

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

Im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, UR, ZG, ZH und des BAFU
A6930
5. Dezember 2024

Impressum

Auftraggeber:

Kanton Aargau

Kanton Basel-Stadt

Kanton Basel-Land

Kanton Bern

Kanton Freiburg

Kanton Uri

Kanton Zug

Kanton Zürich

BAFU, Bundesamt für Umwelt, UVEK

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 1.0	15.10.2024	dh,zi,mz,jf	Schlussbericht	Auftraggeber
V 1.1	05.12.2024	dh,zi,mz,jf	Schlussbericht korrigiert	Auftraggeber

Inhalt

1. Projektübersicht.....	4
2. Detailkonzept und Standortevaluation.....	5
2.1 Standort Universität Irchel.....	5
2.2 Infos zur Antenne.....	6
3. Anordnung der Sensoren.....	7
3.1 Anordnung – Szenario Horizontal.....	7
3.2 Anordnung – Szenario Vertikal.....	10
4. Messungen mit forciertem Download.....	11
4.1 Werkzeuge und Methoden.....	11
4.2 Statische Messungen.....	11
4.3 Routenmessungen (Anordnung horizontal).....	11
4.4 Messungen Anordnung vertikal.....	12
5. Messprogramm.....	13
6. Entwicklung der Low-Cost Sensoren.....	13
6.1 Übersicht.....	14
6.2 Messgrößen und Elektronik.....	15
6.3 Abweichungen der Messgrößen.....	16
6.3.1 Peakwert: Mindest-Ereignisdauer.....	16
6.3.2 RMS-Abweichung und Crest-Faktor.....	17
6.4 Ausleseeinheit und Software.....	18
6.5 Integrierte Messantenne.....	18
6.6 Kalibrierung, Dynamikbereich und Streuung.....	19
6.7 Technische Daten.....	20
7. Datenanalyse horizontale Anordnung.....	21
7.1 Horizontale Feldstärkeverteilung.....	21
7.2 Vergleich forcierter Download-Normalbetrieb horizontales Sensornetzwerk.....	22
7.3 Statische Messungen vor jedem Sensor in der horizontalen Sensoranordnung.....	24
7.4 Routenmessungen horizontale Sensoranordnung.....	28
7.4.1 Routenmessung 1.....	28
7.4.2 Routenmessung 2.....	29
7.4.3 Routenmessung 3.....	30
7.4.4 Linienmessung 4.....	30
8. Datenanalyse vertikale Anordnung.....	32
8.1 Vertikale Feldstärkenverteilung.....	32
8.2 Statische Messungen vor jedem Sensor in der vertikalen Sensoranordnung.....	33
8.3 Routenmessungen vertikale Sensoranordnung.....	36
8.3.1 Routenmessung Treppe.....	36

8.3.2	Abseilen Mobiltelefon	37
8.3.3	Horizontales Abschreiten der Balkone auf unterschiedlichen Höhen	38
9.	Power Locking	40
10.	Validierungsmessungen mit dem ExpoM-RF	41
11.	Schlussfolgerungen und Ausblick	43
12.	Literaturverzeichnis	44
I	Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messwerte der horizontalen Sensoranordnung	45
II	Statistische Kennwerte für den Normalbetrieb und den forcierten Download	46
III	Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messwerte der vertikalen Sensoranordnung	48
IV	Statische Messungen vor jedem Sensor in der vertikalen Sensoranordnung, Peak-Werte	49
V	Validierungsmessungen mit dem ExpoM-RF	50

1. Projektübersicht

Im Auftrag der Kantone AG, BE, BS, BL, FR, UR, ZG, ZH und des BAFU führen die Grolimund und Partner AG und die Fields at Work GmbH eine Studie über das «Monitoring adaptiv betriebener Mobilfunkantennen mittels eines räumlichen Sensornetzwerks» durch. Das Hauptziel der Studie liegt in der Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Dynamik von adaptiven 5G-Antennen. Für die Messungen wird ein neuartiges Sensornetzwerk entwickelt, welches die simultane Erfassung mehrerer 5G-Beams ermöglicht. Neben Sichtbarmachung der räumlichen und zeitlichen Variabilität von 5G-Beams, bietet dieses Pilotprojekt auch die Möglichkeit, die effektive Belastung an mehreren Orten einer Fassade zu erfassen, ohne dabei Hochrechnungen zu verwenden. Zusätzlich kann durch die Erzeugung von stimuliertem 5G-Datenverkehr das Power-Locking der Antennen überprüft werden. Die Sensoren sollen an einem stark frequentierten Ort horizontal und vertikal entlang einer Gebäudefassade installiert werden. Somit kann die Beamdynamik auf Passantenhöhe wie auch über mehrere Stockwerke hinweg verfolgt werden.

2. Detailkonzept und Standortevaluation

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.

Idealerweise besteht zwischen dem Sensornetzwerk und der Mobilfunkantenne eine direkte Sichtverbindung in Abwesenheit von dämpfenden oder reflektierenden Strukturen. Um eine ausreichend hohe Beamdynamik zu erzielen, sollte die Messumgebung in einer belebten Umgebung liegen. Der horizontalen Distanz zwischen Antenne und Sensorstandort wird eine grosse Bedeutung beigemessen. Um ein übermässiges horizontales Aufweiten des adaptiven Beams zu verhindern, sollte diese Distanz unter 100 m liegen. Auf der anderen Seite ist ein Mindestabstand zwischen Antenne und Fassade einzuhalten, damit die Beams in vertikaler Richtung nicht unter einem allzu steilen Winkel gesehen werden, was eine starke Signaldämpfung zur Folge hätte.

Die Standortauswahl für die Messung ist mit organisatorischen Anforderungen verknüpft. Der Gebäudeeigentümer muss der Sensormontage an der Fassade zustimmen und die Fassade muss sich für eine Montage eignen. Der Messort sollte gegenüber Witterung geschützt sein und Schutz vor Vandalismus bieten. Ein zentraler Aspekt stellt auch die Erreichbarkeit der Installation für Wartungsarbeiten dar. Eine Stromzufuhr wäre vorteilhaft.

Für die Studie muss die Antenne mit der NR 5G Technologie im Frequenzbereich 3400–3800 MHz betrieben werden und über adaptives Beamforming verfügen. Für die Studie werden vorzugsweise nur Antennen mit 32 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 [1]. 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. Insgesamt wurden etwa 60 Standorte aufgrund ihrer Messumgebung berücksichtigt und auf ihre technische Eignung hin überprüft. Es hat sich herausgestellt, dass drei Standorte besonders gut für das adaptive Beam-Monitoring geeignet sind.

Die Antenne mit der Bezeichnung ZHUI auf dem Gelände des Campus Irchel der Universität Zürich eignet sich aufgrund der räumlichen Anordnung der umliegenden Gebäude für eine Messung. Eine weitere geeignete Mobilfunkanlage mit der Bezeichnung BABS befindet sich auf dem Trafoplatz in Baden. In Bern erfüllt eine Antenne mit der Bezeichnung BMST die Anforderungen an die Messumgebung, sowie die Technik.

Es wurde eine Begehung der Standorte vorgenommen. Dabei hat sich der Standort Universität Irchel als besonders geeignet herausgestellt. Die Gebäudeeigentümer haben der Montage der Sensoren zugestimmt und waren ausserordentlich hilfsbereit, was an dieser Stelle gerne verdankt wird.

2.1 Standort Universität Irchel

Der Standort Universität Irchel wurde ausgewählt, da er annähernd den Idealfall für diese Studie darstellt. Die adaptive Antenne ist zentral im Campus gelegen, wobei an vielen Stellen der öffentlich zugänglichen Bereiche am Boden eine direkte Sichtverbindung zur Antenne besteht. Von der Antenne

werden zudem mehrere Gebäudefassaden angestrahlt, was für die Anordnung der Sensoren ideal ist. Dabei steht das Gebäude Y17 (Pharmakologie und Toxikologie) beinahe senkrecht zur Hauptabstrahlrichtung des einen Antennensektors (Abbildung 1).

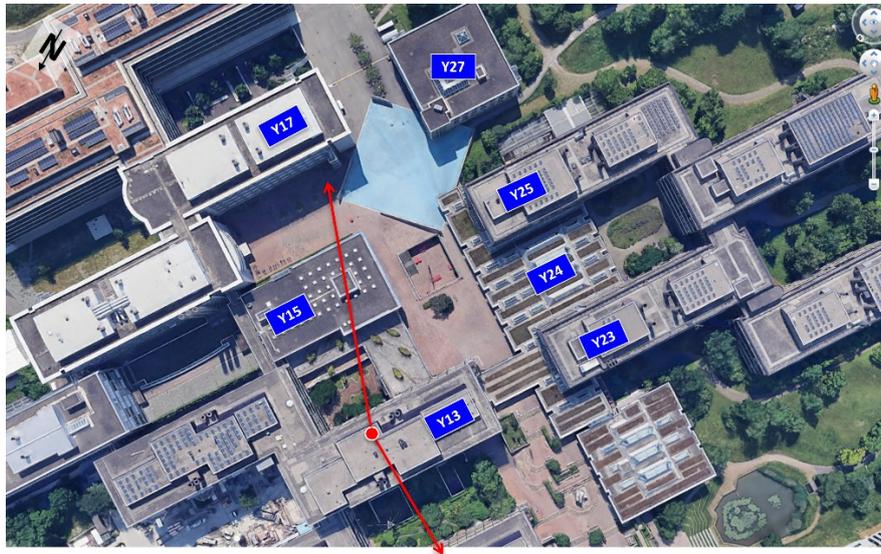
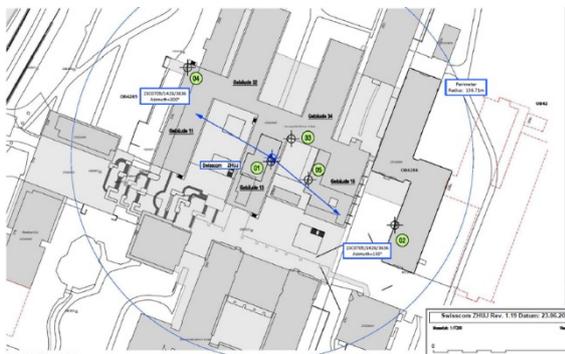


Abbildung 1: Übersicht des ausgewählten Mess-Standorts an der Universität Jyväskylä mit Gebäudenamen. Die roten Pfeile zeigen die Hauptabstrahlrichtungen des ZHJ- Antennenstandorts (Karte: Google Maps).

2.2 Infos zur Antenne

In Abbildung 2 sind zwei Auszüge aus dem betreffenden Standortdatenblatt aufgeführt. Vom Standort ZHJ werden zwei Sektoren versorgt (Hauptabstrahlrichtungen mit Azimut 130° bzw. 300°). In den beiden Sektoren sind jeweils mehrere Bänder aufgeschaltet, wobei je eine adaptiv betriebene Antenne (Typ: Ericsson AIR6488) im Frequenzband um 3600 MHz aufgeführt ist (1SC3636 respektive 2SC3636). Die beiden Antennen sind gleich konfiguriert und verfügen je über 32 Sub-Arrays bei einer maximalen Sendeleistung von 1060 Watt ERP.



Zusatzblatt 2: Technische Angaben zu den Sendeantennen für Mobilfunk und drahtlose Teilnehmeranschlüsse der Anlage

Höhenkote 0: 500.13 m, gewachsener Grund unter Sendeanlage

Laufnummer n (x/y/z)	1 (0.00/0.00/28.65)	2 (0.00/0.00/28.65)	3 (0.00/0.00/28.65)	4 (0.00/0.00/28.65)	5 (0.00/0.00/27.05)	6 (0.00/0.00/27.05)
Nr. der Antenne	1SC0709 (2460)	2SC0709 (2460)	1SC1426 (2460)	2SC1426 (2460)	1SC3636 (2460)	2SC3636 (2460)
Frequenzband [MHz]	0700-0900	0700-0900	1400-2600	1400-2600	3600	3600
Netzbetreiber	Swisscom	Swisscom	Swisscom	Swisscom	Swisscom	Swisscom
Typenbezeichnung der Antenne	80011877.07-2009.ADN02	80011877.07-2009.ADN02	80011877.14-182126.ADN02	80011877.14-182126.ADN02	APR488B43-36.ENV001	APR488B43-36.ENV001
Adaptiver Betrieb	nein	nein	nein	nein	ja	ja
Anzahl Sub-Arrays	-	-	-	-	32	32
Höhe der Antenne über Höhenkote 0 [m]	28.65	28.65	28.65	28.65	27.05	27.05
ERP - Sendeleistung [W]	1030.00	1300.00	1981.00	1878.00	1060.00	1060.00
Hauptstrahlrichtung						
Azimut [in Grad von N]	+130	+300	+130	+300	+130	+300
Mechanischer Neigungswinkel [down tilt, in Grad von der Horizontalen]	+0	+0	+0	+0	+0	+0
Elektrischer Neigungswinkel [down tilt, in Grad]	-12 + -2	-12 + -2	-12 + -3	-12 + -3	+0	+0
Gesamter Neigungswinkel [down tilt, in Grad von der Horizontalen]	-12 + -2	-12 + -2	-12 + -3	-12 + -3	+0	+0

Relevant für die Ermittlung des Einspracheperimeters sind die Antennen im Sektor von 300° bis 300°
ERP_Sektor: Summierte Sendeleistung der Antennen in diesem Sektor: 4238.00 W
AGW: Anlagegrenzwert: 5 V/m

Abbildung 2: Auszug Standortdatenblatt: Im Fokus der Untersuchung stehen die beiden um 3600 MHz adaptiv betriebenen Swisscom-Antennen mit den Bezeichnungen 1SC3636 und 2SC3636.

3. Anordnung der Sensoren

3.1 Anordnung – Szenario Horizontal

Die Umsetzung der horizontalen Anordnung ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigt. Die Sensoren wurden so angeordnet, dass sie über einen Bereich von ca. 90° um die Hauptabstrahlrichtung der 1SC3636 Antenne in möglichst gleichmässigen Winkelabständen zu liegen kommen. Dabei mussten die Gegebenheiten vor Ort berücksichtigt werden bezüglich einer unauffälligen Kabelführung und vorhandenen Montagemöglichkeiten. Die Sensoren wurden auf einer Höhe von 4 m über Boden montiert.

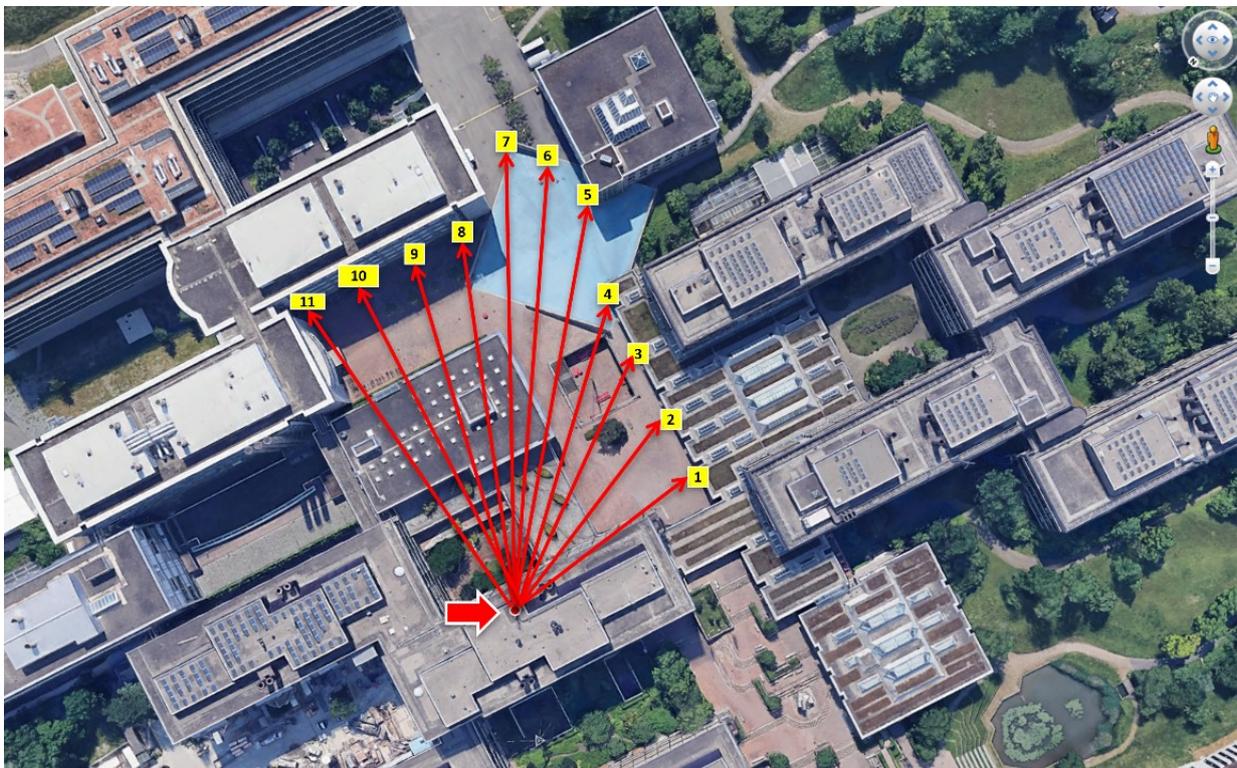
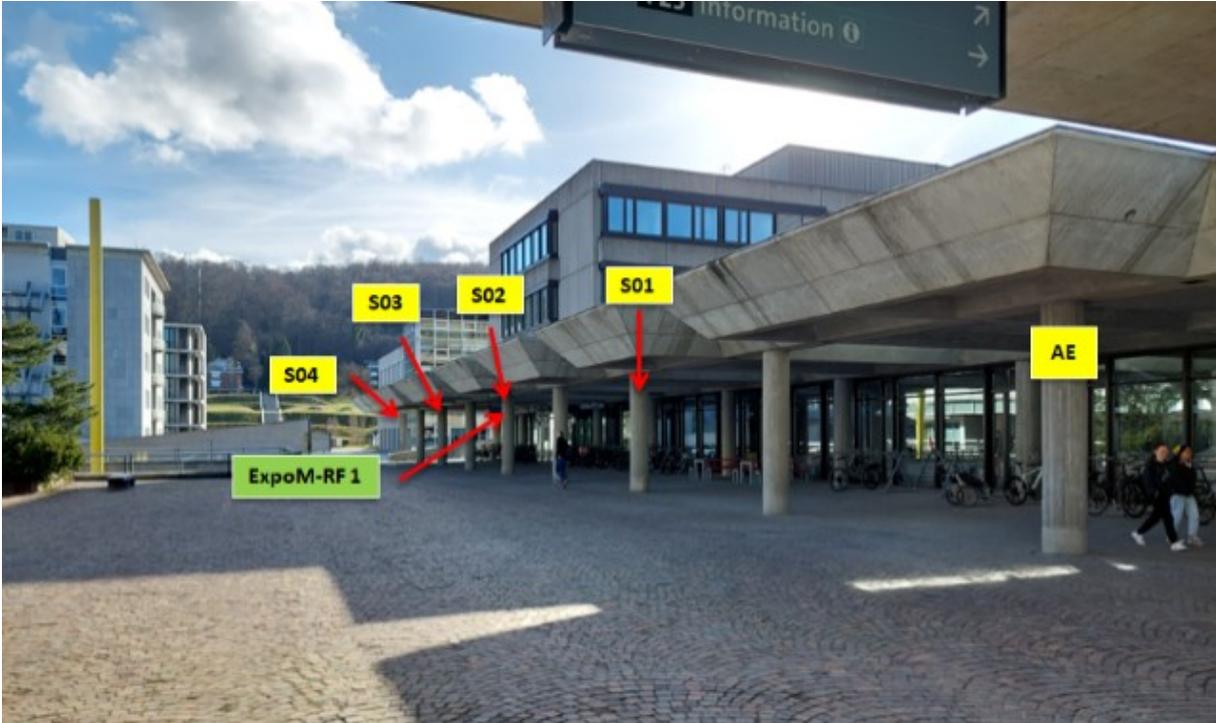


