird gegenüber ZSEP partiell durch ein Gebäude und durch Bäume abgeschirmt.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, verfügt Swisscom über zwei adaptive Antennen mit mittlerer Sendeleistung (< 5 kW), ZBQB und ZSEP. Aus Abbildung 10 und Abbildung 11 wird ersichtlich, dass ab Sensor S8 ein 'Handover' zwischen den Antennen stattfindet.

11. Mai 2026

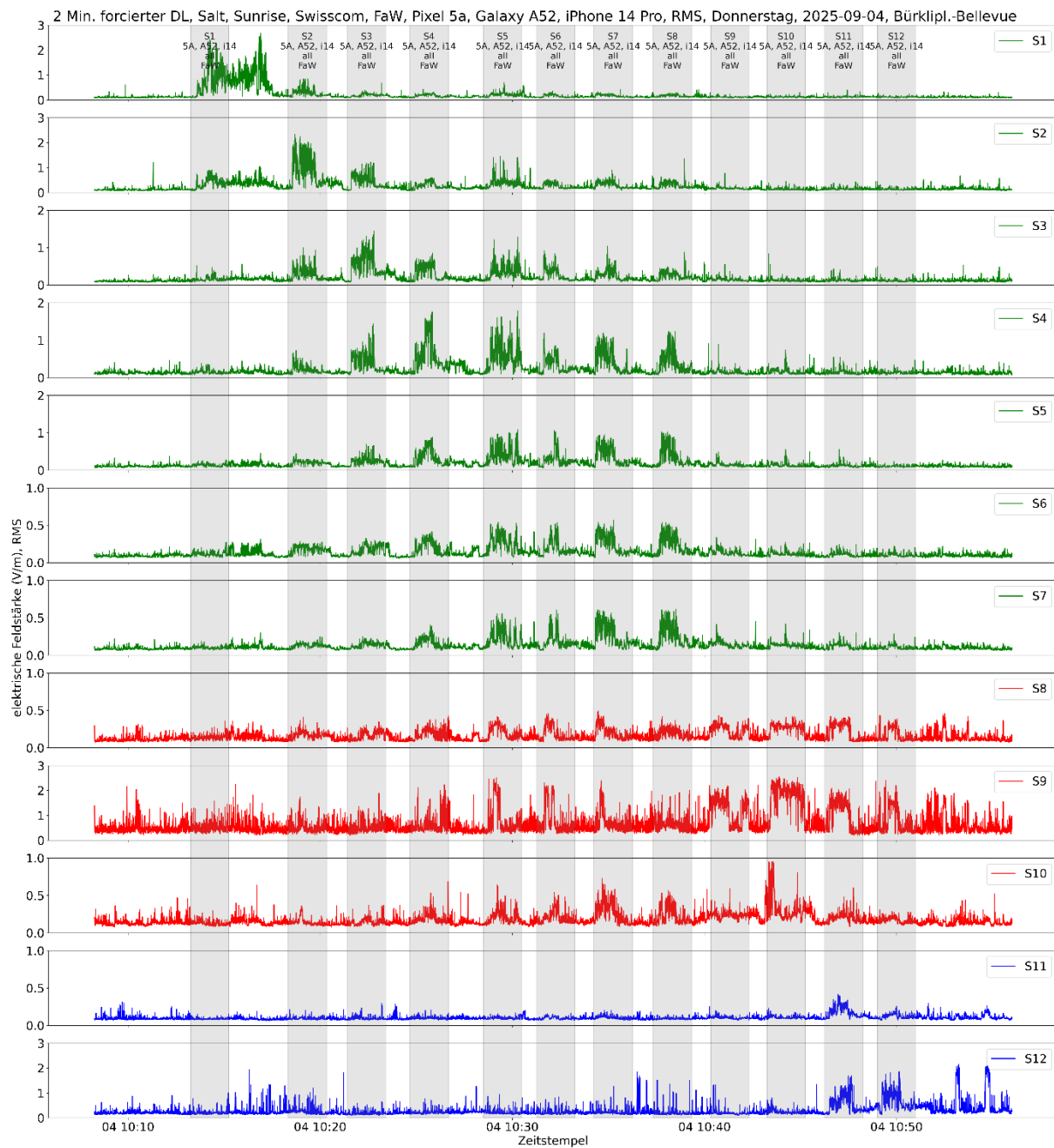


Abbildung 10: Zweiminütiger forciertes Download vor jedem Sensorelement für die horizontale Messkonfiguration. Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (RMS) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden drei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1-S7): Bürkliplatz und Quaibrücke, rote Gruppe (S8-S10): Utoquai-Haltestelle Bellevue, blaue Gruppe (S11-S12): Bellevue und Schoeckstrasse. Die grauen vertikalen Balken kennzeichnen die Messdauer des forcierten Downloadfensters. Die Informationen zur Messung sind an der Oberseite jedes Balkens angebracht und bedeuten: Forciertes Download vor Sensorelement (S#), Gerätetyp (5a: Pixel 5A, A52: Samsung Galaxy A52, i14: iPhone 14), Mobilfunknetz (all: Swisscom, Salt, Sunrise), Serverstandort (FaW). Die Messung wurde am 04.09.2025 zwischen 10 und 11 Uhr durchgeführt.

11. Mai 2026

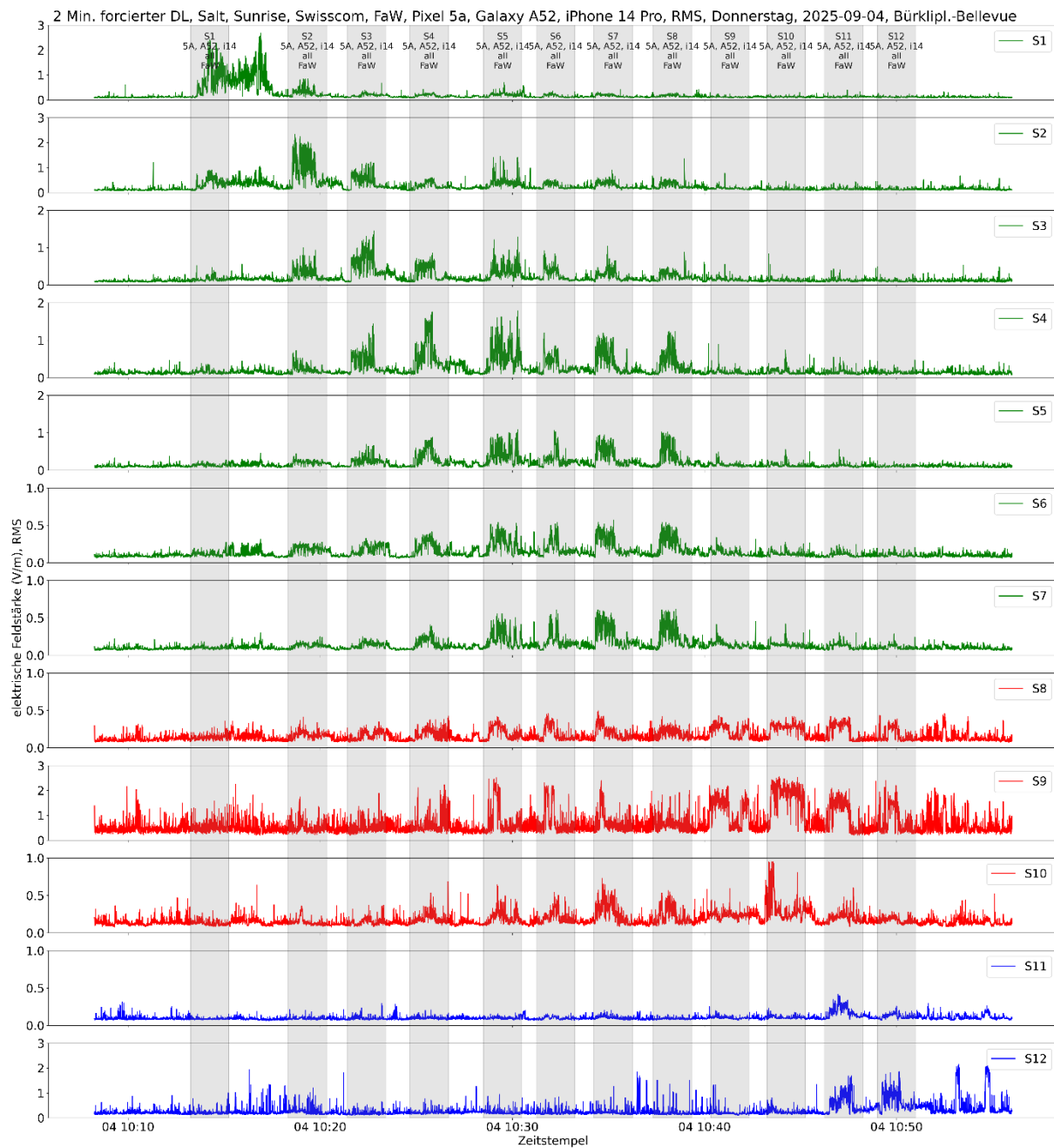


Abbildung 11: Zweiminütiger forcierter Download vor jedem Sensorelement für die horizontale Messkonfiguration.

Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (Peak) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden drei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1-S7): Bürkliplatz und Quaibrücke, rote Gruppe (S8-S10): Utoquai-Haltestelle Bellevue, blaue Gruppe (S11-S12): Bellevue und Schoeckstrasse. Die grauen vertikalen Balken kennzeichnen die Messdauer des forcierten Downloadfensters. Die Informationen zur Messung sind an der Oberseite jedes Balkens angebracht und bedeuten: Forcierter Download vor Sensorelement (S#), Gerätetyp (5a: Pixel 5a, A52: Samsung Galaxy A52, i14: iPhone 14), Mobilfunknetz (all: Swisscom, Salt, Sunrise), Serverstandort (FaW). Die Messung wurde am 04.09.2025 zwischen 10 und 11 Uhr durchgeführt.

11. Mai 2026

6.5 Routenmessungen horizontale Sensoranordnung

Abbildung 12 zeigt den Feldstärkeverlauf der Sensoren S1–S12, welcher durch Abschreiten der orangenen Messroute in Abbildung 1 entsteht. Während des Abschreitens wird mit einem Mobiltelefon auf dem Swisscom-Netz forcierter Datenverkehr erzeugt. Die Route startet bei Sensor S12 und endet bei S1. Die Grafiken in Abbildung 12 können daher mit zunehmender Zeit von unten rechts nach oben links gelesen werden. Sowohl bei den RMS wie auch bei den Peak Messungen ist eine Diagonale mit Feldstärkemaxima als Funktion des Ortes und der Zeit erkennbar. Zu Beginn sind die Feldstärkewerte bei S12 hoch und gegen Ende der Route sind die Feldstärkewerte bei S1/S2 erhöht. Dies zeigt deutlich, dass ein 'Handover' zwischen den Swisscom Antennen ZBQB und ZSEP beobachtet werden konnte. Anders als bei der Vorgängerstudie auf dem Irchel, ist das Gelände zwischen Bürkliplatz und Bellevue offener. Versorgungspfade über Reflexionen wurden daher nicht beobachtet. Die durchgehend hohe Feldstärke bei S9 ist primär durch die unmittelbare Nähe zur Sunrise-Mikrozelle zu erklären. Da diese Messung nur im Swisscom-Netz stattfand, wird das Aktivitätsmuster der Sunrise-Mikrozelle davon nicht beeinflusst. Zudem ist davon auszugehen, dass die Mikrozelle nicht adaptiv betrieben wird. Somit fällt die dynamische Komponente des Beamformings weg. Sensor S8 befindet sich hingegen in grösserer Distanz und ausserhalb bzw. ganz am Rand des Sektors der beiden Swisscom antennen, wodurch tiefere Feldstärken resultieren.