Abbildung 3: Anordnung horizontal (von oben betrachtet) mit Nummerierung der Sensoren.



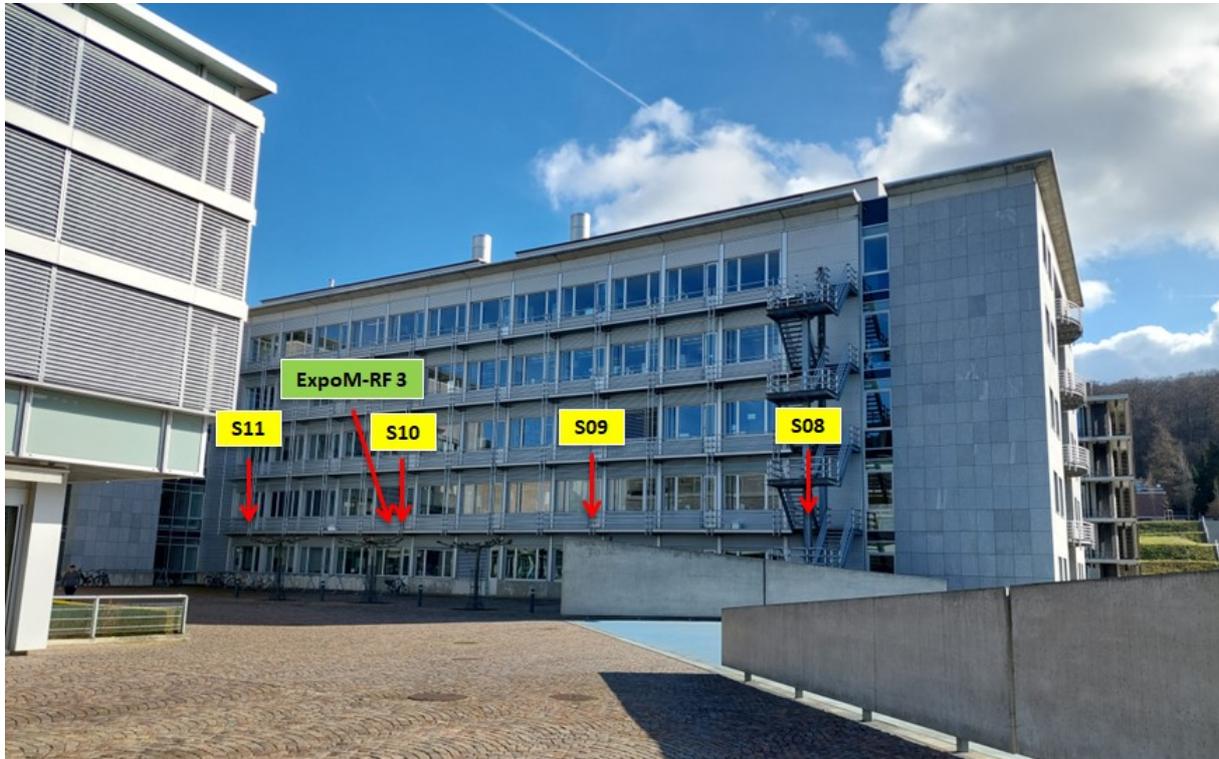


Abbildung 4: Anordnung horizontal, Platzierung der Sensoren (S01 – S11) und der Ausleseeinheit (AE), Sicht vom öffentlich zugänglichen Platz aus. Die Positionen der ExpoM-RF Geräte für die Parallelmessung sind in grün eingezeichnet (ExpoM-RF 1-3).

3.2 Anordnung - Szenario Vertikal

Die Sensor-Anordnung für die vertikalen Messungen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Sensoren wurden auf zwei vertikale Stränge mit je 5 Sensoren verteilt. Die obersten Sensoren (S01 und S10) befinden sich auf dem Dach des Gebäudes.

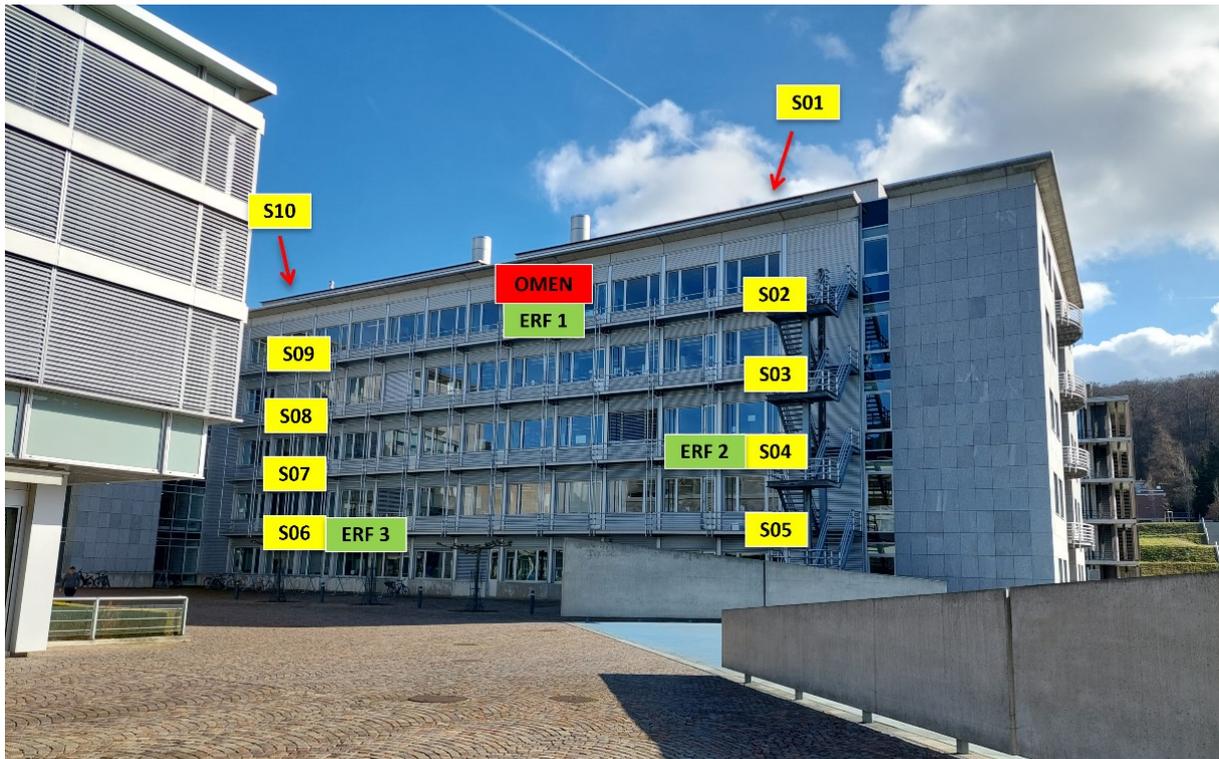


Abbildung 5: Anordnung vertikal, Platzierung der Sensoren (S01 – S10) und Positionen der ExpoM-RF Geräte für die Parallelmessung (ERF 1-3). Die Ausleseeinheit befindet sich im Liftmaschinenraum auf dem Dach des Gebäudes.

4. Messungen mit forciertem Download

4.1 Werkzeuge und Methoden

Innerhalb der Messperioden, in denen das Messnetzwerk aktiv war, wurden an ausgewählten Tagen Messkampagnen mit forciertem Download durchgeführt, um den adaptiven Betrieb der Antenne zu testen (vgl. Tabelle 1). Für den forcierten Download wurde ein 5G-fähiges Smartphone mit Swisscom SIM-Karte ausgestattet mit einem Abo, das unlimitierte mobile Daten beinhaltet. 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. 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.

4.2 Statische Messungen

Die statischen Messungen wurden für beide Anordnungen durchgeführt. Dabei wurde vor jedem einzelnen Sensor ein forciertes Download während einer Dauer von 1 oder 2 Minuten durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich das Mobiltelefon in einer gewissen minimalen Entfernung zum jeweiligen Sensor befindet, um eine Beeinflussung der Messung durch den Uplink-Anteil auf ein Minimum zu beschränken.

4.3 Routenmessungen (Anordnung horizontal)

Mit der horizontalen Sensor-Anordnung wurden verschiedene Szenarien mit überwiegend direkter Sichtverbindung zur Antenne («line-of-sight» bzw. LOS) sowie zwei Szenarien mit teilweise unterbrochener Sichtverbindung («non-line-of-sight» bzw. NLOS) zur Antenne durchgespielt (Abbildung 6). Die Messroute 1 führt an allen Sensoren nacheinander vorbei. Das Ziel ist festzustellen, inwiefern die «Verfolgung» des Endgeräts durch den Beam in der Praxis sichtbar ist und wie sich dabei die Immissionswerte an allen anderen Messpunkten verändern. Messroute 2 startet gleich wie die erste Route, führt jedoch über den blauen Platz und danach hinter das Y17 Gebäude, wo keine direkte Sichtverbindung zur Antenne mehr besteht. Die Messroute 3 führt an den Sensoren S1 bis S4 vorbei und biegt anschliessend rechts in den Feldweg zwischen Y25 und Y27 ab. Ab dieser Stelle ist die Sichtverbindung wieder grösstenteils durch das Y25 Gebäude unterbrochen. Die vierte Messroute ist eine Linienmessung entlang der Verlängerung Antenne – Sensor S07. Sie startet bei der Ecke des Gebäudes Y15, links am Sensor S7 vorbei und anschliessend noch rund 50 Meter weiter bis zu einem Schachtdeckel am Rande des Campus.

Da 5G im 3.5 GHz Band das TDD-Verfahren (Time Division Duplexing) benutzt, können mit einer frequenzselektiven Messung die Beiträge von Basisstation und Smartphone nicht ohne weiteres separiert werden. Die Linienmessung dient dazu, die Relevanz allfälliger Beeinflussungen durch das Mobiltelefon abzuschätzen. In der Annahme, dass die Beiträge der Basisstation während des forcierten Downloads in etwa konstant bleiben, sollten allfällige relevante Beiträge des Smartphones vor allem

5. Dezember 2024

dann sichtbar sein, wenn sich dieses unmittelbar vor dem Sensor befindet. Sobald sich das Smartphone hinter dem Sensor befindet, wird es aufgrund der vorwärts gerichteten Empfangscharakteristik der Sensoren kaum mehr vom Sensornetzwerk mitgemessen. Ab dann kann davon ausgegangen werden, dass nur die Immission der Basisstation vom Sensor erfasst wird.

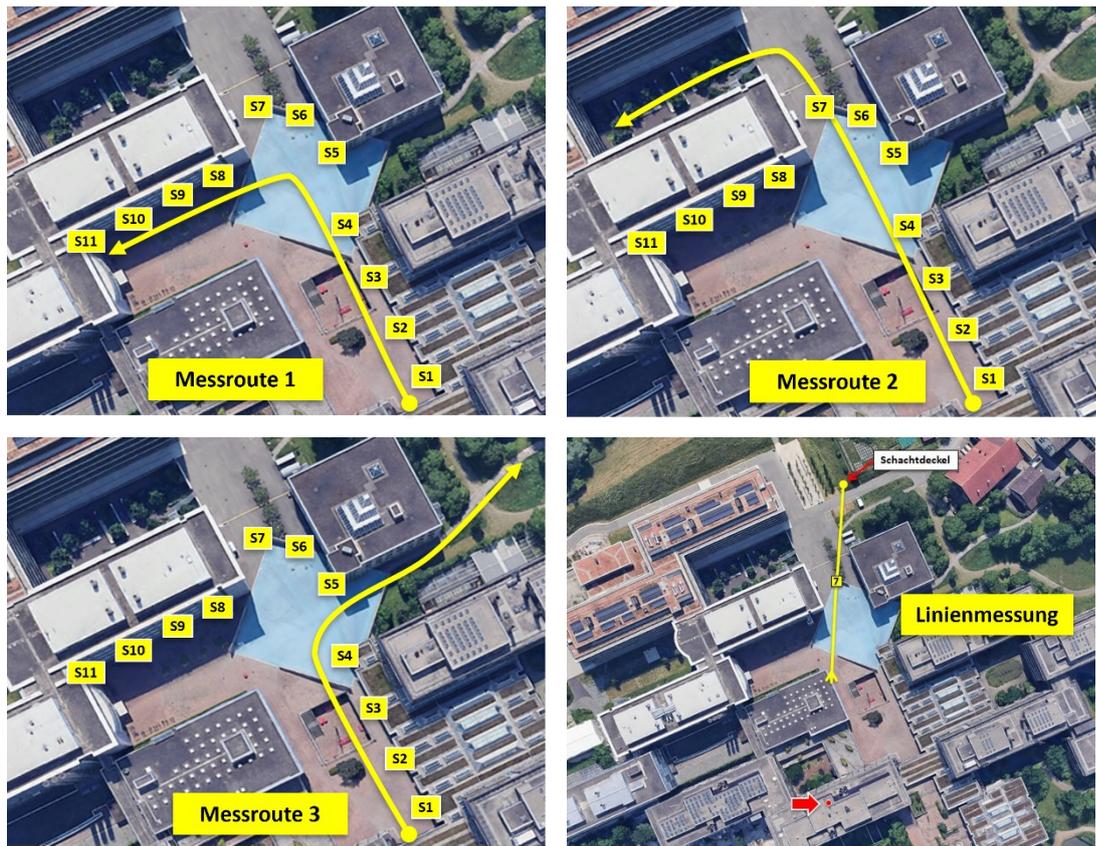


Abbildung 6: Darstellung der Messrouten mit forciertem Download bei horizontaler Anordnung der Sensoren. Oben links: Messroute 1 (LOS); oben rechts: Messroute 2 (NLOS Variante 1); unten links: Messroute 3 (NLOS Variante 2); unten rechts: Messroute 4 (Linienmessung)

4.4 Messungen Anordnung vertikal

Die Mess-Szenarien für die vertikale Anordnung sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Fokus stand dabei in der vertikalen Bewegung des Mobiltelefons. Da eine öffentlich zugängliche Treppe an der Fassade des Y17 Gebäudes angebracht ist, konnte diese für einen Teil der vertikalen Routenmessungen benutzt werden. Diese ist allerdings gegenüber dem rechten Sensorstrang etwas versetzt. Es wurden deshalb noch zwei weitere Messungen durchgeführt, bei denen das Mobiltelefon an eine Schnur befestigt den beiden Sensorsträngen entlang «abgeseilt» wurde. Zur Vollständigkeit wurde zudem auf jedem Stockwerk eine horizontale Routenmessung durchgeführt. Dies war dank der durchgehenden Balkone auf jedem Stockwerk ohne grossen Mehraufwand zu bewerkstelligen.