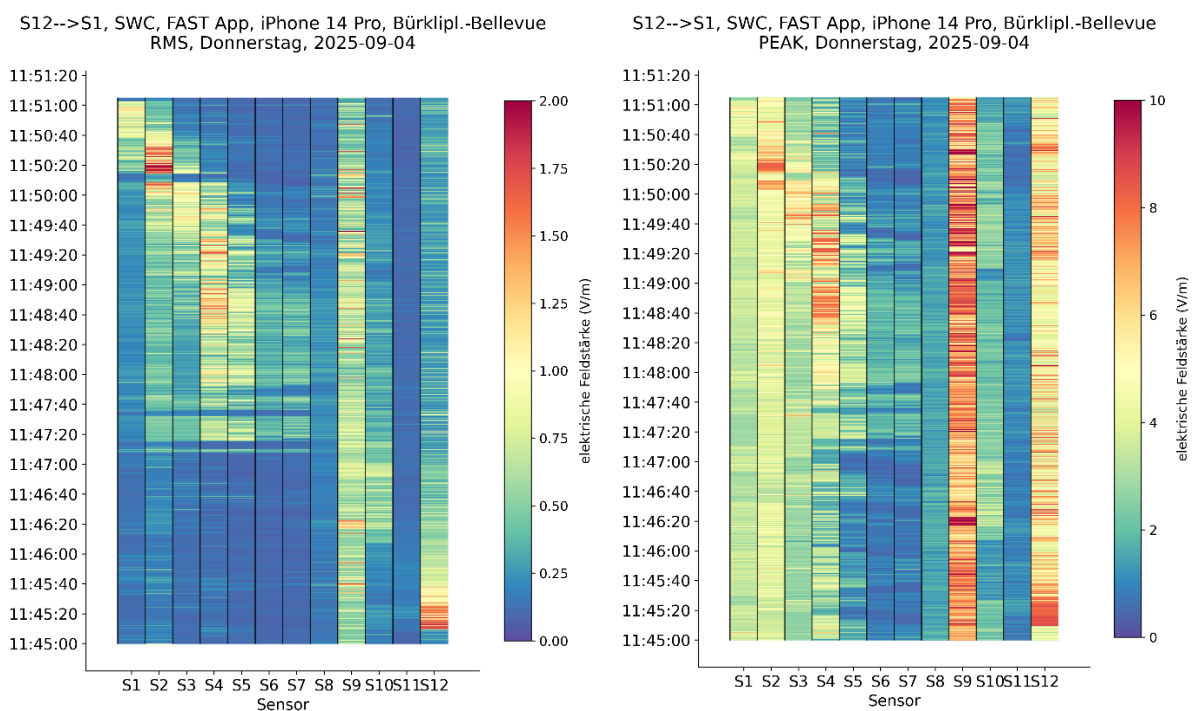


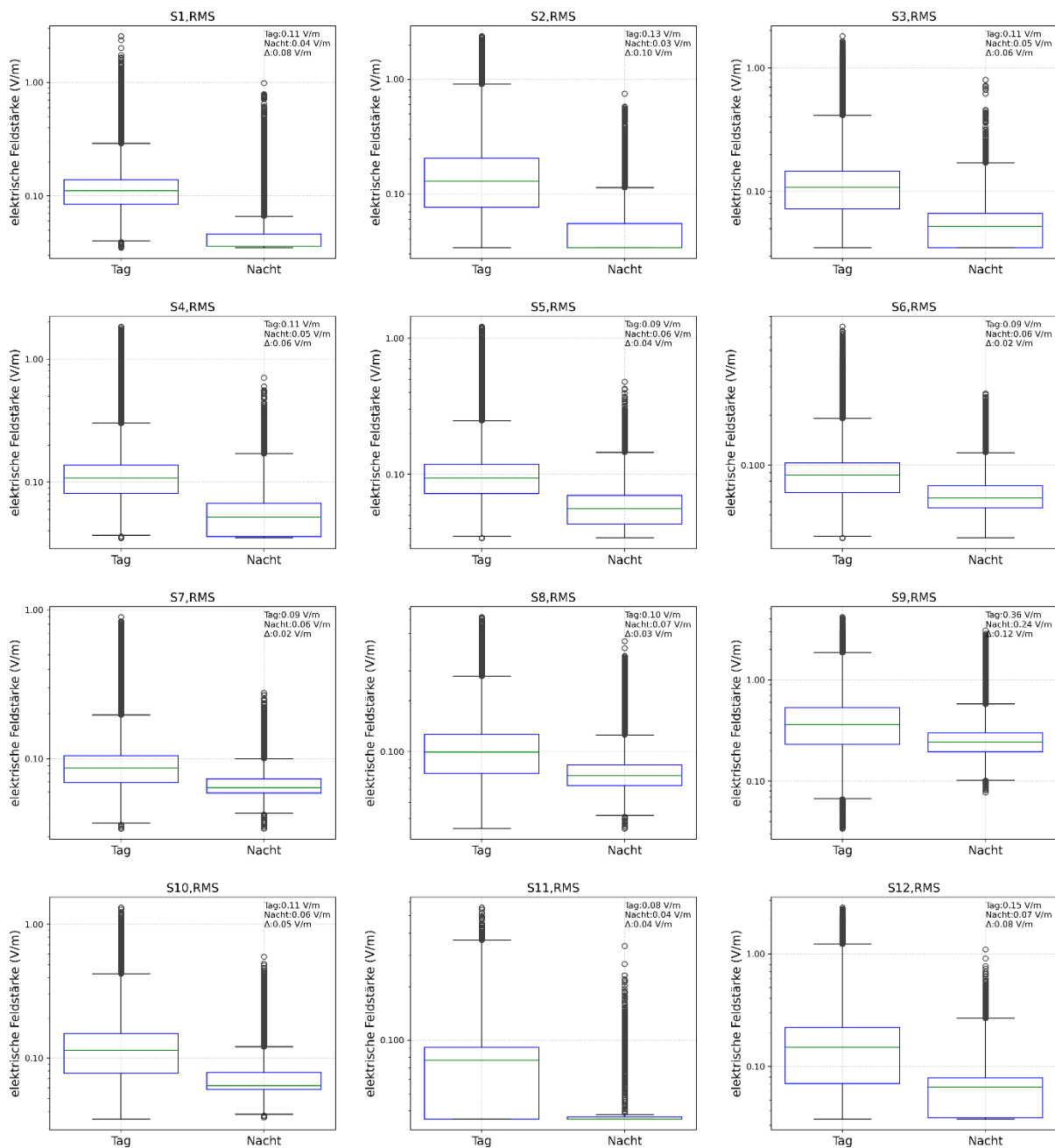
Abbildung 12: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim horizontalen Sensornetzwerk S1–S12 während forcierter Downloads entlang der orangenen Messroute in Abbildung 1. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Die Farbskalen wurden auf 2,0 V/m (RMS) und 10,0 V/m (Peak) festgesetzt. **Links:** RMS-Feldstärkewerte, **Rechts:** Peak-Feldstärkewerte. Während des Abschreitens der Messroute wurde mit einem iPhone 14 über die FAST App Daten über das Mobilfunknetz der Swisscom gestreamt. Der Download wurde um ca. 11:45 gestartet und hat eine Dauer von 6:05 Minuten.

11. Mai 2026

6.6 Nachabschaltung 5G-Bänder

Wie aus den Wasserfall-Diagrammen in Abbildung 8 hervorgeht, werden bei den Swisscom Mobilfunkantennen ZQB und ZSEP und bei der Mikrozelle ZE444-1 die 5G-Bänder in den Nachtstunden zwischen ungefähr 0 Uhr und 6 Uhr abgestellt. In der Nacht halten sich nur wenige Personen im Raum zwischen Bürkliplatz und Bellevue auf und die Abschaltung der 5G-Bänder erfolgt aus Gründen der energetischen Optimierung. Auch der Sensor S9 in der Nähe der Mikrozelle zeigt zwischen 0-5 Uhr kaum Aktivität. Eine gelegentliche Reaktivierung der 5G-Bänder ist bei der Mikrozelle ZE444-1 jedoch erkennbar.

Elektrische Feldstärke, Tag [6,24[Uhr, Nacht [0,6[Uhr, Bürklipl.-Bellevue



11. Mai 2026

Abbildung 13: Vergleich der RMS-Feldstärkewerte zwischen Tag und Nacht für jeden Sensorstandort. Als Tageszeit wird der Zeitbereich zwischen 6 und 24 Uhr definiert und die Nachtzeit reicht von 0-6 Uhr. Die Auswertung berücksichtigt nur Tage ohne forcierten Download. Die Medianwerte während des Tages, der Nacht und die Differenz zwischen den beiden Zeitbereichen ist in der rechten oberen Ecke gegeben. Die Tag/Nacht-Auswertung für die Peak-Feldstärkewerte befindet sich in Anhang III.

Abhängig vom Standort nehmen die RMS-Medianwerte in der Nacht für das 5G-Band zwischen 0.02 V/m (S6, S7) und 0.10 V/m (S2) ab. Bei S9 ist die Abnahme aufgrund der hohen Tageswerte mit 0.12 V/m am höchsten. Relativ ausgedrückt fallen die Medianwerte in der Nacht auf 19 % - 70 % des entsprechenden Werts tagsüber ab.

Bei den Peak-Werten nehmen die Medianwerte zwischen dem Tag und der Tag zwischen 0.09 V/m (S8) und 3.14 V/m (S2) ab. Die Abnahme bei der Mikrozelle in der Nähe von S9 fällt mit 0.69 V/m vergleichsweise niedrig aus. Die Medianwerte in der Nacht betragen 9-91 % der Tagesmedianwerte.

Da die Messwerte in der Nacht häufig im Bereich der Detektionslimite der Sensoren liegen, ist davon auszugehen, dass die nächtliche Abnahme der Feldstärke in Wahrheit noch stärker ausgeprägt ist.

Da die Abschaltungen der drei Mobilfunknetze nicht immer genau mit den für die Auswertung definierten Zeitfenstern (Tag = 6-24 Uhr / Nacht = 0-6 Uhr) übereinstimmen, enthalten die Nacht-Bereiche zum Teil einzelne hohe Messwerte. Dies passiert, wenn die Abschaltung erst kurz nach 00:00 Uhr stattfindet oder bereits kurz vor 6 Uhr wieder beendet wird.

11. Mai 2026

7. Parallelmessungen mit dem ExpoM-RF

7.1 Vergleichsmessungen im Frequenzband 3400 - 3800 MHz

Vom 04.-05.09.2025 wurden zusätzlich zum Sensornetzwerk während 24 Stunden drei ExpoM-RF 4 Geräte in unmittelbarer Nähe von S1, S7 und S12 installiert (Abbildung 14). Dieser Tag schliesst den Zeitraum mit ein, in dem der Grossteil der forcierten Downloadmessungen durchgeführt wurden. Ein solcher Vergleich wurde bereits im Rahmen der Vorgängerstudie am Campus Irchel durchgeführt. Die damalige Vergleichsmessung hatte aufgezeigt, dass die Reaktionszeit des Sensornetzwerks bei der Erfassung der Peakwerte insbesondere im Fall von kurzen Einzelereignissen etwas zu langsam war, um das Geschehen vollständig abzubilden. Dies hat das Upgrade des Peakdetektors der Sensoren motiviert (vgl. Kapitel 3).



Abbildung 14: Vergleichsmessung mit ExpoM-RF 4 Geräten. Diese wurden wettergeschützt jeweils direkt unterhalb von S1, S7 und S12 montiert. Links: Parallelmessung bei S1; rechts Parallelmessung bei S12.