5. Dezember 2024

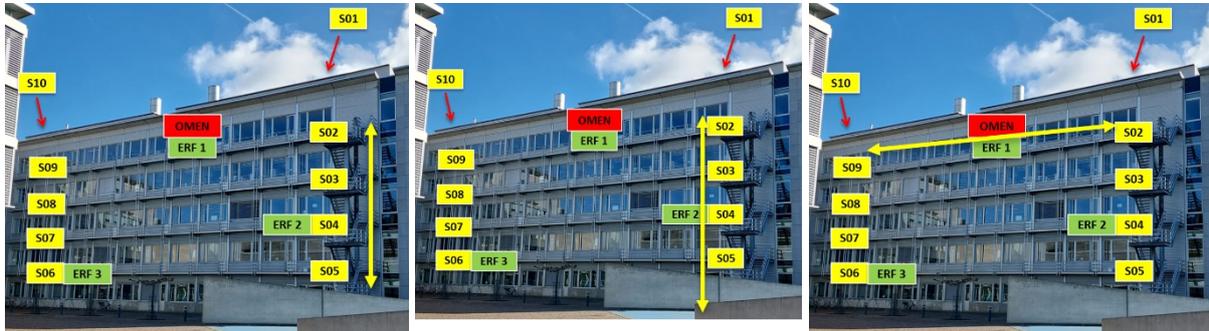


Abbildung 7: Darstellung der Messrouten mit forciertem Download bei vertikaler Anordnung der Sensoren. links: Routenmessung auf Treppe (hoch und wieder runter); Mitte: Herablassen / Hinaufziehen des Mobiltelefons entlang des rechten Sensorstrangs; rechts: Routenmessung auf konstanter Höhe (im Bild: 4. Obergeschoss).

5. Messprogramm

Datum	Beschreibung	Anordnung
19. Feb.	Beginn Frühjahrssemester 2024 UZH	
11. März	Beginn Montage Sensoren Anordnung horizontal	
14. März	Start Messung horizontal mit allen Sensoren	horizontal
26. März	Messkampagne forciertes Download (Teil 1)	horizontal
28. März	Messkampagne forciertes Download (Teil 2)	horizontal
19. April	Linienmessungen	horizontal
25. April	Stopp Messung horizontal / Umbau nach Anordnung vertikal	
2. Mai	Start Messung vertikal mit allen Sensoren	vertikal
2. Mai	Messkampagne mit forciertem Download	vertikal
31. Mai	Ende Frühjahrssemester 2024 UZH	vertikal
27. Juni	Ende der Messung und Abbau Sensornetzwerk	

Tabelle 1: Messzeiträume und Messkampagnen. Pro Anordnung konnten je während über 5 Wochen am Stück unterbrechfrei Messdaten gesammelt werden.

6. Entwicklung der Low-Cost Sensoren

Für das Messvorhaben wurde von Fields at Work GmbH ein neuartiges Sensornetzwerk entwickelt. Ausgehend von den Eigenschaften adaptiver 5G-Beams wurden die Anforderungen an die Sensoren bestimmt. Die Empfangseinheiten sind im Frequenzbereich 3.4–3.8 GHz operativ und verfügen über eine integrierte Messantenne mit breitem Empfangswinkel. Die Sensoren erfassen die elektrische Feldstärke kontinuierlich und bilden in definierbaren Zeitabständen (50–1000 ms) RMS- und Peak

Werte. Neben den messtechnischen Anforderungen sollten die Sensoreinheiten leicht sein und über einen Witterungsschutz verfügen. In Hinblick auf die Realisierung grösserer Messnetzwerke wird ein besonderes Augenmerk auf die Kostenoptimierung bei der Fertigung und Kalibrierung gelegt. Insgesamt wurden 13 Sensoren hergestellt. Davon wurden 2-3 Exemplare als Reserve bereitgehalten, um zeitnah auf allfällige Ausfälle reagieren zu können.

6.1 Übersicht

Das Sensornetzwerk besteht aus einer variablen Anzahl Sensorelementen (1 – 20 Stück) und einer Ausleseeinheit. Die Sensorelemente (Abbildung 8) sind in einem mit Montageflansch versehenem witterungsgeschützten (IP68) Gehäuse untergebracht und durch handelsübliches Netzkabel miteinander verbunden. Die Sensoren sind in Reihe geschaltet (Daisy-Chain-Prinzip), wobei der letzte Sensor mit der Ausleseeinheit verbunden ist. Es handelt sich also um einen seriellen Bus, der durch jeden Sensor durchgeschleift wird. Dieser kann flexibel um zusätzliche Sensoren erweitert oder gekürzt werden (Abbildung 9).

Das Auslesen der Daten erfolgt seriell und wird von der Ausleseeinheit initiiert. Beim Auslesen werden die Messdaten seriell von einem Sensor zum nächsten durchgereicht, bis die Daten vom äussersten Sensor bei der Auslesestation angekommen sind. Dort werden die Daten den einzelnen Sensoren zugeordnet und zunächst in Form von CSV-Dateien abgelegt. Für eine eindeutige Zuordnung der Daten sorgt die Identifikationsnummer der einzelnen Sensoren, welche per Hardware-Schalter bei der Installation der Sensoren eingestellt wird. Das Messintervall wird in Form eines periodischen Synchronisierungssignals vorgegeben, welches von der Ausleseeinheit zeitgleich an alle Sensoren übermittelt wird. Die Synchronisationsgenauigkeit ist dabei besser als 1 ms.



Abbildung 8: links: Sensor im witterungsgeschützten Gehäuse mit angeschlossenen Datenkabeln; rechts: Blick auf einen der montierten Sensoren im Messaufbau an der Universität Irchel.

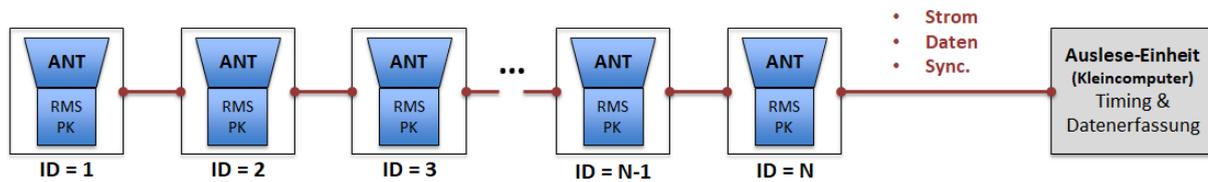


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Netzwerktopologie: Die einzelnen Sensoren sind in Reihe geschaltet und hängen an einem gemeinsamen Datenbus, der mit der Ausleseeinheit verbunden ist.

6.2 Messgrößen und Elektronik

Ein zentrales Kriterium beim Design der Mess-Elektronik war das Sicherstellen einer kontinuierlichen Messung ohne Lücken. Dies wird unter anderem durch die Tatsache ermöglicht, dass sich die Messung auf ein einzelnes Frequenzband beschränkt. Dabei sollen sowohl der Effektivwert (RMS) wie der Spitzenwert (Peak) des gemessenen Signals erfasst werden. Dabei handelt es sich um zwei statistische Messgrößen, die punktuell ausgewertet werden können, aber dennoch Informationen über einen längeren Zeitraum beinhalten. Im Fall von nicht-periodischen Signalen (wie dies bei realistischen Szenarien mit Datenübertragung im Mobilfunk der Fall ist), ist es jedoch wichtig, dass die dabei zugrundeliegenden Zeitkonstanten spezifiziert werden. Beim Effektivwert ist es das Mittelungsintervall, beim Peakwert sind es die Beobachtungszeit sowie die Mindestdauer eines Ereignisses bzw. Ausschlags, das vollständig berücksichtigt wird.

In den Sensoren ist die Erfassung der Messgrößen folgendermassen umgesetzt (siehe Abbildung 10): Das von der Antenne empfangene Signal wird auf zwei Pfade aufgeteilt und parallel von zwei Detektoren ausgewertet, welche kontinuierlich arbeiten. Im RMS-Pfad wird ein gleitender RMS-Wert gebildet über einer Mittelungszeit von ca. 300 ms. Diese Mittelungsdauer ist auf das gewählte Messintervall von 250 ms abgestimmt. Indem die Mittelungsdauer etwas mehr als die Zeit zwischen zwei Messpunkten beträgt, wird eine Unterabtastung des Messwerts vermieden. Im Peak-Pfad wird die Einhüllende des Signals ermittelt und von einer «Max hold» Schaltung ausgewertet. Die max hold Funktion führt einen kontinuierlichen Vergleich zwischen dem Eingangswert (Momentanwert der Einhüllenden) mit dem aktuellen Ausgabewert durch. Sobald der Eingangswert den Ausgabewert übersteigt, wird der Ausgabewert auf das neue Maximum gesetzt und gehalten. Dies ist in der Grafik mit der roten Kurve dargestellt. Jedes Mal, wenn der Sensor das Synchronisationssignal erhält, werden die aktuellen Werte des gleitenden RMS-Werts sowie der Ausgabewert der max hold Schaltung (d.h. Peak-Detektor) abgetastet und für den Auslesevorgang zwischengespeichert. Unmittelbar nach dem Abtasten wird die max hold Schaltung auf null zurückgesetzt und somit die nächste Peakmessung gestartet. Die max hold Schaltung ist abhängig von der Signalform in der Lage, kurze Ereignisse von der Dauer von 0.5 μ s zu erfassen (Siehe detaillierte Auswertung in Abschnitt 6.3.1).

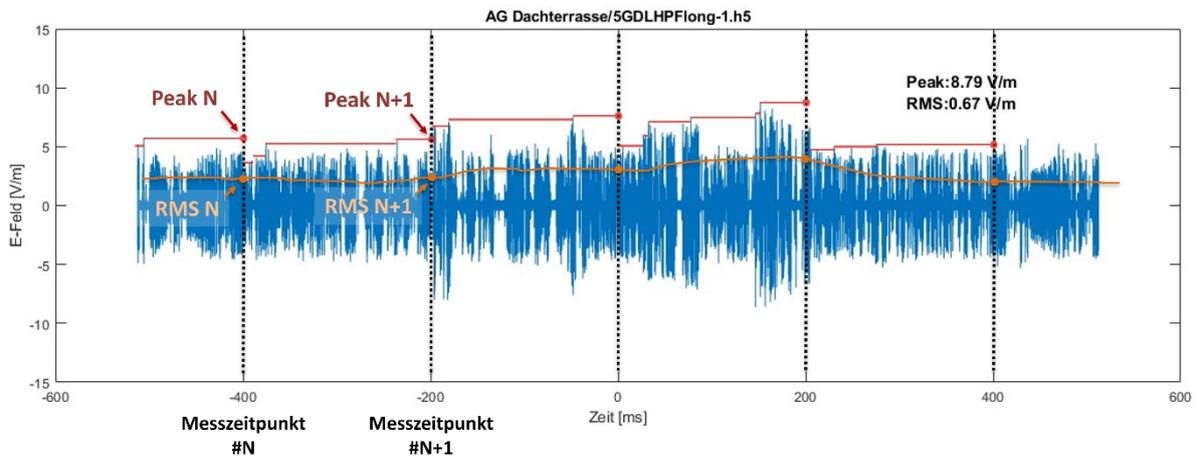


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Messprinzips und der davon abgeleiteten Messgrößen (PEAK und RMS). In diesem Beispiel beträgt das Messintervall 200 ms. Die blaue Kurve ist ein gemessener Feldstärkeverlauf eines 5G-Signals in der Nähe einer Basisstation. Die rote Kurve stellt den Verlauf der "max hold" Spannung des Peak-Detektors dar. Die orange Kurve zeigt das gleitende RMS-Mittel mit 300 ms Mittelungszeit.

6.3 Abweichungen der Messgrößen

Die in 6.2 definierten Messgrößen lassen sich in der Praxis durch elektronische Schaltungen nicht perfekt umsetzen. Die Messwerte der Sensoren entsprechen einer möglichst guten Annäherung, wobei es abhängig von der Signalform zu kleinen oder grösseren Abweichungen kommen kann. Nicht zuletzt durch die «low cost» Implementierung müssen bei der Entwicklung Kompromisse eingegangen werden. In diesem Abschnitt wird die Performance der in der Studie eingesetzten Sensoren evaluiert. Da es sich um die ersten Prototypen dieses Sensortyps handelt, ist anzumerken, dass für künftige Revisionen der Hardware und Software sicher noch Optimierungspotenzial vorhanden ist. Im Rahmen der Sensor-Charakterisierung wurden folgende Performance-Metriken evaluiert:

6.3.1 Peakwert: Mindest-Ereignisdauer

Im Idealfall hängt die Ausgabe des Peak-Detektors nicht von der Ereignisdauer ab. In der Praxis weist die Elektronik allerdings eine gewisse Reaktionszeit auf und kann deshalb nicht beliebig kurze Ereignisse mit voller Amplitude erfassen. Aufgrund der Umsetzung muss dabei noch zwischen isolierten Einzelereignissen und mehrfach-Ereignissen unterschieden werden. Der Peak-Detektor benötigt eine gewisse Zeit, um auf die volle Amplitude «aufgeladen» zu werden. Im Falle eines Einzelereignisses muss dieses mindestens 1 ms lang sein, um vollständig erfasst zu werden. Treten allerdings mehrere Ereignisse mit ähnlicher Amplitude innerhalb einer Messperiode auf, darf die Dauer der einzelnen Ereignisse viel kürzer ausfallen (0.5 Mikrosekunden). Die detaillierten Messwerte sind in Abbildung 11 aufgeführt. Für diese Messungen wurde der Extremfall eines gepulsten Signals verwendet, d.h. ein Träger, dessen Amplitude zwischen 0% und 100% umgeschaltet wird.

Aufgrund dieser Ergebnisse muss davon ausgegangen werden, dass die Sensoren im Fall von sehr niedriger 5G-Sendeaktivität mit seltenen Aussendungen dazu neigen, den Peakwert der Feldstärke zu unterschätzen, wobei sich dieser Effekt mit zunehmender Belegung des Funkkanals entschärft.

5. Dezember 2024

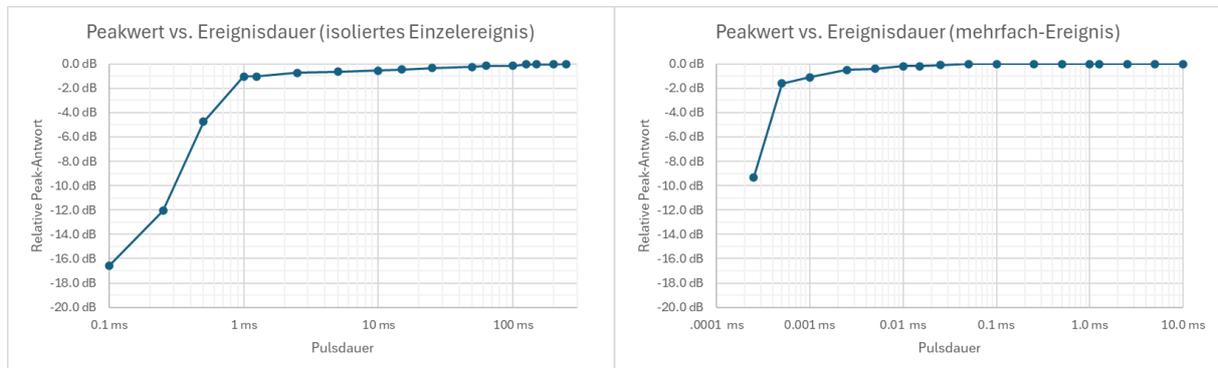


Abbildung 11: Erfassung des Peakwerts abhängig von der Pulsdauer eines pulsmodulierten Signals. Links: Einzel-Ereignis (ein einzelner Puls pro Mess-Intervall); rechts: mehrfach-Ereignis (100 Hz Pulswiederholrate, d.h. 25 Pulse pro Messintervall). Die kürzeste korrekt erfasste Pulsdauer beträgt ca. 1 ms respektive 0,5 μ s.

6.3.2 RMS-Abweichung und Crest-Faktor

Bei modernen Mobilfunksignalen handelt es sich um komplexe Signalformen, welche meist stark von einem unmodulierten Träger (d.h. Sinus-Signal) abweichen. Modulationsverfahren höherer Ordnung, wie sie bei 5G zur Anwendung kommen (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), führen zu grossen Amplitudenschwankungen über die Zeit. Der Crest-Faktor bzw. die «peak-to-average power ratio» (PAPR) ist eine Kenngrösse, um die Stärke dieser Schwankungen zu beschreiben. Die PAPR beschreibt das Verhältnis von Spitzenleistung zu der mittleren Leistung eines Signals und wird üblicherweise in dB angegeben. 5G Signale erreichen typischerweise PAPR-Werte von 12-15 dB. Es ist deshalb wichtig, dass die RMS-Messung der Sensoren mit hohen PAPR-Werten umgehen kann. Dies wurde im Labor mithilfe von Mehrträgersignalen mit variabler Anzahl Trägern und Bandbreiten überprüft. Mehrträgersignale haben eine wohldefinierte PAPR und weisen ähnliche Eigenschaften wie OFDM-Signale auf. In Abbildung 12 ist der Messwert der Sensoren im Vergleich zu etablierten Messmethoden dargestellt. Die Abweichungen zwischen den Messungen betragen weniger als 1 dB für PAPR-Werte bis 19 dB.