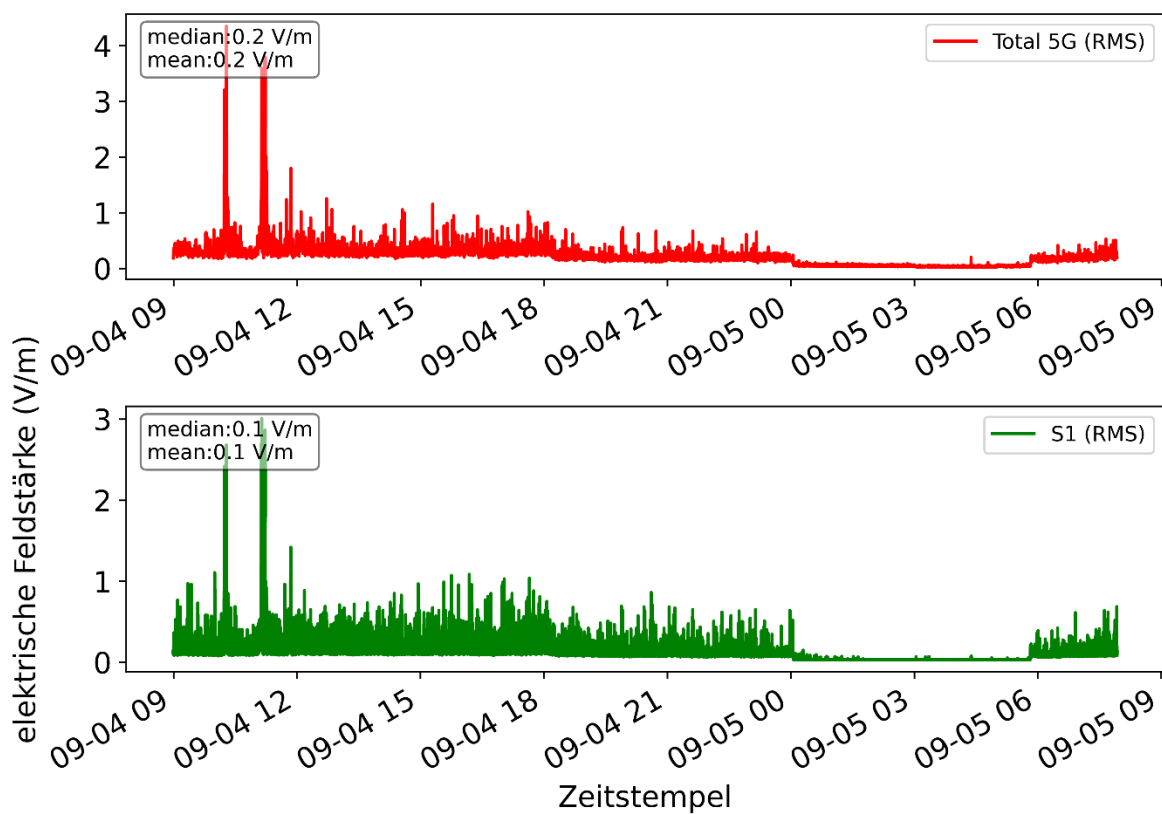
Die Grafiken in Abbildung 15 zeigen den Vergleich der Peak- und RMS Messung bei Sensor S1 mit dem nun überarbeiteten Peak-Detektor. Zwischen der Messung des ExpoM-RF und dem Sensornetzwerk bestehen noch gewisse systematische Abweichungen. Diese sind auf die unterschiedlichen Mess- und Kalibrierungsmethoden zurückzuführen: Beim Sensornetzwerk findet eine kontinuierliche, breitbandige Messung über den gesamten Frequenzbereich von 3.4 - 3.8 GHz statt. Der Kalibrierungsfaktor ist deshalb generischer und teilweise aus kabelgebundenen Messungen rechnerisch ermittelt. Beim ExpoM-RF wird die Abdeckung desselben Frequenzbereichs durch Aggregation von mehreren nacheinander durchgeführten bandselektiven Messungen erreicht. Dabei wird alle 6 Sekunden pro Band eine Messung durchgeführt. Dies führt bei den Peakwerten im Allgemeinen zu einer Überschätzung, da Immissionsspitzen aufsummiert werden, die nicht gleichzeitig stattgefunden haben. Weitere Messunsicherheiten sind durch den Einfluss der

11. Mai 2026

naheliegenden Metallstrukturen der Kandelaber auf die Antennen des ExpoM-RF zu erwarten. Die verbleibenden systematischen Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden liegen im Bereich der erwarteten Unsicherheiten. Eine genauere Aufschlüsselung der Ursachen und Einflüsse kann nur anhand von systematischen Vergleichsmessungen unter kontrollierten Laborbedingungen gemacht werden.

Im Vergleich zur Irchel-Messung ist die Übereinstimmung zwischen ExpoM-RF und Sensornetzwerk im grundsätzlichen Verlauf und Dynamik der Peakwerte nun deutlich besser und bildet auch die kürzeren und stärkeren Spitzenereignisse adäquat ab.

Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF4 und Sensor Netzwerk, RMS



11. Mai 2026

Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF4 und Sensor Netzwerk, PEAK

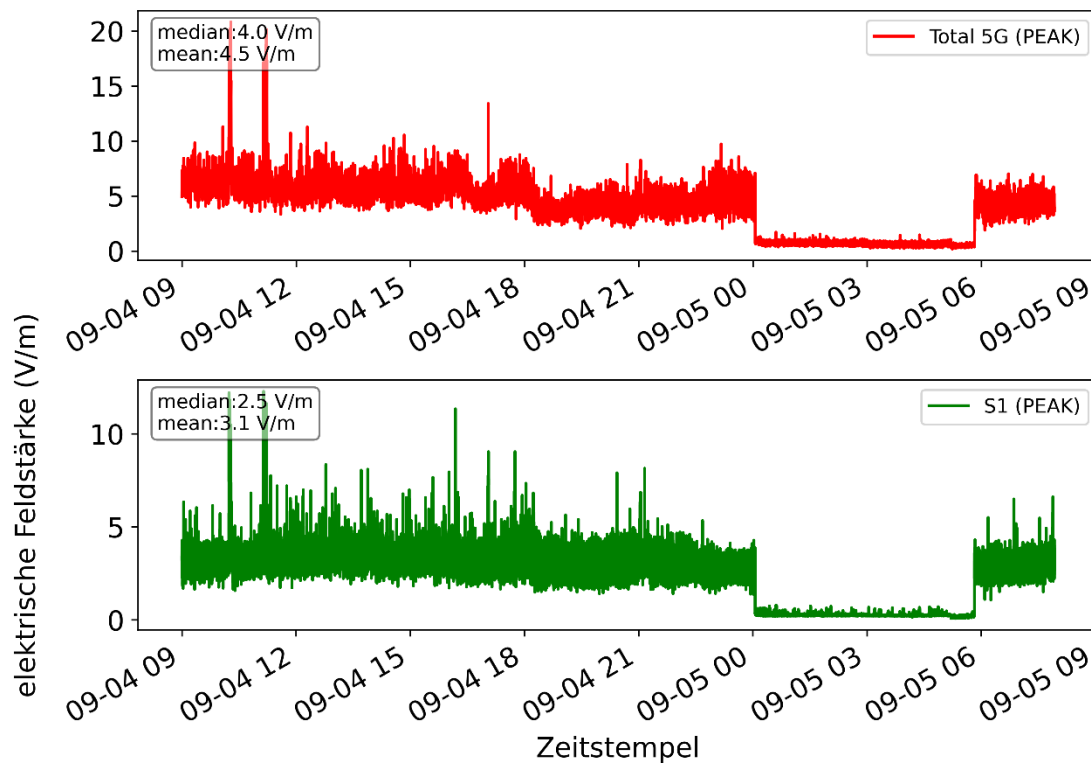


Abbildung 15: Vergleich der erfassten RMS (**oben**) und Peak (**unten**) Feldstärkewerte zwischen dem Exposimeter ExpoM-RF 4 (rot, oben) und dem Sensor S1 des Sensornetzwerks (grün, unten). Das ExpoM-RF4 und S1 befinden sich auf einem Fahnenmast in der Nähe von ZBQB. Die Vergleichsmessungen wurden am Tag der forcierten Downloads am 04.09.2025 durchgeführt (Aussschläge zwischen 9 und 12 Uhr im ersten Teil der Grafik).

7.2 Gesamtimmission und Anteile der verschiedenen Technologien im Vergleich

Die ExpoM-RF Messung wurde mit derselben Liste von 35 Frequenzbändern durchgeführt, die auch beim schweizweiten NIS-Monitoring [5] zum Einsatz kommt. Dies erlaubt es, den Beitrag von adaptiver 5G Technologie an der Gesamt-Immission und die Anteile der anderen Dienste und Technologien zu vergleichen (Abbildung 16). Für diese Auswertung wurden die gemessenen Bänder in 7 Kategorien aggregiert. Die Kategorie «5G-NR» fasst die Anteile von adaptiver 5G-Technologie von 3.4 - 3.8 GHz zusammen und die Kategorie «Gesamtfeldstärke» entspricht der Summe aller 35 Bänder.

Die zahlreichen Mobilfunk-Basisstationen in der Umgebung führen dazu, dass sich die Gesamt-Immission an den drei Messorten primär aus Beiträgen von Mobilfunk-Downlink und 5G-NR zusammensetzt. Rundfunk und WLAN sowie Immissionen der Endgeräte (Mobilfunk-Uplink) spielen eine untergeordnete Rolle. Ein Merkmal der 5G-NR Immissionen ist ihre hohe Variabilität (Verhältnis zwischen Peak und RMS-Feldstärken) und Abhängigkeit von der Nutzung bzw. Datenvolumen. Wenn man beispielsweise die RMS-Werte am Standort S1 betrachtet, fällt auf, dass der 5G-NR Anteil während der Phasen mit forciertem Download die Gesamt-Immission dominiert, ansonsten aber deutlich unter den Beiträgen der «klassischen» Mobilfunkbänder bleibt.

11. Mai 2026

In der Nacht nimmt die Aktivität und Variabilität aller Mobilfunk-Immissionen generell ab, wobei der Effekt bei 5G-NR aufgrund der Nachtabschaltungen besonders stark ausgeprägt ist.

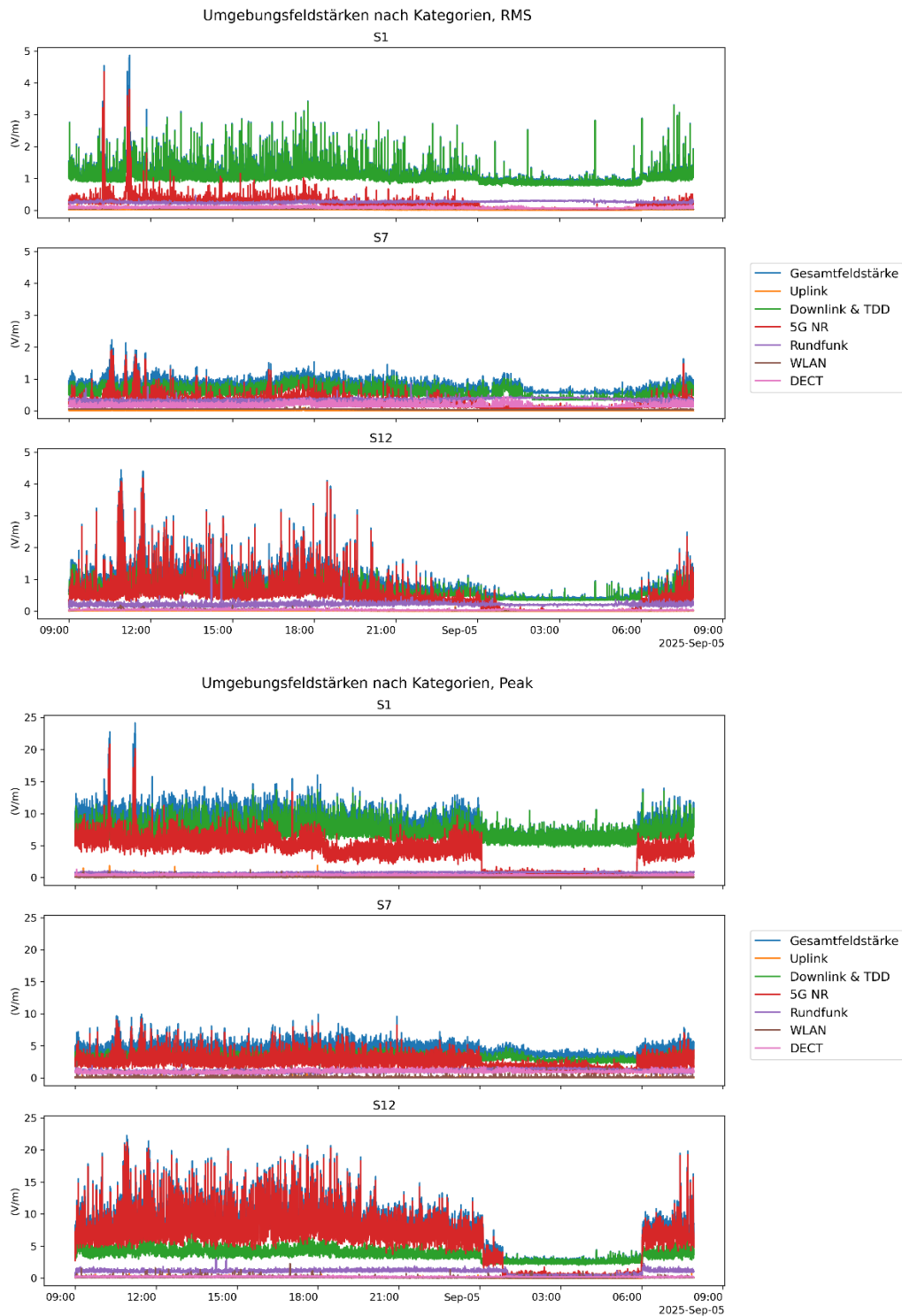


Abbildung 16: Gesamtimmission und Anteile der verschiedenen Technologien über 24h; Parallelmessung mit drei ExpoM-RF Geräten in unmittelbarer Nähe von Sensor S1, S7 und S12. RMS-Werte (**oben**) und Peakwerte (**unten**). Die Messung fand am Tag statt, an dem die forcierten Downloads durchgeführt wurden (04.09.2025). Die statistischen Kenndaten befinden sich in Tabelle 8 und Tabelle 9 des Anhangs.

11. Mai 2026

8. Schlussfolgerungen und Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das Sensornetz für das Monitoring adaptiv betriebener Antennen auch in einer stark frequentierten Umgebung bewährt hat. Mit der Überarbeitung der Sensor-Hardware konnte zudem die Qualität der Peak-Messungen deutlich verbessert werden.

Die Resultate haben gezeigt, dass auch bei einem hohen Aufkommen an Mobilfunknutzern das Erkennen von tageszeitlichen Schwankungen möglich ist. Zwischen 7-9 Uhr, 12-15 Uhr und 17-20 Uhr wurden aufgrund von Nutzerverhalten und Passantenaufkommen erhöhte Feldstärkewerte festgestellt. Während der Nachtstunden (0-6 Uhr) werden bei den Swisscom und Sunrise Antennen die 5G-Bänder abgestellt, was zu einer Senkung der Umgebungs-EMF beiträgt.

Im Vergleich zur Vorgängerstudie auf dem Campus Irchel sind die RMS und Peak-Feldstärkewerte im innerstädtischen Raum Bürkliplatz-Bellevue höher. Auch die Dynamik ist gegenüber den Messungen auf dem Irchel erhöht. Bei der Sensorgruppe Bürkliplatz sind die Werte bei S2 am höchsten und fallen entlang der Quaibrücke bis zu S7 hin ab. Der EMF-Hintergrund bei der Haltestelle Bellevue wird vor allem bei Sensor S9 durch eine Mikrozelle von Sunrise (ZE444-1) dominiert.

Auch in belebter Umgebung sind Unterschiede in der Feldstärkeverteilung zwischen Tagen mit und Tagen ohne forcierten Download erkennbar. Bei forciertem Download auf dem Swisscom-Netz lässt sich ein 'Handover' zwischen den beiden Swisscom-Antennen ZBQB (Bürkliplatz) und ZSEP (Utoquai) beobachten. Forcierte Downloads auf dem Sunrise-Netz in der Nähe der Mikrozelle ZE444-1 führen bei Sensor S9 zu hohen Feldstärkewerten. Das Auslenken der Beams in Zonen mit erhöhtem Mobilfunkbedarf ist bei Routenmessungen im Swisscom-Netz deutlich erkennbar, wie auch der 'Handover' zwischen den Swisscom Antennen.