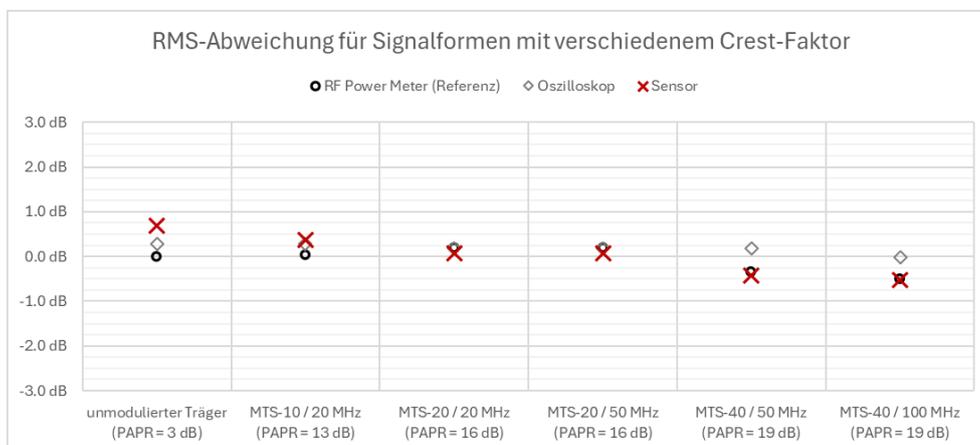


Abbildung 12: Gemessene RMS-Abweichung anhand von künstlich erzeugten Mehrträgersignalen (MTS) mit variablem Crest-Faktor bzw. «peak-to-average power ratio» (PAPR). Im Vergleich dazu wurden die Signale mit einem dedizierten RF Power Meter (Referenz) und einem Oszilloskop mit hoher Bandbreite gemessen.

6.4 Ausleseeinheit und Software

Die Ausleseeinheit besteht aus einem witterungsgeschützten Koffer, in dem ein Windows basierter Mini-PC, ein Mobilfunkmodem, sowie ein spezifisch entwickeltes Schnittstellenmodul für den Anschluss der Ausleseeinheit an den Datenbus des Sensornetzwerks untergebracht sind. Das Schnittstellenmodul stellt zudem die Stromversorgung des Sensornetzwerks bereit. Von der Ausleseeinheit wird das Schnittstellenmodul via USB angesprochen.

Das Auslesen der Daten von den Sensoren wird durch die Software der Ausleseeinheit verwaltet. In der Software müssen das gewünschte Messintervall sowie die Anzahl Sensoren im Sensorstrang eingestellt werden. Wenn die Messung gestartet wird, sendet die Software gemäss eingestelltem Messintervall periodisch via Schnittstellenmodul das Synchronisierungssignal an alle Sensoren gleichzeitig aus. Unmittelbar darauf kann der entsprechende Messwert vom Sensornetzwerk seriell ausgelesen werden.

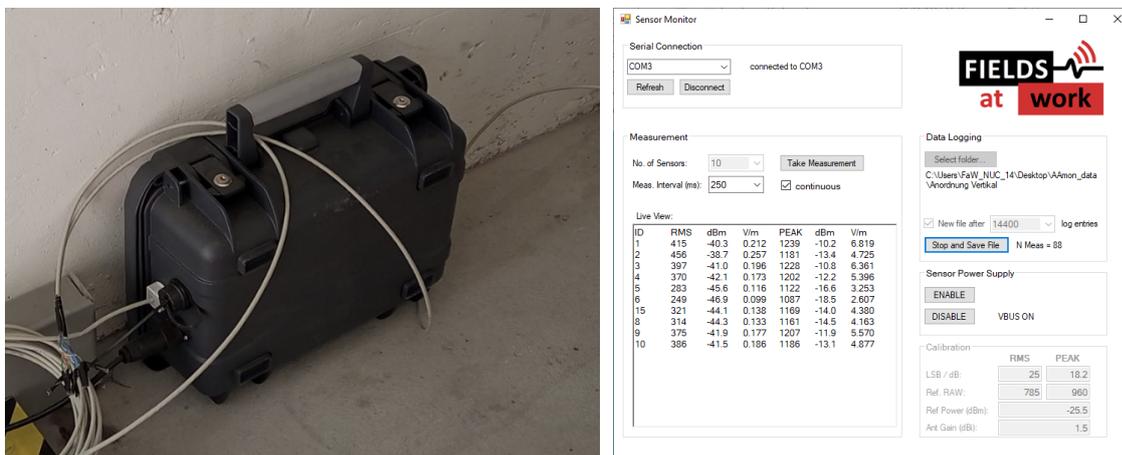


Abbildung 13: links: Ausleseeinheit im wettergeschützten Koffer; rechts: Software für die Ansteuerung des Sensornetzwerks.

6.5 Integrierte Messantenne

Unter den gegebenen Anforderungen an den Sensor wurde nach einer geeigneten Antennenform gesucht. Die Hohlleiter-Antenne wurde durch numerische Simulation der Empfangscharakteristik als besonders geeignet befunden. Es wurden dabei sowohl runde wie auch eckige Hohlleiterantennen getestet. Dieser Antennentyp ermöglicht einen einfachen Aufbau bei reproduzierbaren Eigenschaften. Zudem ist die Antenne empfindlich für beliebige Polarisierungen des EM-Feldes (Zirkularpolarisation), wodurch die Messwerte nicht von der relativen Ausrichtung zum Beam abhängig sind. Die Hohlleiterantennen sind rückseitig geschlossen, wodurch Unempfindlichkeit gegenüber allfälligen Reflexionen von der Gebäudefassade erreicht wird. Das Richtdiagramm (Gewinn und Empfangsöffnungswinkel) wurde in einer echofreien Messkammer über verschiedene Polarisationsrichtungen und Frequenzen experimentell bestimmt (Abbildung 14). Daraus wurde der mittlere Antennengewinn ermittelt, welcher für die Kalibrierungsfunktion der Sensoren benötigt wird (Abschnitt 6.6)

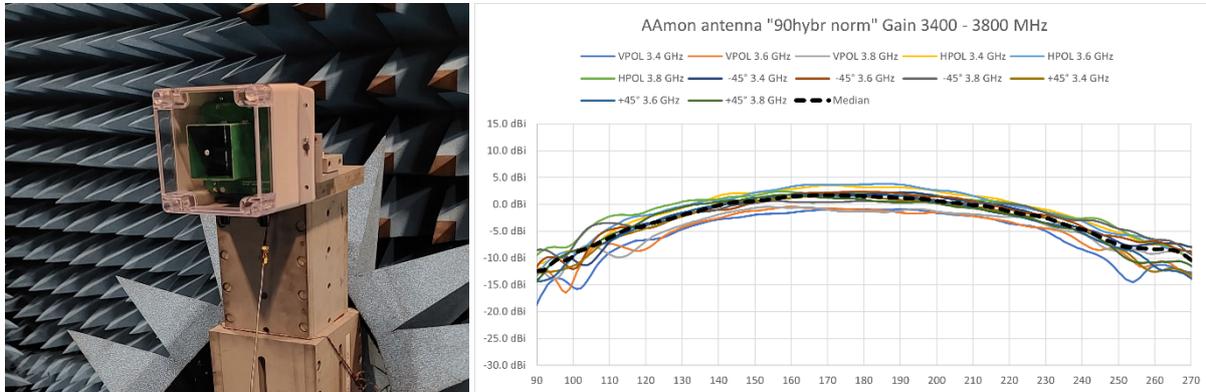


Abbildung 14: links: Charakterisierung der Antenne im Gehäuse in der echofreien Messkammer; rechts: gemessene Richtdiagramme über verschiedene Frequenzen und Polarisationen des eintreffenden elektromagnetischen Feldes, horizontale Schnitte.

6.6 Kalibrierung, Dynamikbereich und Streuung

Die Sensoreinheiten bestehen aus zwei separaten Einheiten, einer Platine mit der Messelektronik sowie einer Antenneneinheit. Diese sind mit einer koaxialen Steckverbindung miteinander verbunden. Die Elektronik der Sensoren liefert einheitenlose Rohwerte, welche proportional zur gemessenen Leistung am koaxialen Eingang der Platine sind. Um diese Daten in Feldstärkewerte umrechnen zu können, sind Kalibrierungsmessungen mit wohldefinierten bekannten Leistungen bzw. Feldstärken notwendig. Die Kalibrierung besteht aus zwei Schritten. Als erstes wurde die Kennlinie der RMS- und Peak- Rohwerte relativ zur eingespeisten Leistung über den gesamten Messbereich für jede Platine einzeln bestimmt (Abbildung 15). Die beobachtete kleine Streuung zwischen den Platinen bedeutet, dass dieser Teil mit einem generischen Kalibrierungsfaktor berücksichtigt werden kann. In einem zweiten Schritt können die gemessenen Leistungen anhand des bekannten Gewinns der Mess-Antenne in Feldstärkewerte umgerechnet werden. Die Streuung der Antenneneigenschaften wurde ebenfalls als ausreichend klein gewertet, um auf eine Exemplar-spezifische Kalibrierung der Sensoren verzichten zu können (Beispiel: Messung des Reflexionsfaktors in Abbildung 16). Die Umrechnung der Rohdaten in Feldstärkewerte wird durch die Software auf der Ausleseinheit durchgeführt.

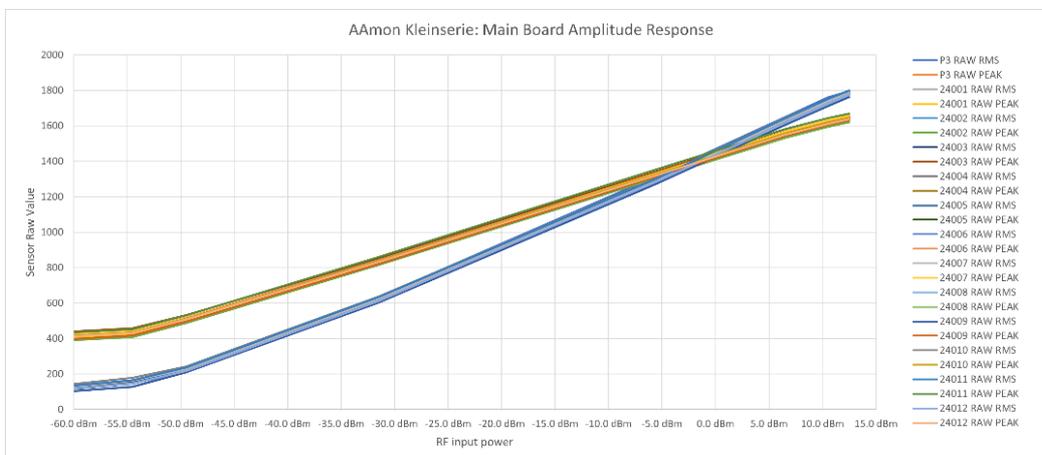


Abbildung 15: Messung der Kennlinie und Dynamikbereich der RMS- und Peakwerte der hergestellten Sensorplatinen. Der nutzbare Dynamikbereich beträgt mehr als 60 dB.

5. Dezember 2024

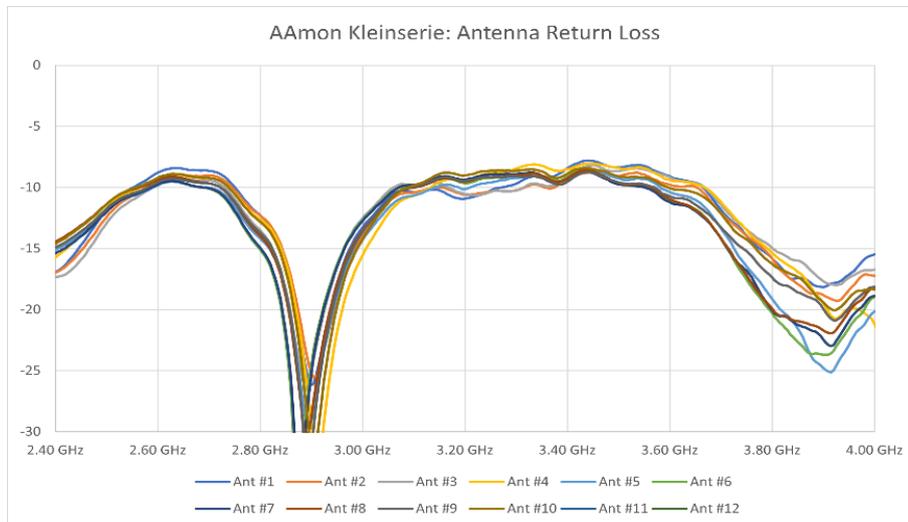


Abbildung 16: Messung des Reflexionsfaktors (S11 Parameter) aller Antennen, die in den Sensoren verbaut sind.

6.7 Technische Daten

Abmessungen	13 x 15 x 9 cm (H x B x T), Gewicht: ca. 450g
Gehäuse	UV-beständiges Polykarbonat, Schutzklasse IP68
Messbereich Frequenz	3400 – 3800 MHz
Messbereich Feldstärke	0.05 V/m – 63 V/m (> 60 dB)
Messgrößen	RMS-Wert, Integrationszeit ca. 300 ms (fix eingestellt) Peak-Wert, Reaktionszeit Einzelereignisse: ca. 1 ms Peak-Wert, Reaktionszeit bei mehrfach-Ereignissen: ca. 0.5 μ s
Messunsicherheiten	Antennenfaktor: ± 2.6 dB (Variation über Frequenzband 3.4–3.8 GHz, Polarisation und Öffnungswinkel $\pm 30^\circ$) Elektronik: ca. ± 1.5 dB (Exemplarstreuung + Frequenz)
Messintervall	Einstellbar 20 ms – 1000 ms (1-50 Messungen / Sekunde)
Topologie	Reihenschaltung der Sensoren ("Daisy-Chain"-Prinzip)
Verbindungskabel Datenbus	Twisted-Pair-Kabel mit 4 Adernpaaren. geeignet ist z.B. handelsübliches U/UTP Netzwerkkabel
Kabellängen	Gesamtlänge eines Strangs mit 10 Sensoren: >500 m. Flexible Aufteilung der Abschnittslängen zwischen den Sensoren
Anzahl Sensoren pro Ausleseeinheit	1 – 20 oder mehr; limitiert durch Gesamt-Kabellänge; Bei mehr als 20 Sensoren gibt es möglicherweise Einschränkungen bezüglich des minimalen Mess-Intervalls.
Spannungsversorgung	Versorgungsspannungsbereich 9 – 80 Volt (über Datenbus) Leistungsbedarf pro Sensor: ca. 0.9-1.0 Watt

7. Datenanalyse horizontale Anordnung

7.1 Horizontale Feldstärkeverteilung

Die vom Sensornetzwerk erfasste horizontale Feldstärkeverteilung ist in Abbildung 17 dargestellt. Das linke Panel zeigt die Verteilung der erfassten RMS-Werte und die Verteilung der Peak-Werte ist im rechten Panel dargestellt. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 3 für die horizontale Montage des Sensornetzwerks. Es wird die bei jedem Sensor erfasste Exposition 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. Der zweite dichte Teil der Verteilung streut stärker und liegt zwischen 0.056 und 0.17 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 bei Sensor S1 bis 0.09 V/m bei Sensor S10. Gegenüber den RMS-Werten weist die Verteilung der Peak-Werte höhere Feldstärkewerte auf. Bei niedriger Aktivität liegen die Peak-Werte der Basislinie zwischen 0.07 und 0.45 V/m. Zwischen den Sensoren ist die Basislinie Schwankungen unterworfen. Der dichte Teil der Peak-Verteilung direkt erfasster 5G-Mobilfunkaussendungen reicht von etwa 0.39 V/m bis 5.6 V/m und nimmt von Sensor S1 bis Sensor S10 zu.

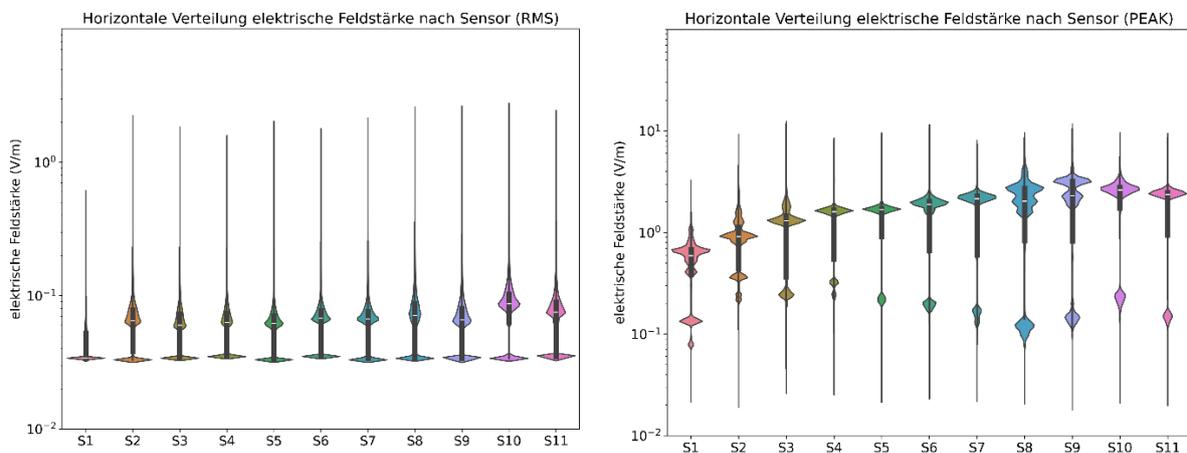


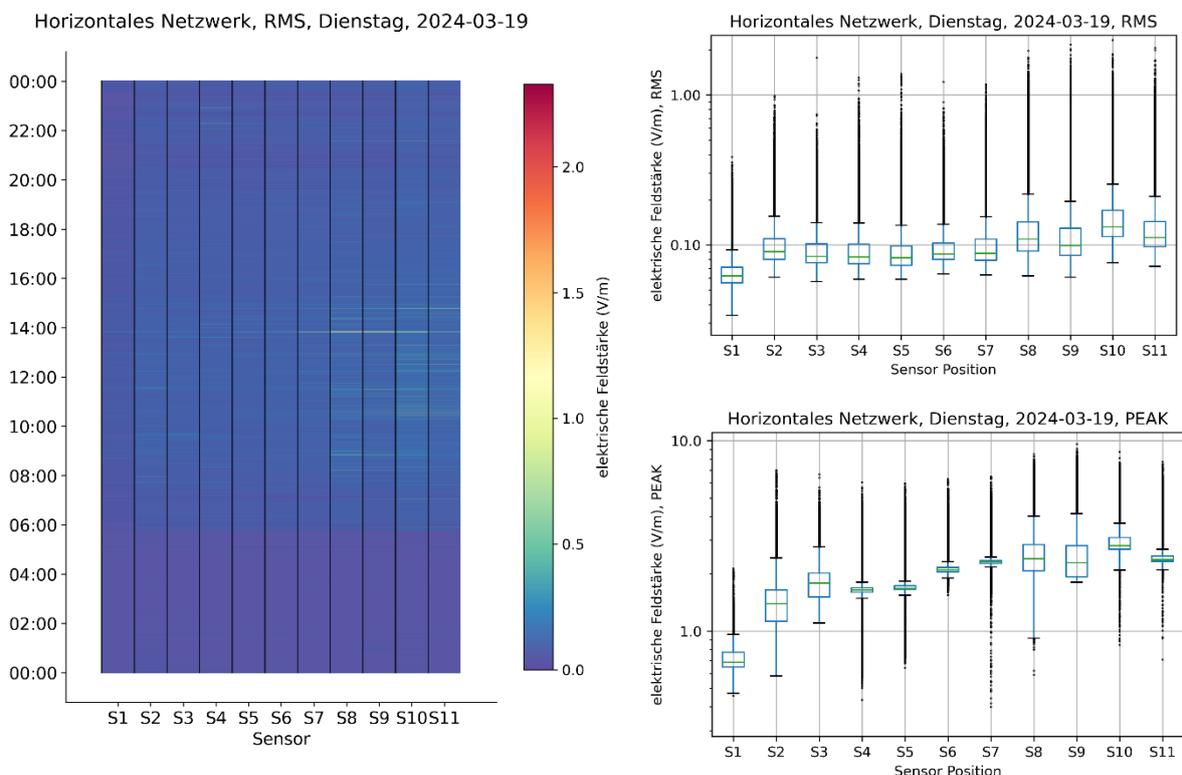
Abbildung 17: Elektrische Feldstärkeverteilung der horizontalen Sensorkonfiguration in V/m mit Log-Skala. Linkes Panel: Verteilung der RMS-Feldstärkewerte. Rechtes Panel: Verteilung der Peak-Feldstärkewerte. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 3. Die Analyse berücksichtigt einen Erfassungszeitraum von 14 Tagen zwischen dem 15. März und 30. März 2024. Der Tag der Sensormontage (14. März) und die Tage 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 gelistet.

Bei der horizontalen Platzierung der Sensoren wurde darauf geachtet, dass bei S1 keine direkte Sichtverbindung zur Antenne besteht. Dies schlägt sich deutlich in reduzierten Feldstärkewerten nieder. Gegenüber den übrigen Sensoren S2–S11 liegen die RMS-Werte bei S1 einen Faktor 2 bis 3 tiefer. Die Medianwerte der Sensoren S2 bis S11 liegen zwischen 0.06 und 0.09 V/m. Bei den Peak-Werten ist ein ähnlicher Trend erkennbar. Die Verteilung bei S1 weist mit einem Median von 0.6 V/m die kleinsten

Werte auf. Mit steigender Sensornummer nimmt der Median der elektrischen Feldstärke von 0.9 V/m (S2) bis 2.6 V/m (S10) zu. Sensor S10 scheint eine räumliche Anordnung aufzuweisen, welche zu erhöhten Feldstärkewerten führt. Dabei spielen geometrische Faktoren wie die azimutale und vertikale Anordnung relativ zum Array sowie die Distanz zum Antennenpanel eine Rolle. Sensor S10 liegt azimutal nicht weit von der Hauptabstrahlrichtung der 5G-Antenne entfernt, was in einer geringen Richtungsdämpfung resultiert. Zusätzlich liegt S10 durch die Montage am Geländer von Gebäude Y17 leicht erhöht, was die vertikale Sicht auf die Antenne begünstigt und in einer geringeren vertikalen Richtungsdämpfung resultiert. Die lokale Feldstärke kann auch durch Reflexionen beeinflusst sein. Bei den Peak-Werten scheint die geometrische Ausrichtung zwischen Sensor und Antenne einen besonders grossen Einfluss zu haben. Nicht zuletzt hängt die detektierte Feldstärkenverteilung auch vom programmierten Beampattern der Antenne ab.

7.2 Vergleich forciertes Download-Normalbetrieb horizontales Sensornetzwerk

Ein Vergleich der mittleren Feldstärkewerte auf dem Innenhof des Campus Irchel (RMS: 0.03-0.09 V/m, Peak: 0.6-2.6 V/m) mit den in der SwissNIS Studie gefunden Feldstärken auf Pausenplätzen bei Schulen während der Anwesenheit von Schüler*innen (RMS: 0.23 V/m, Peak: 1.33 V/m) [2] zeigt, dass die gemessenen Feldstärkewerte niedrig ausfallen. Dies rührt vermutlich daher, dass ein Grossteil der Studentenschaft für das Arbeiten das universitätseigene WLAN-Netzwerk benutzen. Für die Erprobung des Sensornetzwerks ist eine Umgebung mit mässiger Mobilfunknutzung jedoch ideal. Die durch den forcierten Download hervorgerufene Feldstärkeverteilung hebt sich auf dem Sensornetzwerk deutlich vom Normalbetrieb ab, siehe Abbildung 18.



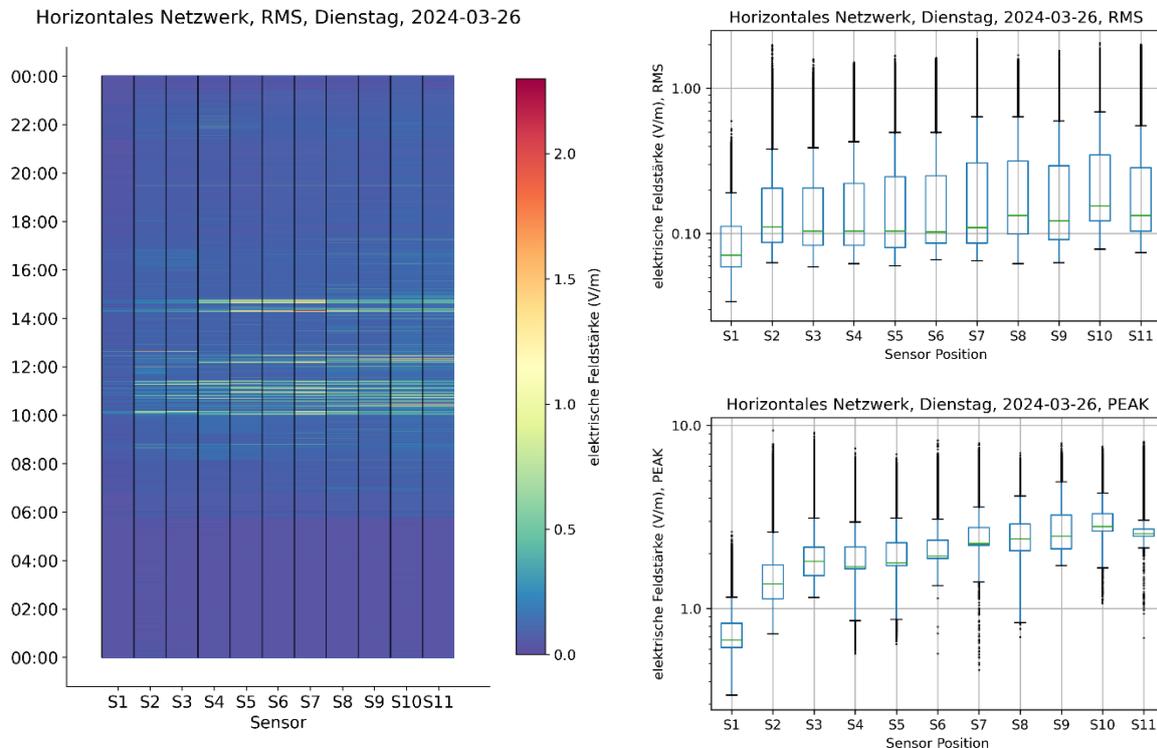


Abbildung 18: Zeitliche und räumliche Dynamik der vom Sensornetzwerk erfassten RMS-Feldstärken. Die forcierten Downloads wurden am 26.03.2024 zwischen 10:00 Uhr und 14:40 Uhr durchgeführt. Oben links: Sensoraufgelöstes Wasserfalldiagramm der gemessenen Feldstärken als zeitlicher Verlauf am Dienstag, 16.03.24. Während des ganzen Tages herrschte Normalbetrieb auf dem Gelände. Unten links: Sensoraufgelöstes Wasserfalldiagramm mit dem zeitlichen Verlauf der gemessenen Feldstärken an einem Tag mit forciertem Download, Dienstag 26.03.2024. Die Farbskalierung beider Wasserfalldiagramme ist identisch. Oben rechts: RMS und Peak Feldstärkeverteilung im Zeitraum von 10:00 bis 14:40 für den Normalbetrieb. Unten rechts: RMS und Peak Feldstärkeverteilung im Zeitraum von 10:00 bis 14:40 während des forcierten Downloads. Bei den Boxplot-Verteilungen im rechten Panel 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.

Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass während der Nacht von 00:00 bis 06:00 kaum Aktivität vorhanden ist. Dies ist zu erwarten, da die Antenne hauptsächlich den Campus Irchel versorgt. Während der Nacht halten sich dort nur sehr wenige Personen auf und die Feldemissionen sind minimal. Vermutlich wird während dieser Zeit der 5G-Teil der Anlage abgestellt, um Energie zu sparen. Während des Normalbetriebs am 19.03.2024 weisen vor allem die Sensoren S8-S11 über den ganzen Tag verteilt RMS-Feldstärkewerte auf, welche sich von der Basislinie abheben. Die RMS-Feldstärkewerte liegen zwischen 0.06 V/m (S1) und 0.13 V/m (S10) für den Median und das 75. Perzentil liegt zwischen 0.07 V/m (S1) und 0.17 V/m (S10). Der Median der Peakwerteverteilung reicht bei Normalbetrieb von 0.69 V/m (S1) bis 2.81 V/m (S10) und das 75. Perzentil von 0.77 V/m (S1) bis 3.09 V/m (S10).

Der forcierte Download ist im unteren linken Panel von Abbildung 18 deutlich sichtbar. Zwischen 10:00 und 14:40 steigen die Medianwerte der RMS-Feldstärke bei allen Sensoren nur leicht an, 0.07 V/m (S1) bis 0.16 V/m (S10). Wie aus dem rechten Teil von Abbildung 18 hervorgeht, treten erhöhte RMS-Feldstärkewerte bei forciertem Download häufiger auf und das 75. Perzentil liegt zwischen 0.11 V/m (S1) und 0.35 V/m (S10). Die Medianwerte der Peak-Messungen liegen bei forciertem

Download zum Teil leicht tiefer, 0.67 V/m (S1) bis 2.8 V/m (S10) und das 75. Perzentil der Peak-Messung liegt zwischen 0.83 V/m (S1) und 3.3 V/m (S10) etwas höher.

Der Interquartilsabstand (IQR) und somit die Variabilität der Feldstärkewerte nimmt beim forcierten Download stark zu, wie aus dem Vergleich der Verteilungen im rechten Teil von Abbildung 18 hervorgeht. Besonders deutlich tritt diese Zunahme bei den Peakmessungen der Sensoren S4 bis S7 hervor. Durch den forcierten Download und das Abschreiten von Routen wird der 5G-Beam stärker ausgeleuchtet und erreicht somit auch Raumsegmente, welche im Normalbetrieb keine hohen Feldstärken aufweisen. Die hohe Datenrate bei forciertem Download führt zu einer Erhöhung der Sendeleistung.

7.3 Statische Messungen vor jedem Sensor in der horizontalen Sensoranordnung

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden vor jedem Sensorelement statische Messungen mit forciertem Download während einer Dauer von ca. 1 Minute durchgeführt. Die resultierenden RMS- und Peak-Feldstärkeverläufe für jedes Sensorelement sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Der Einfluss auf sämtliche Sensoren bei forciertem Download vor Sensor S1 kann durch Vergleich der Feldstärkemuster in der mit S1 bezeichneten grauen vertikalen Spalte erkannt werden. Wird vor Sensor S1 ein forciertes Download durchgeführt, steigen die elektrischen Feldstärkewerte während des Downloads gegenüber der Basislinie nur geringfügig an. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass zwischen der Antenne und Sensor S1 keine direkte Sichtverbindung besteht. Bei Sensor S2 hingegen steigen die Werte stärker an, da ein 5G-Beam in Richtung Mobiltelefon zeigt und bei S2 eine direkte Sichtverbindung besteht. Bei der Sensorgruppe S5-S7 steigt die Feldstärke nur leicht an. Bei S8 und S9 hingegen, steigen die Feldstärkewerte beim forcierten Download vor S1 wieder stärker an. Es wäre möglich, dass ein zweiter Beam auf die Gebäudefassade von Y17 zeigt und von dort über den Innenhof des Campus Irchel in Richtung S1 reflektiert wird. In einem solchen Fall liegt ein Single-User Multiple Input Multiple Output (SU-MIMO) Szenario vor. Mittels Channel State Information Reference Signal (CSI-RF) wurde vom User Equipment (UE) an die Basisstation (gNB) gemeldet, dass es für die Datenübertragung günstig ist, mehrere Kanäle, welche sich auf unterschiedlichen Beams befinden, zu verwenden. Aufgrund dieser Information wurde aus dem Codebook eine entsprechende Beamkonfiguration verwendet. Für dieses Szenario muss sowohl bei der Basisstation wie auch beim Mobiltelefon eine entsprechende Anzahl an Antennen vorhanden sein. [3] Das iPhone 14 verfügt gemäss Herstellerangaben über ein 4x4 MIMO 5G Antennenarray [4].

Wird der Download vor S2 ausgeführt, so ist die Feldstärke auch vor diesem Sensorelement am höchsten. Während des forcierten Downloads vor Sensor S3 wurden von Sensoren 6-9 erhöhte Feldstärkebeiträge aufgezeichnet. Da die Messungen zu einer Zeit mit vielen Passanten auf dem Innenhof durchgeführt wurden, wäre es möglich, dass ein Beampattern verwendet wurde, welches sowohl die Bereiche um S7 und S8 sowie S3 versorgt hat. Reflexionen von der Fassade bei S8 in Richtung S3 sind ebenfalls nicht auszuschliessen. Gegen Ende des Zeitfensters steigt die Feldstärke bei S3 dann wieder an. Bezüglich der heruntergeladenen Datenmenge konnte eine leichte Reduktion festgestellt werden. Beim forcierten Download vor S4 treten nur am Anfang hohe Feldstärkewerte auf, was sich auch in einer reduzierten heruntergeladenen Datenmenge niedergeschlagen hat. Die genaue Ursache für den Übertragungsengpass konnte nicht ermittelt werden. Die Sensorgruppe S1-S4 weist einen horizontalen Abstand von ca. 54° bis 24° zur Hauptstrahlrichtung der Antenne auf, was einem horizontalen Winkelsegment von ca. 30° entspricht.