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass das 5G-Netz selbst in solchen stark frequentierten Umgebungen aktuell mehrheitlich noch deutlich unterhalb seiner Kapazitätsgrenze operiert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass sich die Aktivitätsmuster mit der weiteren Verbreitung und Nutzung von 5G-fähigen Smartphones verändern werden. Zudem befindet sich das 5G Mobilfunknetz aktuell in einer Übergangsphase vom sogenannten 'non-standalone' (NSA) in den 'standalone' (SA) Betrieb. Es ist schwer vorauszusagen, welche Auswirkungen all diese Entwicklungen auf die Immissionssituation haben werden. Grundsätzlich deutet aber alles auf eine weitere Zunahme der Variabilität und Dynamik der Immissionsfeldstärken aufgrund der Verschiebung hin zu gezielteren und bedarfsgesteuerten Aussendungen bei den neuen Mobilfunkstandards.

11. Mai 2026

9. Literaturverzeichnis

- [1] D. Haas, M. Zahner, T. Ziegler, und J. Fröhlich, «Monitoring adaptiver Antennen mittels eines räumlichen Sensornetzes», 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/umwelt-natur/elektrosmog-und-nichtionisierende-strahlung/bericht-adaptives-antennen-sensornetzwerk-final-20241205.pdf>
- [2] M. Zahner, D. Haas, T. Ziegler, und J. Fröhlich, «Sensor Network for the Assessment of Spatio-temporal Dynamics of the Environmental Exposure from Adaptive Antennas», gehalten auf der ICEAA - IEEE APWC 2025, Palermo, 2025.
- [3] M. Zahner, D. Haas, T. Ziegler, und J. Fröhlich, «Evaluation of Spatiotemporal Dynamics of Adaptive Antennas using a Low-cost Sensor Network», in *2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, März 2025, S. 1–5. doi: 10.23919/Eu-CAP63536.2025.10999855.
- [4] BAKOM, «Standorte von Sendeanlagen». 30. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/frequenzen-antennen/standorte-von-sendeanlagen.html>
- [5] T. Ziegler u. a., «Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung Jahresbericht 2024», Projektkonsortium SwissNIS, 2025.

11. Mai 2026

Anhang

I Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messwerte der horizontalen Sensoranordnung

Tabelle 2: Statistische Kenndaten der Feldstärkeverteilung der RMS-Messung gruppiert nach Sensor in der horizontalen Anordnung. Das fünfzigste Perzentil entspricht dem Median. Die untersuchte Datengesamtheit umfasst 4'810'589 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	0.11	0.15	0.12	0.11	0.1	0.09	0.09	0.1	0.42	0.12	0.07	0.16
std	0.06	0.12	0.08	0.07	0.05	0.03	0.04	0.05	0.31	0.07	0.03	0.14
min	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03
5%	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
25%	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.23	0.07	0.04	0.07
50%	0.11	0.12	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.1	0.35	0.11	0.08	0.14
75%	0.14	0.2	0.14	0.14	0.12	0.1	0.1	0.12	0.52	0.15	0.09	0.22
95%	0.21	0.35	0.24	0.22	0.17	0.14	0.14	0.2	1.02	0.24	0.12	0.38
max	2.55	2.37	1.8	1.84	1.22	0.69	0.89	0.62	4.16	1.33	0.56	2.58

Tabelle 3: Statistische Kenndaten der Feldstärkeverteilung der Peak-Messung gruppiert nach Sensor in der horizontalen Anordnung. Das fünfzigste Perzentil entspricht dem Median. Die untersuchte Datengesamtheit umfasst 4'810'589 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	2.55	2.89	2.43	2.12	1.14	0.73	0.74	1.02	5.95	1.4	0.64	2.78
std	1.42	1.57	1.28	1.31	0.58	0.28	0.36	0.32	2.61	0.82	0.34	1.82
min	0.07	0.05	0.09	0.1	0.05	0.06	0.07	0.06	0.08	0.05	0.08	0.13
5%	0.21	0.32	0.35	0.32	0.48	0.36	0.28	0.41	0.22	0.27	0.16	0.21
25%	1.6	1.42	0.96	0.92	0.64	0.53	0.46	0.87	4.82	0.63	0.38	1.94
50%	3.1	3.46	2.84	1.99	1.06	0.73	0.71	1.04	5.65	1.36	0.62	2.78
75%	3.57	3.79	3.16	3.27	1.57	0.86	0.91	1.2	7.67	1.94	0.86	3.77
95%	4.11	4.7	4.03	3.79	2.04	1.24	1.44	1.52	10.04	2.83	1.24	6.11
max	12.44	11.14	13.89	10.87	6.42	3.96	4.06	4.08	19.57	6.7	4.58	13.72

11. Mai 2026

II Statistische Kennwerte für den Normalbetrieb und den forcierten Download

Tabelle 4: Statistische Kenndaten der S1-S12 RMS-Feldstärkewerte am 28.08.2025 während einer Periode des Normalbetriebs zwischen 08:45 und 12:43. 'Avg' steht für den Mittelwert der Stichprobe und 'std' für die Standardabweichung. 'Min' und 'max' bezeichnen die kleinsten und grössten aufgetretenen Feldstärkewerte. Die Prozentwerte bezeichnen die entsprechenden Quantile der Verteilung. Der Interquartilsabstand (IQR) gibt die Spannweite der mittleren 50 % der Messdaten an. Anzahl Messpunkte: 54'528.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	0.12	0.17	0.13	0.14	0.12	0.1	0.1	0.12	0.55	0.15	0.09	0.22
std	0.03	0.08	0.06	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.28	0.06	0.02	0.13
min	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.14	0.07	0.06	0.08
5%	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.28	0.09	0.07	0.12
25%	0.1	0.12	0.1	0.1	0.09	0.08	0.08	0.09	0.38	0.12	0.08	0.15
50%	0.11	0.15	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	0.11	0.47	0.14	0.09	0.18
75%	0.12	0.19	0.14	0.16	0.13	0.11	0.11	0.13	0.64	0.17	0.1	0.24
95%	0.18	0.3	0.23	0.25	0.18	0.15	0.15	0.2	1.13	0.25	0.13	0.43
max	0.73	1.46	1.17	1.31	0.93	0.51	0.64	0.62	2.83	1.07	0.38	1.93
IQR	0.03	0.08	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.26	0.05	0.02	0.08

Tabelle 5: Statistische Kenndaten der S1-S12 Peak-Feldstärkewerte am 28.08.2025 während einer Periode des Normalbetriebs zwischen 08:45 und 12:43. 'Mean' steht für den Mittelwert der Stichprobe und 'std' für die Standardabweichung. 'Min' und 'max' bezeichnen die kleinsten und grössten aufgetretenen Feldstärkewerte. Die Prozentwerte bezeichnen die entsprechenden Quantile der Verteilung. Der Interquartilsabstand (IQR) gibt die Spannweite der mittleren 50 % der Messdaten an. Anzahl Messpunkte: 54'528.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	3.39	3.5	3.08	2.6	1.31	0.9	0.87	1.1	6.82	1.82	0.86	3.58
std	0.8	0.52	0.57	1.07	0.55	0.28	0.37	0.22	1.62	0.69	0.26	1.2
min	1.25	1.11	0.75	0.54	0.23	0.33	0.26	0.32	3.31	0.27	0.25	1.82
5%	2.09	2.86	2.24	1.31	0.64	0.51	0.41	0.79	4.58	0.77	0.51	2.38
25%	2.64	3.25	2.76	1.66	0.87	0.73	0.59	0.97	5.61	1.32	0.69	2.78
50%	3.61	3.46	3.08	2.59	1.27	0.87	0.82	1.08	6.54	1.81	0.82	3.18
75%	4.03	3.66	3.33	3.25	1.58	1.02	1.05	1.21	7.91	2.25	0.99	3.98
95%	4.45	4.23	3.96	4.34	2.28	1.43	1.55	1.5	9.74	3.02	1.33	6.3
max	8.15	8.56	8.72	10.87	5.68	3.33	3.31	3.36	15.51	6.7	2.95	9.98
IQR	1.39	0.4	0.58	1.6	0.71	0.29	0.47	0.23	2.3	0.93	0.3	1.21