5. Dezember 2024

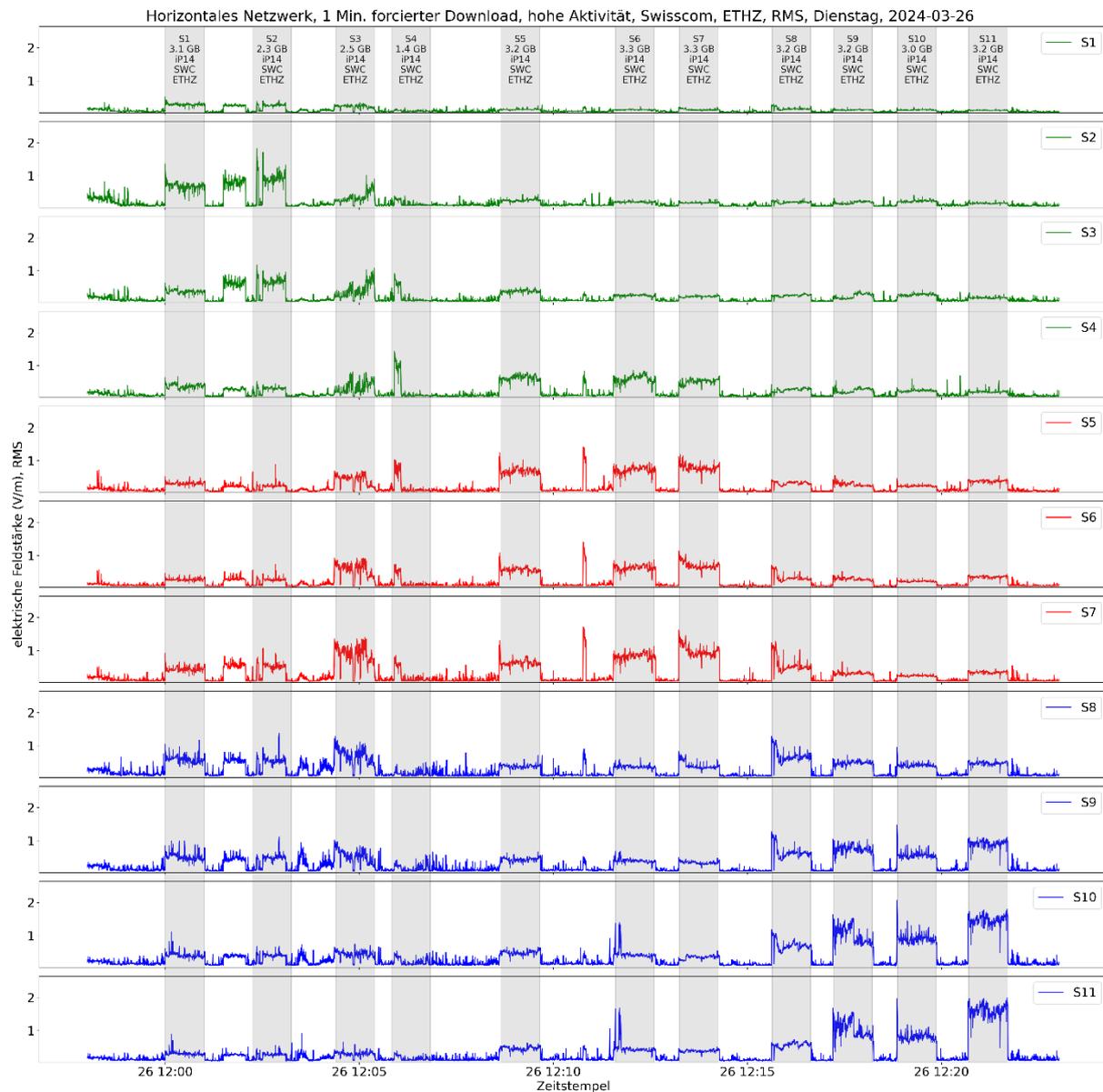


Abbildung 19: Einminütiger forciertes Download vor jedem Sensorelement für die horizontale Messkonfiguration. Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (RMS) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden drei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1-S4): Säulengang Y23-Y25, rote Gruppe (S5-S7): Hintere Mauer Georg Büchner Platz und math. Institut Y27, blaue Gruppe (S8-S11): Geländer 1. Stock Y17. Die grauen vertikalen Balken kennzeichnen die Messdauer des forcierten Downloadfensters. Die Informationen zur Messung sind an der Oberseite jedes Balkens angegeben und bedeuten: Forciertes Download vor Sensorelement (S#), bezogenes Datenvolumen, Gerätetyp (iP14: iPhone 14), Mobilfunknetz (SWC: Swisscom), Serverstandort (ETHZ: ETH Zürich). Die Messung wurde am 26.03.2024 über die Mittagszeit während hohem Personenaufkommen durchgeführt.

5. Dezember 2024

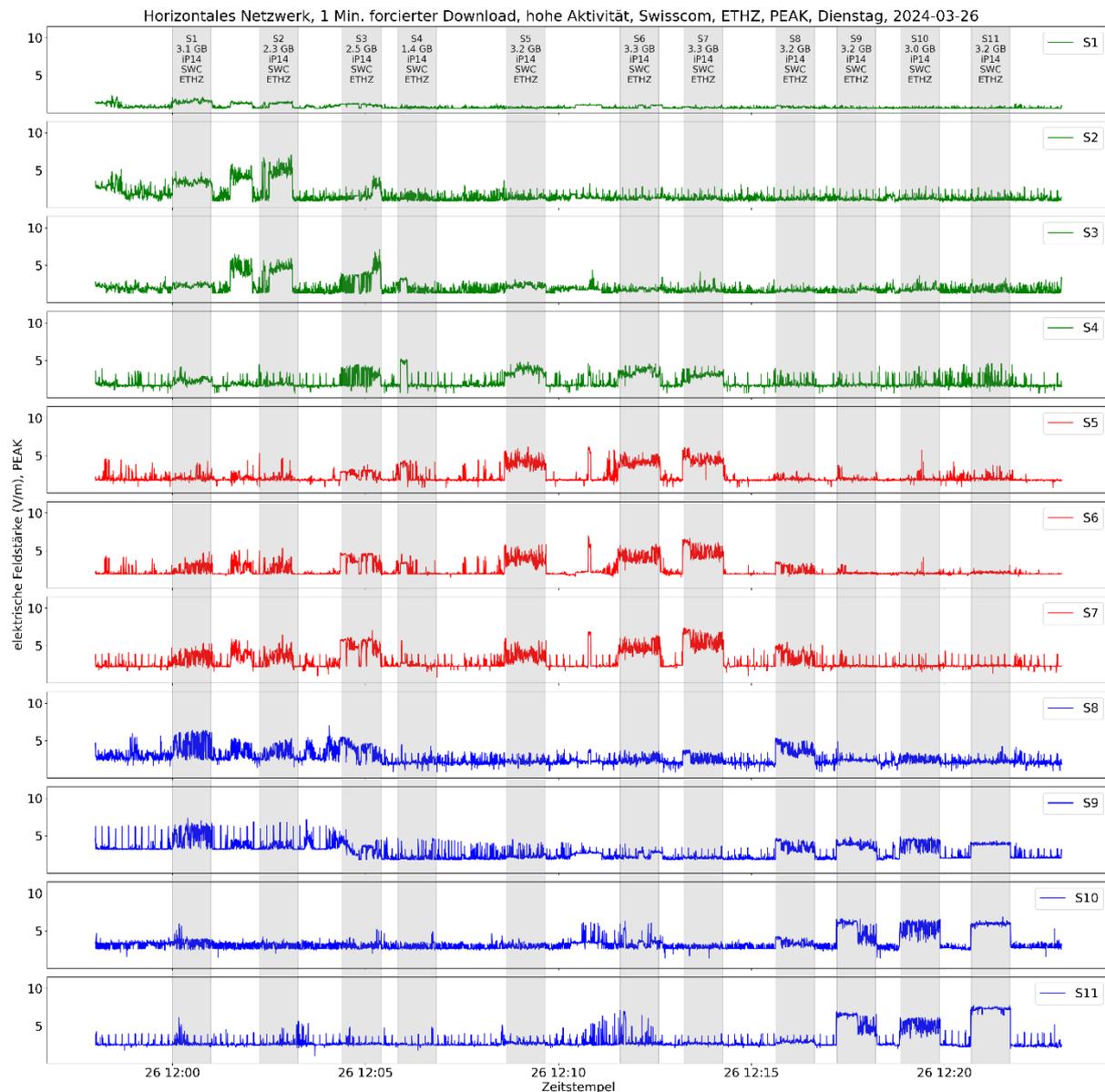


Abbildung 20: Einminütiger forciertes Download vor jedem Sensorelement für die horizontale Messkonfiguration. Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (Peak) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden drei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1-S4): Säulengang Y23-Y25, rote Gruppe (S5-S7): Hintere Mauer Georg Büchner Platz und math. Institut Y27, blaue Gruppe (S8-S11): Geländer 1. Stock Y17. 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#), bezogenes Datenvolumen, Gerätetyp (IP14: iPhone 14), Mobilfunknetz (SWC: Swisscom), Serverstandort (ETHZ: ETH Zürich). Die Messung wurde am 26.03.2024 über die Mittagszeit während hohem Personenaufkommen durchgeführt.

Sensor S5 ist der erste Sensor der rot eingefärbten Gruppe, welche die hintere Betonmauer auf dem Georg Büchner Platz und das mathematische Institut Y27 umfasst. Wird vor diesem Sensor ein einminütiger Download durchgeführt, so zeigt sich, dass die Feldstärkewerte in S4 bis S7 ebenfalls erhöht sind. Dies lässt darauf schließen, dass azimuthal alle 4 Sensoren innerhalb des Beamprofils lagen. Der horizontale Abstand zur Hauptstrahlrichtung beträgt für S4 ca. 24° und für S7 ca. 7° , was einem horizontalen Winkelsegment von 17° entspricht. Beim forcierten Download vor S6 und S7 zeichnet sich ein ähnliches Muster ab wie bei S5. Die gesamte Gruppe S4 bis S7 weist höhere Feldstärkewerte auf.

Bei forciertem Download in der Gruppe S8-S11, welche auf Höhe des 1. Stockwerks am Geländer des Gebäudes Y17 angebracht sind, zeichnet sich über die gesamte Gebäudefassade bei forciertem Download eine Feldstärkezunahme ab. Relativ zur Hauptstrahlrichtung weist diese Sensorgruppe horizontale Abstände von 0° (S8) bis 27° (S11) auf. Bei forciertem Download vor Sensor S8 werden auch bei S7 der roten Gruppe erhöhte Feldstärkewerte aufgezeichnet. Bei den übrigen Sensoren führt ein forciertes Download in der blauen Gruppe nur zu geringfügigen Feldstärkerhöhungen ausserhalb dieser Gruppe. Das Feldstärkemaximum verschiebt sich in der blauen Gruppe gegen S11, wenn vor Sensoren mit höherem Index ein forciertes Download durchgeführt wird. Bei forciertem Download vor S11 nimmt die Feldstärke bei S8 wieder ab, da sich dieser Sensor am Rande des Beamprofils befindet.

Die Sensor-Zeitreihenmatrix der Peak-Feldstärkewerte ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Feldstärkemuster bei einminütigem forciertem Download sind ähnlich wie jene bei den RMS-Werten. Die Peakwerte liegen jedoch bei deutlich höheren Feldstärkewerten als die RMS-Daten. Die Signalmodulation begünstigt bei 5G das Auftreten von Feldstärkespitzen. Bei den Peakmessungen zeigen ebenfalls 3-4 Sensorelemente erhöhte Feldstärkewerte, wenn vor einem Sensor ein forciertes Download durchgeführt wird. Bei den RMS-Werten ist die Basislinie bei kleiner Aktivität durch Mittelung viel glatter als bei den Peakmessungen.

Für die Erfassung eines einzelnen Beams pro Sensor waren die Sensoren nicht genügend weit auseinander platziert. Der Bereich mit erhöhten RMS-Feldstärkewerten bei forciertem Download erstreckt sich bis zu 4 Sensorelementen. Die beobachteten Feldstärkenmuster von erhöhten Feldstärkewerten bei 3-4 Sensoren passen gut zur Air 6488 Herstellerangabe der Beambreite. Die horizontale Beambreite bei halber Leistung (HPBW) liegt abhängig von der azimuthalen Auslenkung ϕ zwischen 12° ($\phi=0^\circ$) und 22° ($\phi=55^\circ$) [5]. Die beobachtete Feldstärkeverteilung im horizontalen Netzwerk hängt jedoch nicht nur von der Breite eines Beams ab, sondern auch von dessen horizontaler Anordnung relativ zur Sensorgruppe. Die Messungen in Abbildung 19 zeigen ein adaptives Verhalten der Antenne deutlich auf. Bei direkter Sichtverbindung wird der Beam in Richtung Mobiltelefon ausgerichtet. Dabei zeigt sich auch, dass die Feldstärkeverteilung in Gebieten ohne Mobilfunkbedarf niedrig bleibt. Durch die Adaptivität der Antenne werden also nur jene Gebiete versorgt, in welchen auch Mobilfunkbedarf herrscht. Die 5G Technologie ist somit besonders effizient. Es kann aber auch zu Szenarien kommen, bei denen die Abdeckung eines Gebietes durch Reflexionen erfolgt. Dies kann zur Folge haben, dass in Gebieten ohne Mobilfunkteilnehmer erhöhte Feldstärkewerte auftreten.

7.4 Routenmessungen horizontale Sensoranordnung

7.4.1 Routenmessung 1

Abbildung 21 zeigt den Feldstärkeverlauf der Sensoren S1-S11, welcher durch Abschreiten von Messroute 1 (siehe Abbildung 6) während der Erzeugung von forciertem Datenverkehr entstanden ist. Die Route startet bei Sensor S1, bei welchem keine direkte Sichtverbindung zur Antenne besteht. Trotz forcierten Downloads weisen die Sensoren S1-S4 zu diesem Zeitpunkt nur Feldstärkewerte in der Höhe der Basislinie auf. Sensoren S7 und S8 zeigen bei Routenbeginn die höchsten Feldstärkewerte. Wie in Kapitel 7.3 erläutert, wird vermutlich ein Beampattern gewählt, bei dem der Mobilfunkteilnehmer via Reflexion an der Gebäudehülle Y17 versorgt wird. Die höheren Pfadverluste werden durch mehr Sendeleistung kompensiert, was an den orangen bis roten Linien bei S7 erkennbar ist. Ab ca. 10:35:45 wird die Sicht zwischen Antenne und Mobilfunktelefon nicht mehr durch die Überdachung des Säulengangs versperrt. Dies führt zu einer Neukonfiguration des abgestrahlten Beampatterns. Die Feldstärke ist nun durchgehend bei den drei Sensoren am höchsten, vor welchen sich das Mobilfunkgerät befindet. Da die Sensoren in aufsteigender Reihenfolge abgeschritten werden, liegen die Feldstärkemaxima auf einer Diagonalen von unten links nach oben rechts. Zwischen 10:35:50 und 10:36:20 treten bei S3 und bei S7 erhöhte Feldstärkewerte auf. Wie in Kapitel 7.3 erläutert, wäre es möglich, dass beide Regionen bei Bedarf durch separate Beams versorgt werden und das Mobilfunkgerät bei S3 über zwei Kanäle Daten empfangen kann, was einen Reflexionspfad beinhaltet.

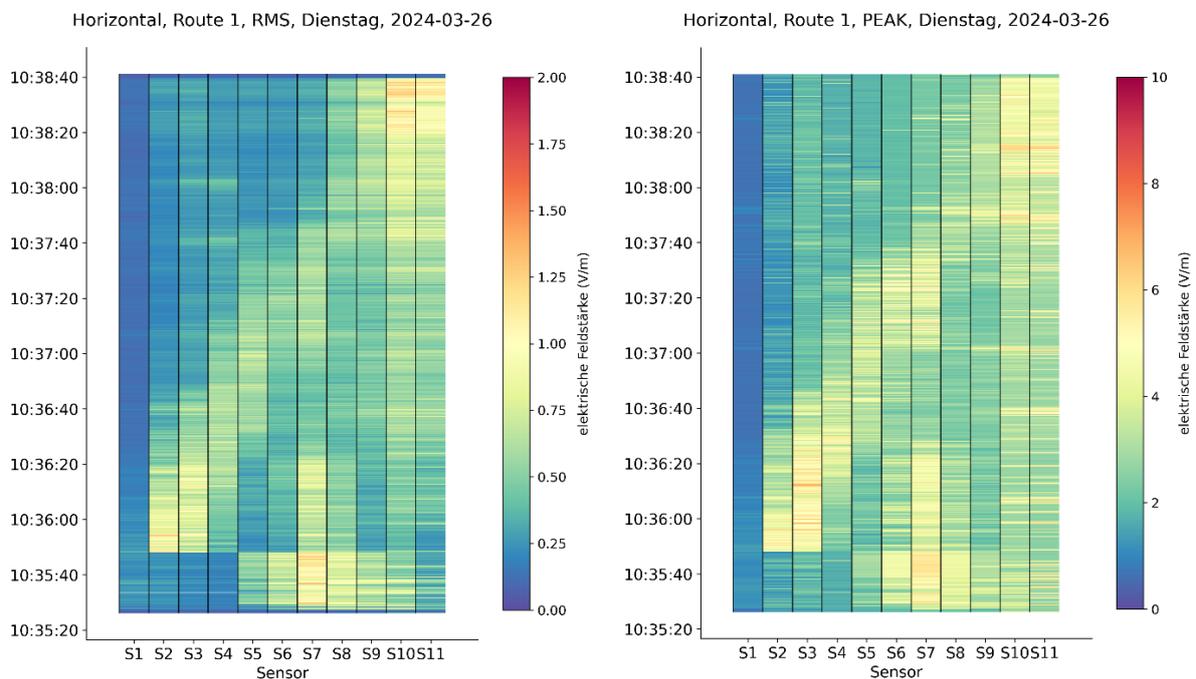


Abbildung 21: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim horizontalen Sensornetzwerk S1-S11 während forcierten Downloads entlang Messroute 1, gemäss Abbildung 6. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Abschreitens von Messroute 1 wurde mit einem iPhone 14 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen. Der Download wurde um 10:35:26 gestartet und hat eine Dauer von 3:15 Minuten.

Dass erhöhte Feldstärkewerte unabhängig von der Lage des Testgeräts auftreten können, zeigt sich um ca. 10:37:40 und 10:38:00 bei S3 und S4. Das Feldstärkemuster wird vermutlich durch Userverkehr in den entsprechenden Raumsegmenten hervorgerufen. Durch adaptives Beamforming wird ein zusätzlicher Beam kurzzeitig nach S3 und S4 gelenkt. Die RMS- und Peakwerte weisen ein ähnliches zeitliches und räumliches Muster auf.