11. Mai 2026

Tabelle 6: Statistische Kenndaten der S1-S12 RMS-Feldstärkewerte am 04.09.2025 während einer Periode des forcierten Downloads zwischen 08:45 und 12:43. 'Avg' steht für den Mittelwert der Stichprobe und 'std' für die Standardabweichung. 'Min' und 'max' bezeichnen die kleinsten und grössten aufgetretenen Feldstärkewerte. Die Prozentwerte bezeichnen die entsprechenden Quantile der Verteilung. Der Interquartilsabstand (IQR) gibt die Spannweite der mittleren 50 % der Messdaten an. Anzahl Messpunkte: 54'735.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	0.19	0.25	0.19	0.21	0.17	0.13	0.13	0.17	0.74	0.19	0.1	0.31
std	0.22	0.23	0.16	0.22	0.14	0.07	0.08	0.08	0.49	0.1	0.03	0.25
min	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.18	0.07	0.06	0.1
5%	0.1	0.1	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.32	0.1	0.08	0.15
25%	0.12	0.14	0.11	0.11	0.1	0.09	0.09	0.11	0.42	0.13	0.08	0.18
50%	0.13	0.18	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.14	0.55	0.16	0.09	0.22
75%	0.18	0.26	0.18	0.19	0.17	0.14	0.14	0.21	0.84	0.21	0.11	0.3
95%	0.34	0.6	0.49	0.7	0.48	0.29	0.28	0.33	1.93	0.4	0.17	0.82
max	3.01	2.4	1.84	1.87	1.22	0.63	0.76	0.57	3.16	1.04	0.46	2.15
IQR	0.06	0.12	0.07	0.08	0.07	0.05	0.05	0.1	0.41	0.08	0.03	0.12

Tabelle 7: Statistische Kenndaten der S1-S12 Peak-Feldstärkewerte am 04.09.2025 während einer Periode des forcierten Downloads zwischen 08:45 und 12:43. 'Mean' steht für den Mittelwert der Stichprobe und 'std' für die Standardabweichung. 'Min' und 'max' bezeichnen die kleinsten und grössten aufgetretenen Feldstärkewerte. Die Prozentwerte bezeichnen die entsprechenden Quantile der Verteilung. Der Interquartilsabstand (IQR) gibt die Spannweite der mittleren 50 % der Messdaten an. Anzahl Messpunkte: 54'735.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
avg	3.37	4.07	3.06	2.84	1.43	0.9	0.9	1.28	7.24	1.9	0.9	4.32
std	0.84	0.72	0.78	1.31	0.76	0.37	0.44	0.28	1.85	0.63	0.28	1.51
min	1.58	0.94	0.78	0.44	0.24	0.29	0.22	0.37	3.46	0.34	0.25	2.07
5%	2.64	3.12	2.31	1.39	0.61	0.48	0.41	0.89	4.64	0.94	0.5	2.83
25%	3	3.66	2.66	1.72	0.89	0.67	0.59	1.09	5.68	1.45	0.7	3.23
50%	3.25	4.01	2.88	2.83	1.31	0.8	0.8	1.24	7.12	1.86	0.86	3.82
75%	3.52	4.45	3.21	3.46	1.66	1.02	1.07	1.44	8.56	2.3	1.07	4.87
95%	4.11	5.03	4.61	5.25	3.06	1.72	1.83	1.8	10.42	3	1.42	7.67
max	12.29	9.98	9.05	10.74	5.79	2.99	3.4	3.29	16.9	5.12	2.9	11.92
IQR	0.52	0.79	0.56	1.74	0.77	0.35	0.48	0.35	2.88	0.84	0.36	1.64

11. Mai 2026

III Nachtabschaltung 5G-Bänder Nacht

Elektrische Feldstärke, Tag [6,24[Uhr, Nacht [0,6[Uhr, Bürklipl.-Bellevue

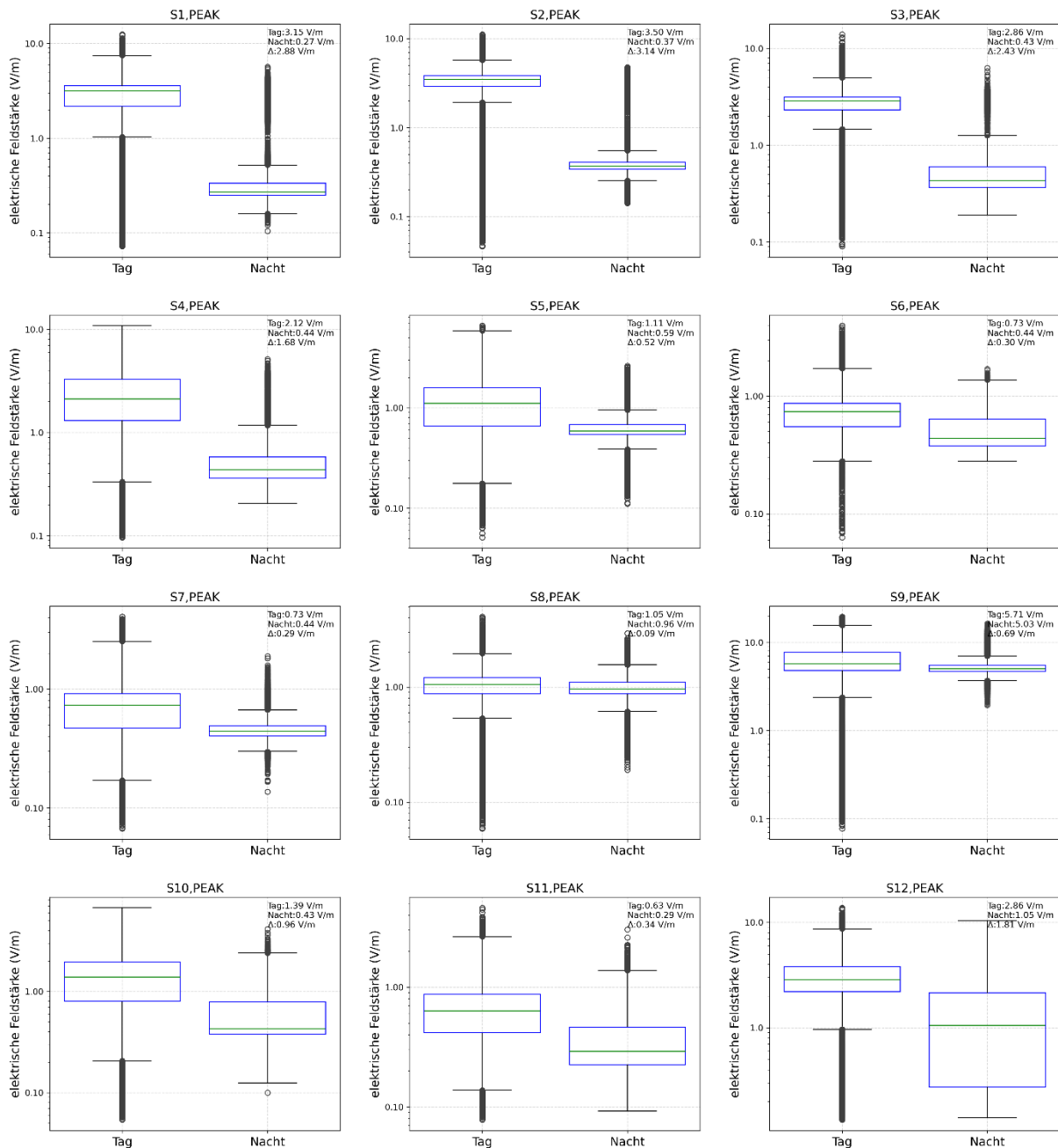


Abbildung 17: Vergleich der Peak-Feldstärkewerte zwischen Tag und Nacht für jeden Sensorstandort. Als Tageszeit wird der Zeitbereich zwischen 6 und 24 Uhr definiert und die Nachtzeit reicht von 0-6 Uhr. Die Auswertung berücksichtigt nur Tage ohne forcierten Download. Die Medianwerte während des Tages, der Nacht und die Differenz zwischen den beiden Zeitbereichen ist in der rechten oberen Ecke gegeben.

11. Mai 2026

IV ExpoM-RF Messung: Stündliche Median-Umgebungsfeldstärken nach Kategorien

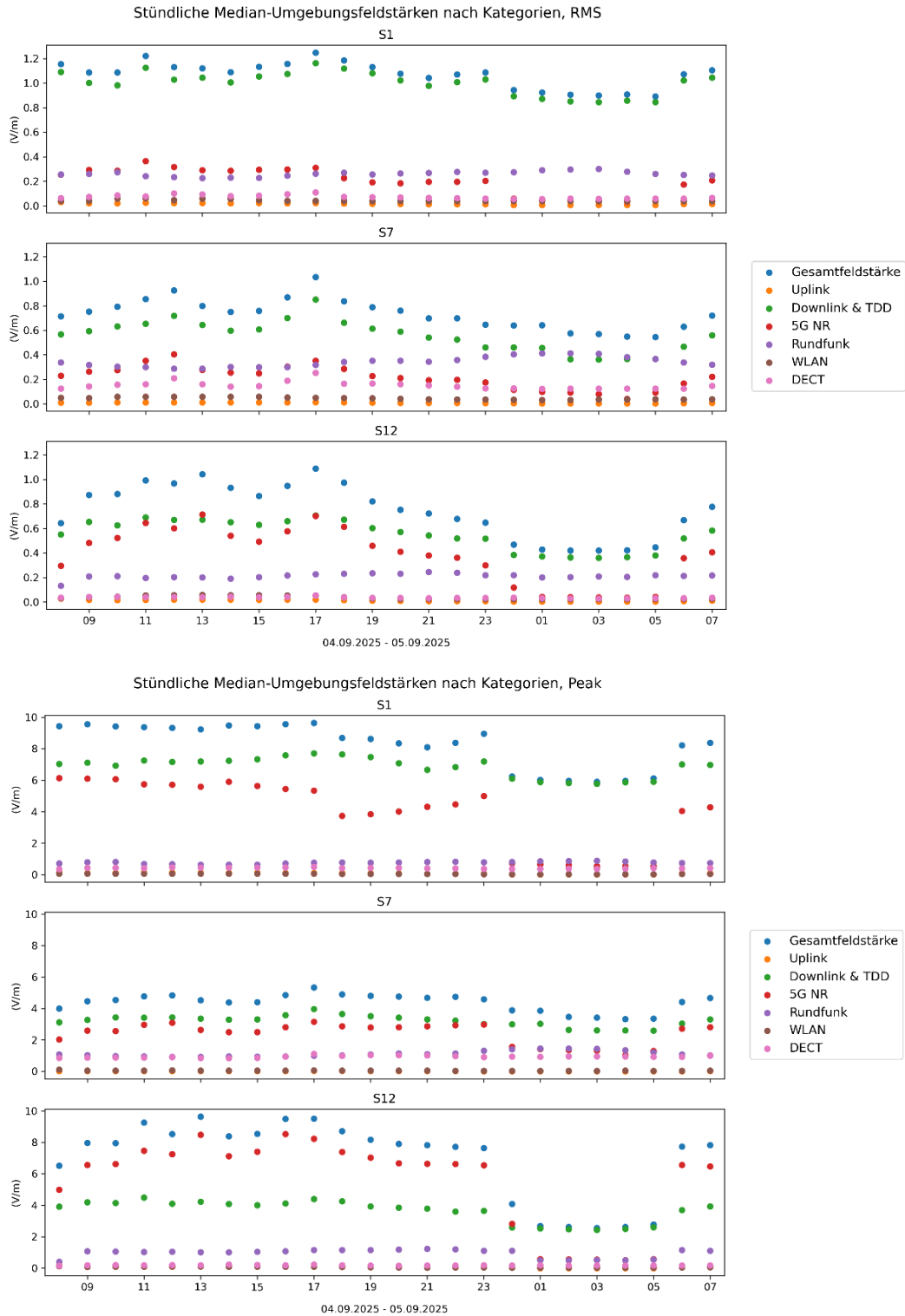


Abbildung 18: ExpoM-RF Messung: Stündliche Median-Umgebungsfeldstärken nach Kategorien; RMS-Feldstärken (oben), Peak-Feldstärken (unten).

11. Mai 2026

V Statistische Daten der ExpoM-RF Messung (RMS-Werte)

Tabelle 8: Statistische Kenndaten der ExpoM-RF Messung für die Standorte S1, S7 und S12.

S1 RMS	Gesamt- feldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	0.87	0.01	0.81	0.04	0.22	0.04	0.05
10%	0.97	0.01	0.91	0.14	0.24	0.04	0.06
25%	1.08	0.02	1.01	0.21	0.26	0.04	0.07
50%	1.18	0.02	1.11	0.28	0.28	0.04	0.10
75%	1.38	0.03	1.30	0.36	0.30	0.06	0.12
90%	0.06	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.00
max	4.87	0.75	3.40	4.35	0.55	0.39	0.42

S7 RMS	Gesamt- feldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	0.56	0.01	0.36	0.08	0.26	0.03	0.12
10%	0.63	0.01	0.46	0.14	0.29	0.04	0.12
25%	0.72	0.01	0.56	0.21	0.34	0.04	0.14
50%	0.86	0.01	0.69	0.30	0.38	0.05	0.21
75%	1.00	0.02	0.81	0.42	0.41	0.06	0.27
90%	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.00
max	2.22	0.41	1.27	1.91	0.87	0.21	0.52

S12 RMS	Gesamt- feldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	0.43	0.00	0.37	0.04	0.17	0.02	0.03
10%	0.62	0.01	0.49	0.26	0.20	0.03	0.03
25%	0.79	0.01	0.58	0.43	0.21	0.03	0.04
50%	0.96	0.02	0.68	0.58	0.24	0.05	0.04
75%	1.19	0.03	0.83	0.80	0.27	0.06	0.06
90%	0.04	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
max	4.44	0.34	1.89	4.18	2.10	0.19	0.39

11. Mai 2026

VI Statistische Daten der ExpoM-RF Messung (Peak-Werte)

Tabelle 9: Statistische Kenndaten der ExpoM-RF Messung für die Standorte S1, S7 und S12.

S1 Peak	Gesamtfeldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	5.61	0.01	5.39	0.58	0.60	0.02	0.33
10%	7.15	0.04	6.21	2.63	0.68	0.03	0.36
25%	8.50	0.08	6.89	4.35	0.77	0.04	0.42
50%	9.48	0.11	7.73	5.52	0.83	0.06	0.48
75%	10.51	0.15	8.75	6.43	0.89	0.11	0.54
90%	0.09	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00
max	24.15	3.03	14.25	20.83	2.24	3.97	2.99

S7 Peak	Gesamtfeldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	3.38	0.01	2.60	1.23	0.79	0.03	0.76
10%	3.89	0.01	2.93	1.73	0.93	0.04	0.86
25%	4.47	0.02	3.26	2.49	1.07	0.05	0.95
50%	4.99	0.04	3.61	3.18	1.28	0.09	1.06
75%	5.51	0.06	3.91	3.82	1.43	0.18	1.26
90%	0.06	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
max	11.67	2.81	9.68	10.11	2.13	2.54	5.53

S12 Peak	Gesamtfeldstärke	Uplink	Downlink & TDD	5G NR	Rundfunk	WLAN	DECT
min	2.63	0.01	2.45	0.56	0.51	0.03	0.15
10%	6.52	0.05	3.20	5.16	0.94	0.04	0.17
25%	7.78	0.07	3.85	6.48	1.06	0.06	0.18
50%	9.02	0.10	4.33	7.79	1.21	0.10	0.22
75%	10.85	0.14	4.88	9.89	1.34	0.18	0.29
90%	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
max	22.26	2.67	15.25	21.22	4.50	2.29	3.29