7.4.2 Routenmessung 2

Zu Beginn von Route 2 besteht wiederum keine Sichtverbindung zur Antenne. Bis um 10:58:00 entspricht das Muster der Feldstärkeverteilung in Abbildung 22 jenem von Routenmessung 1. Auf Höhe von Sensor 5 wird hier jedoch nicht nach links abgebogen, sondern die Route wird geradeaus in Richtung S7 fortgesetzt. Dies führt dazu, dass die Feldstärkemaxima bei S5-S7 bestehen bleiben. Der kurze Unterbruch zwischen 11:00:10 und 11:00:20 wurde durch einen Neustart des Datendownloads verursacht und zeigt eine deutliche Reduktion der Feldstärkewerte auf dem gesamten Sensornetzwerk. Auch nach dem Abbiegen in den Innenhof zwischen Y17 und dem dahinterliegenden Gebäude bleiben die Feldstärkewerte bei S5-S7 hoch. Es wäre möglich, dass die Versorgung im tiefer liegenden Innenhof durch Reflexionen an der Glas- und Metallfassade des mathematischen Instituts (Y27) realisiert wird. Der Beam wird daher nach wie vor in Richtung S5-S7 gelenkt. Im Innenhof wurde eine deutliche Abnahme der Downloadgeschwindigkeit festgestellt.

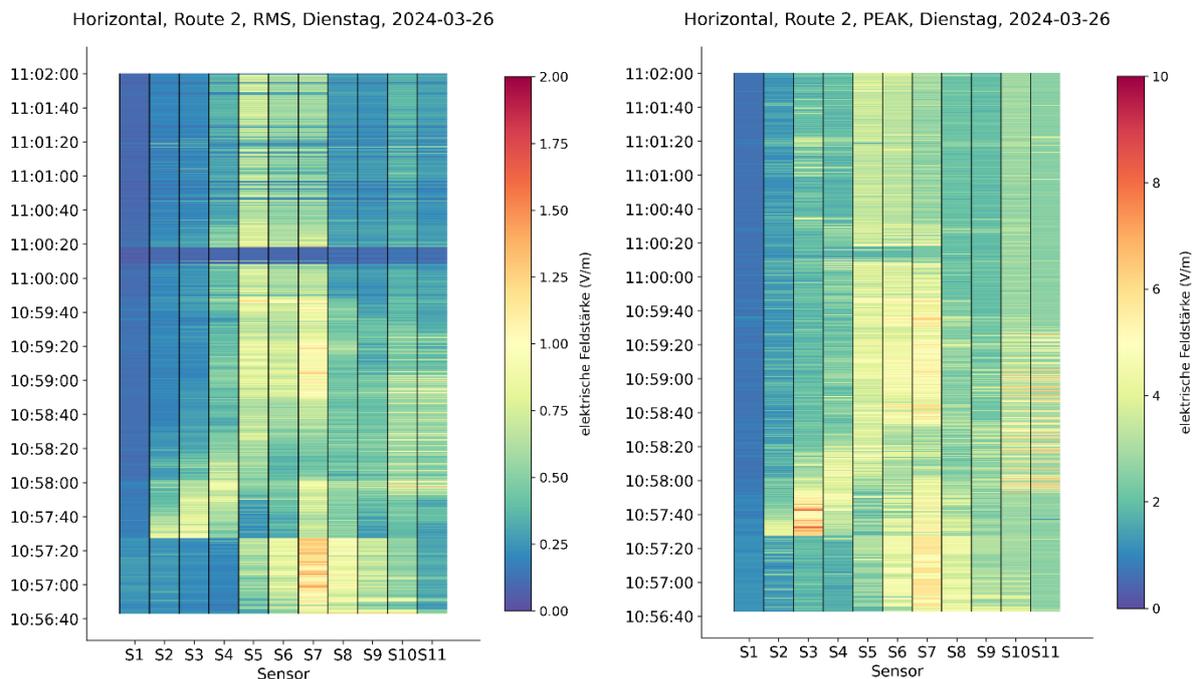


Abbildung 22: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim horizontalen Sensornetzwerk S1-S11 während forcierten Downloads entlang Messroute 2, gemäss Abbildung 6. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Abschreitens von Messroute 2 wurde mit einem iPhone 14 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen. Der Download wurde um 10:35:26 gestartet und um 11:00:10 neu ausgelöst, da die Testdatei heruntergeladen war. Dies führt zu einem kurzen Unterbruch. Insgesamt wurden in 5:17 Minuten 13.9 GB heruntergeladen.

7.4.3 Routenmessung 3

Abermals besteht zwischen Sensor S1 und der Antenne keine direkte Sichtverbindung. In Abbildung 23 sind während der ersten 1.3 Minuten erhöhte Feldstärkewerte bei Sensoren S2, S3 und bei S7-S9 erkennbar. Das Startmuster weicht somit von jenem der Routen 1 und 2 ab, wurde jedoch bei forciertem Download vor S1 in Abbildung 19 beobachtet. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre das Vorhandensein von aktiven Mobilfunkteilnehmern in der Region bei S2 und S3. Dies führt zu einem so hohen Mobilfunkbedarf, dass ein Beam in Richtung S2 bis S4 abgestrahlt wird und zusätzlich ein Reflexionspfad via Gebäudefassade Y17 genutzt wird, was zu erhöhten Werten bei S7-S9 führt. Ab ca. 11:25:30 nimmt die Aktivität bei S7-S9 ab. Dies fällt mit dem Abbiegen in die Passage zwischen Y25 und Y27 zusammen. Während der restlichen Dauer des forcierten Downloads bleibt die räumliche Feldstärkeverteilung bei der Sensorgruppe S3-S5 erhöht. Die Beamkonfiguration wird so gewählt, dass der Strahl möglichst gut in den Korridor zwischen den beiden Gebäuden dringen kann. Verglichen mit der Route 2, welche sich ebenfalls nach ca. halber Messzeit aus dem direkten Sichtbereich der Sensoren entfernt und dann erhöhte Feldstärken bei S5-S7 aufweist, bleibt die Aktivität bei Routenmessung 3 bei S3-S5 erhöht, da das Abbiegen früher geschieht.

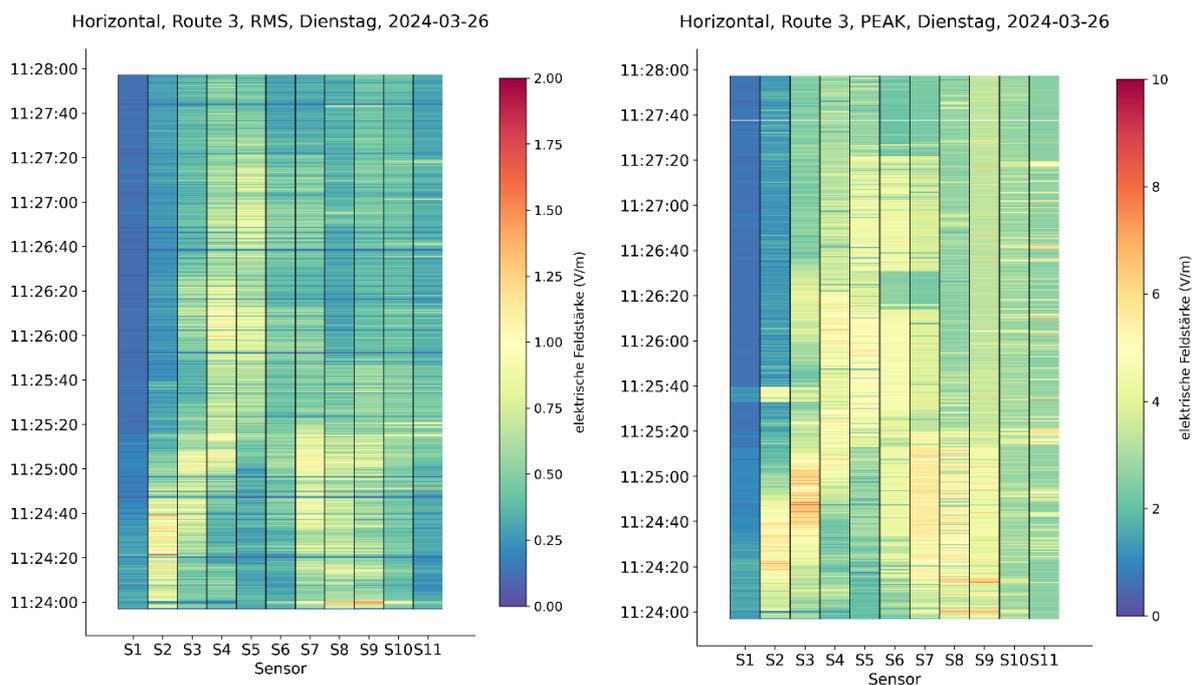


Abbildung 23: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim horizontalen Sensornetzwerk S1-S11 während forcierten Downloads entlang Messroute 3, gemäss Abbildung 6. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Abschreitens von Messroute 3 wurde mit einem iPhone 14 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen. Der Download wurde um 11:23:57 gestartet. Insgesamt wurden in 4 Minuten 10.2 GB heruntergeladen.

7.4.4 Linienmessung 4

Abbildung 24 zeigt den zeitlichen und räumlichen Feldstärkeverlauf während der Linienmessung 4. Zu Beginn der Messungen ist die Feldstärke bei S7-S9 erhöht. Eine mögliche Ursache hierfür ist die durch Gebäude Y15 verursachte Abschirmung der Startposition. Schon nach kurzer Zeit besteht

jedoch eine direkte Sichtverbindung zwischen Antenne und dem Mobilfunkgerät. Anschliessend teilen sich die Regionen mit erhöhter Feldstärke in die Sektoren S2-S4 und S8-S11 auf. Die Ursache hierfür kann nicht genau nachvollzogen werden, könnte aber von der Verteilung der Mobilfunknutzer auf dem Platz abhängen. Ab 12:01:00 weist die Sensorgruppe S5-S7 erhöhte Feldstärkewerte auf. Dies ist zu erwarten, da diese Sensorgruppe bei Sichtverbindung in direkter Verlängerung zwischen der Mobilfunkantenne und dem Mobiltelefon liegt. Im Bereich vor und hinter dem Sensor lassen sich keine grossen Unterschiede in der elektrischen Feldstärke feststellen. Dies deutet darauf hin, dass das Sensornetzwerk bei den forcierten Downloads vor allem den Downlink erfasst und die Uplink-Komponenten beim TDD-Verfahren verhältnismässig klein sind. Die elektrische Feldstärke bei S5-S7 bleibt bis ans Ende der abgeschrittenen Route erhöht.

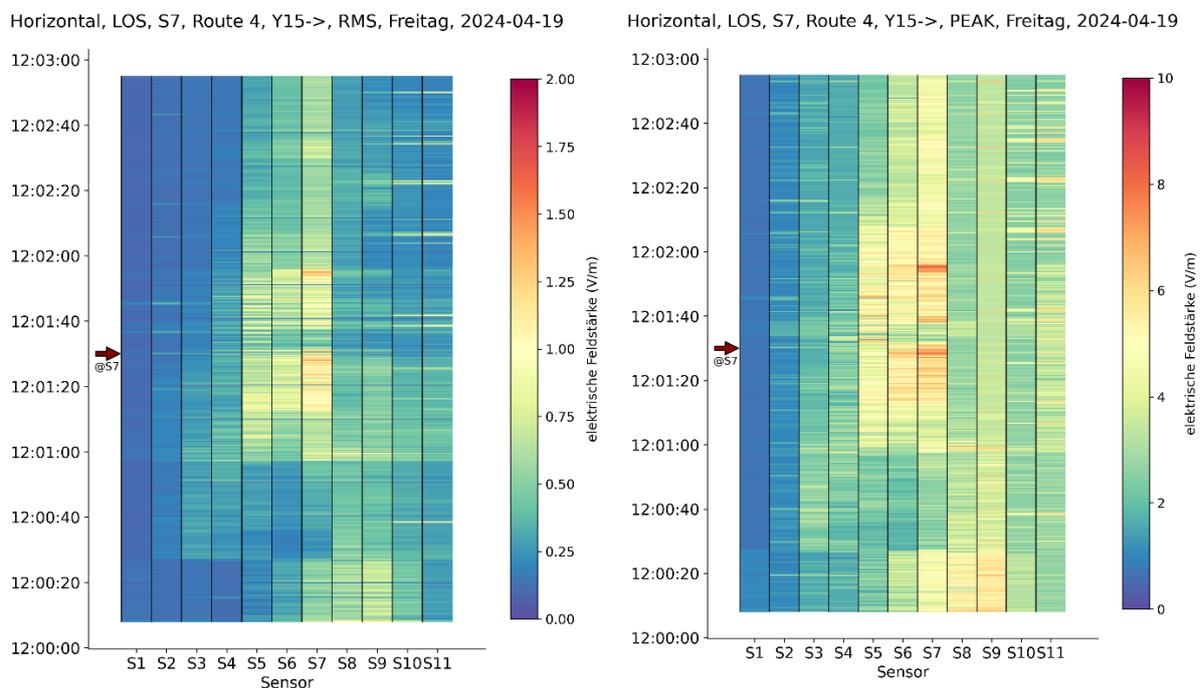


Abbildung 24: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim horizontalen Sensornetzwerk S1-S11 während forcierten Downloads entlang der Linienmessung 4, gemäss Abbildung 6. Das Mobilfunktelefon bewegt sich während der ersten Messhälfte in direkter Linie (LOS, line of sight) auf den Sensor S7 zu. 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. Das Erreichen des Sensors 7 wird durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Abschreitens von Linienmessung 4 wurde mit einem iPhone 14 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen. Der Download wurde um 12:00:07 gestartet und um 12:01:30 wurde die Betonmauer auf Höhe Sensor S7 erreicht.

8. Datenanalyse vertikale Anordnung

Die auf dem Campus Irchel installierte adaptive 5G Antenne Air6488 von Ericsson vermag die Beams nicht nur in horizontaler Richtung auszulenken, sondern ermöglicht auch vertikales Beamforming. Die in diesem Kapitel vorgestellten und diskutierten Messungen gleichen konzeptuell den horizontalen Messungen, wurden jedoch in vertikaler Anordnung am Geländer der Fluchtbalkone von Gebäude Y17 durchgeführt, siehe Kapitel 3.2 für eine Darstellung des Versuchsaufbaus.

8.1 Vertikale Feldstärkenverteilung

Die vom Sensornetzwerk erfasste vertikale Feldstärkeverteilung ist in Abbildung 25 dargestellt. Das linke Panel zeigt die Verteilung der erfassten RMS-Werte und die Verteilung der Peak-Werte ist im rechten Panel dargestellt. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 7 für die vertikale Montage des Sensornetzwerks. Es wird die bei jedem Sensor erfasste Exposition 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. Der zweite dichte Teil der Verteilung streut stärker und liegt zwischen 0.07 bis 0.50 V/m. Dieser Teil umfasst RMS-Feldstärkewerte, die aufgrund von Mobilfunkausstrahlungen entstehen, welche in den vom Sensor erfassten Raumwinkel abgestrahlt werden. Gemäss Tabelle 8 im Anhang III reichen die Medianwerte der Gesamtverteilung von 0.08 V/m bei Sensor S6 bis 0.18 V/m bei Sensor S2. Gegenüber den RMS-Werten weist die Verteilung der Peak-Werte höhere Feldstärkewerte auf. Bei niedriger Aktivität liegen die Peak-Werte der Basislinie zwischen 0.015 und 0.13 V/m. Zwischen den Sensoren ist die Basislinie Schwankungen unterworfen. Der dichte Teil der Peak-Verteilung direkt erfasster 5G-Mobilfunkausstrahlungen reicht von etwa 1.8 bis 11.2 V/m.

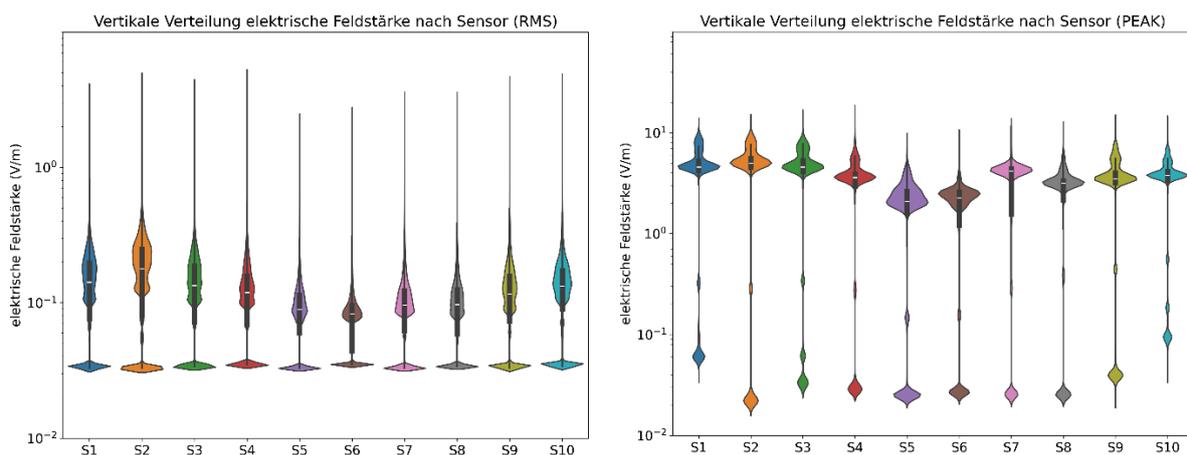


Abbildung 25: Elektrische Feldstärkeverteilung der vertikalen Sensorkonfiguration in V/m mit Log-Skala. Linkes Panel: Verteilung der RMS-Feldstärkewerte. Rechtes Panel: Verteilung der Peak-Feldstärkewerte. Die Nummerierung der Sensoren entspricht der Anordnung in Abbildung 7. Die Analyse berücksichtigt einen Erfassungszeitraum von 14 Tagen zwischen dem 3. Mai und 16. Mai. Der Tag der Sensormontage (2. Mai) und die Tage mit forciertem Download (2. Mai) wurden nicht berücksichtigt. Der verwendete Datensatz weist für beide Panels eine Grösse von 5'841'499 Messpunkten auf. Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messungen sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 des Anhangs III gelistet.

Sowohl bei den RMS- wie auch bei den Peak-Messungen weisen S5, S6 und S7 die niedrigste Verteilung der Feldstärkewerte auf. Dies ist teilweise aufgrund ihrer Position im Sensornetzwerk erklärbar. Die Sensoren am Gelände des untersten und zweituntersten Stockwerks sehen das 5G-Array unter dem steilsten vertikalen Winkel. Die Air 6488 Antenne weist einen fest eingestellten digitalen Downtilt von 3° auf und verfügt weder über einen mechanischen noch einen elektrischen Downtilt. Die vertikale Beambreite wird vom Hersteller mit 10° angegeben [5]. Die Antenne wurde so ausgerichtet, dass der mechanische Neigungswinkel 0° beträgt. Abhängig von der Sensor-Montagehöhe variieren die Winkel gegenüber der Horizontalen ca. von 1° bis 14°, was gemäss Antennendiagramm in einer vertikalen Richtungsämpfung von 0.5 bis 1.3 dB resultiert. Die Umhüllende aus dem Standortdatenblatt berücksichtigt jedoch alle möglichen Beams. Wird nur ein Beam in Richtung Sensornetzwerk abgestrahlt kann es sein, dass die Dämpfung gegenüber der Hauptstrahlrichtung deutlich stärker abfällt als dies bei der kumulierten Umhüllenden der Richtdiagramme der Fall ist. Die gefundene Feldstärkeverteilung dürfte auch stark von den programmierten vertikalen Beampattern der Antenne und der effektiven Mobilfunknutzung im Gebäude beeinflusst worden sein. Bei einer vertikalen Beambreite von 10° kann davon ausgegangen werden, dass das vertikale Sensornetzwerk mehrheitlich innerhalb des Beamprofils lag.

Aufgrund der Sensoranordnung in zwei Stränge weist Abbildung 25 auch horizontale Feldstärkemuster auf. Die RMS-Feldstärkewerte der Verteilungen von S1-S4 sind höher als jene von S7-S10. Bei Sicht auf das Gebäude Y17 weist der rechte Sensorstrang bei der Treppe höhere Feldstärkewerte auf als der vertikale Strang auf der linken Seite, siehe Abbildung 7. Wie Abbildung 2 zeigt, befindet sich die rechte Sensorgruppe (S1-S5) ungefähr in Hauptabstrahlrichtung der Antenne, während die linke Sensorgruppe (S6-S10) ca. 25° von der Hauptstrahlrichtung entfernt liegt. Gemäss des umhüllenden Antennendiagramms resultiert dies in einer horizontalen Leistungsämpfung von ca. 0.8 dB. Zum Teil weisen die Sensoren auf gleicher Höhe deutlich grössere Dämpfungswerte zwischen dem linken und rechten Strang auf als mit der Richtungsämpfung der Umhüllenden allein erklärbar wäre. Wiederum eignet sich die Umhüllende aus dem Standortdatenblatt nicht für eine korrekte Ermittlung der horizontal auftretenden Feldstärkeunterschiede. Die Dämpfung bei einem einzelnen Beam ist oft stärker als die Gesamtheit aller Beamprofile in der Umhüllenden. Zudem ist es wahrscheinlich, dass ein Strang des Sensornetzwerks bei gewissen Beampatterns bereits am Rande des horizontalen Beamprofils (12-22°) liegt.

8.2 Statische Messungen vor jedem Sensor in der vertikalen Sensoranordnung

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurde vor jedem Sensor ein zweiminütiger Download durchgeführt. Während der forcierten Downloads wurde ein 10 GB grosses File mit einem Samsung Galaxy A53 vom Fields at Work Server heruntergeladen. Für die forcierten Downloads wurden bewusst Geräte von verschiedenen Herstellern verwendet. Der Einfluss unterschiedlicher Geräte auf die Feldstärkewerte wird jedoch nicht abschliessend untersucht. Die vertikalen grauen Bereiche kennzeichnen das Messintervall vor jedem Sensor und die horizontal verlaufenden Zeitreihen zeigen den Feldstärkeverlauf für jeden Sensor. Anders als bei der horizontalen Sensoranordnung, lässt sich hier nicht immer ein klares Muster ausmachen. Bei forciertem Download vor Sensor S2 ist die Aktivität im linken Sensorstrang bei S6-S10 höher. Bei forciertem Download vor dem Exosimeter ERF1-EM62 beim OMEN wurde auf dem rechten Sensorstrang mehr Aktivität festgestellt. Während des Downloads vor S9 und S3 lassen sich keine klaren Muster erkennen. Bei forciertem Download vor S8 ist die elektrische Feldstärke bei S7-S9 am höchsten. Der Download ist jedoch sowohl auf dem linken wie auch auf dem rechten

Sensorstrang über die gesamte Höhe zu sehen. Bei forciertem Download vor S4 sind die Feldstärkewerte bei S2-S4 erhöht. Der forcierte Download ist wiederum auf allen Sensoren sichtbar. Gleiche Trends lassen sich für die restlichen forcierten Downloads bei S7, S5 und S6/EM58 ausmachen. Sensoren S5 und S6 weisen den grössten Höhenunterschied zur Antenne auf. Bei diesen beiden forcierten Downloads treten die höchsten Feldstärkewerte nicht vor den Sensoren mit forciertem Download auf, sondern bei der darüberliegenden Sensorgruppen S2-S4 und S7-S9, respektive.

Auch wenn die Air 6488 Antenne über keinen mechanischen und digitalen Tilt verfügt, kann der Beam durch Phasen Anpassung im Array vertikal gesteuert werden. Die Sensoren bei der vertikalen Anordnung weisen Winkel von ca. 1° bis 14° gegenüber der Horizontalen auf. Bei einer vertikalen Beambreite von ca. 10° [5] kann also angenommen werden, dass das Sensornetzwerk mehrheitlich immer vom Beam abgedeckt wird. Dies erklärt die geringe Variabilität der Feldstärkeverteilung in der Vertikalen bei forciertem Download. Je nach vertikaler Lage des Beams relativ zum Sensornetzwerk lässt sich dennoch vertikales adaptives Beamforming feststellen. Bei forciertem Download vor S8, S4 und S7 wird das Feldstärkemaximum auf Höhe der Sensoren mit dem forcierten Download registriert. Aufgrund der vertikalen Beambreite von 10° wäre es möglich, dass der Beam nicht immer neu ausgerichtet wird und nur wenige vertikale Beampatterns aktiv geschaltet werden.

5. Dezember 2024

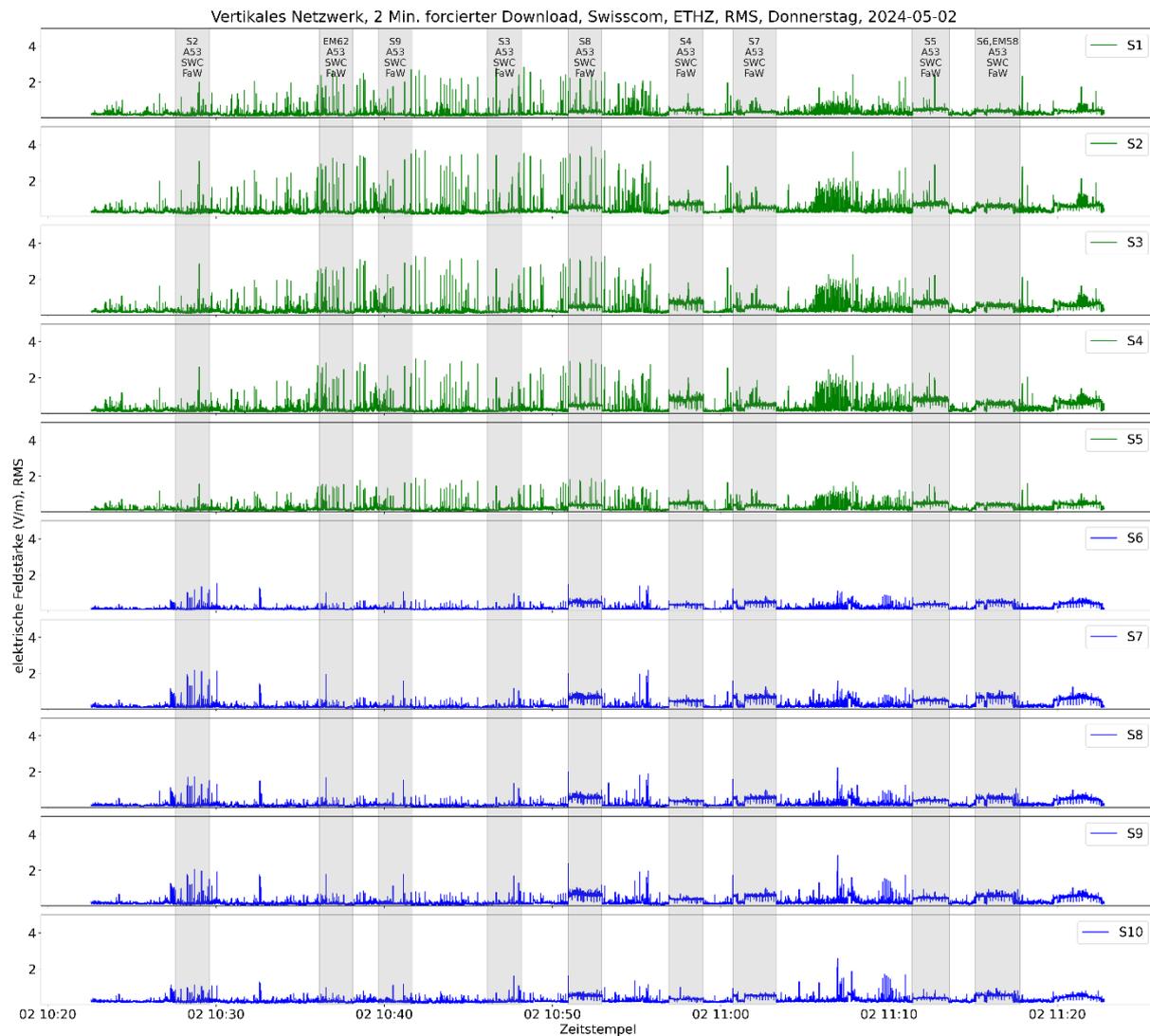


Abbildung 26: Zweiminütiger forciertes Download vor jedem Sensorelement für die vertikale Messkonfiguration. Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (RMS) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden zwei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1–S5): Rechter vertikaler Strang bei Blick in Richtung Gebäudefassade Y17, blaue Gruppe (S6–S10): Linker vertikaler Strang bei Blick in Richtung Gebäudefassade Y17. 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#) oder Nummer Exposimeter (ERF#), Gerätetyp (A53: Samsung Galaxy A53), Mobilfunknetz (SWC: Swisscom), Serverstandort (FaW: Fields at Work).

8.3 Routenmessungen vertikale Sensoranordnung

8.3.1 Routenmessung Treppe

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, befindet sich neben dem rechten Sensorstrang eine Treppe. Während des forcierten Downloads wurde die Treppe von unten nach oben und anschliessend wieder nach unten abgescritten. Durch die räumliche Anordnung der Treppe wurde der forcierte Download vor den Sensoren durchgeführt. Der vom Sensornetzwerk erfasste elektrische Feldstärkeverlauf ist in Abbildung 27 dargestellt. Es zeigt sich, dass vor allem der rechte Sensorstrang S1-S5 in der Nähe der Treppe erhöhte Feldstärkewerte aufweist. Eine Verlagerung der Feldstärkenintensität von S5 nach S1 und dann wieder zurück zu S5 ist nicht erkennbar. Allerdings weist der Sensor S1 bei Erreichen der höchsten Position (bei S2) für einen kurzen Moment die grössten Feldstärkewerte auf. Bei den Peak-Werten im rechten Teil von Abbildung 27 ist bei S3 und S4 eine Verlagerung der Feldstärkenintensität erkennbar. Zu Beginn und am Ende der Messroute treten hohe Feldstärkewerte gehäuft auf. Zum Zeitpunkt des Wendens (roter Pfeil) sind Feldstärkewerte bei diesen beiden Sensoren weniger häufig. Wie bereits in Abschnitt 8.2 festgestellt, ist der vertikale Öffnungswinkel des Beams mit 10° gross, was das Erkennen eines adaptiven Verhaltens erschwert, da das Sensornetzwerk beinahe während der gesamten Messung vom abgestrahlten Beam abgedeckt wird. Dennoch lässt sich bei den RMS- und Peakwerten eine Feldstärkeverschiebung in Abhängigkeit des forcierten Downloads beobachten. Dies deutet darauf hin, dass der Beam auch in vertikaler Richtung ausgelenkt wird. Der vertikale Winkel, unter dem das Antennenarray gesehen wird, dürfte ebenfalls einen Einfluss auch die registrierten Feldstärkewerte haben.

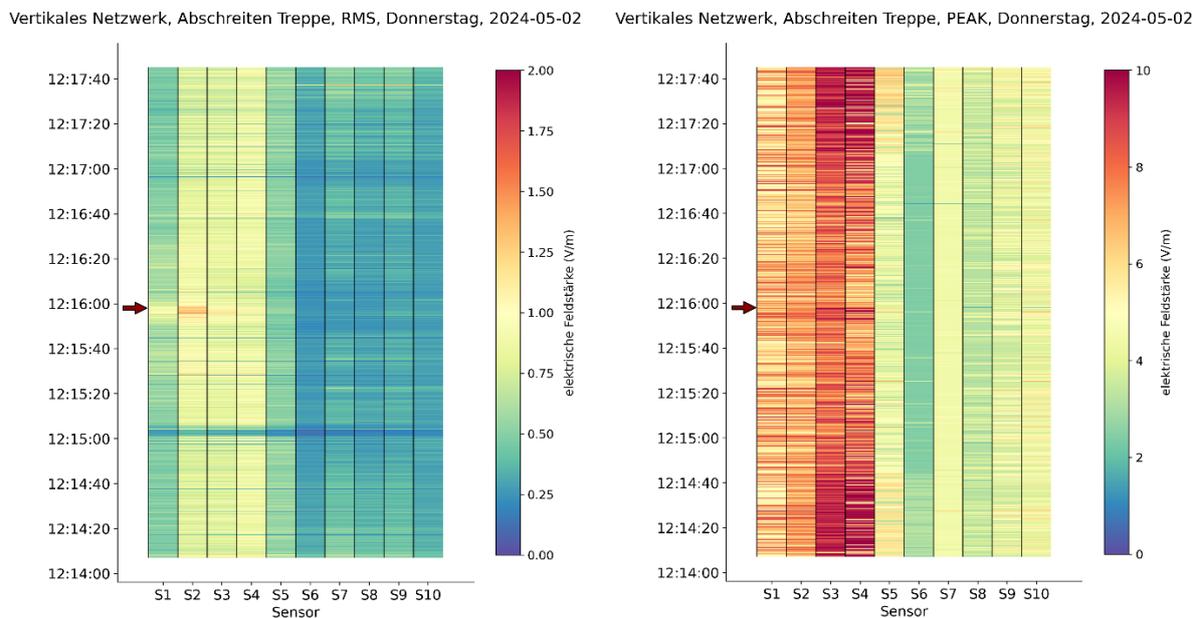
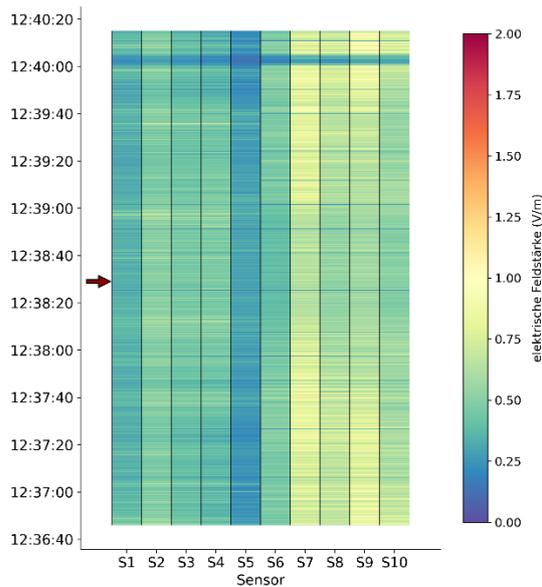


Abbildung 27: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim vertikalen Sensornetzwerk S1-S10 während forcierten Downloads beim Aufsteigen und Absteigen der Treppe neben dem rechten Sensorstrang, gemäss Abbildung 7. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Das Erreichen des Sensors S2 wird durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Treppensteigens wurde mit einem Samsung Galaxy A15 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen.

8.3.2 Abseilen Mobiltelefon

Um vertikale Effekte auch beim linken Sensorstrang S6-S10 untersuchen zu können, wurde das Mobiltelefon während des forcierten Downloads an einem Seil von S9 aus zu S6 heruntengelassen und anschliessend wieder heraufgezogen. Die resultierende Feldstärkeverteilung ist in Abbildung 28 dargestellt. Vor allem der rechte Sensorstrang S6-S10 weist erhöhte Feldstärkewerte auf. Anfänglich sind die Feldstärken über die gesamte Gruppe S7-S9 hoch. Mit fortschreitendem Absenken des Mobiltelefons nehmen die Feldstärkewerte bei den höher gelegenen Sensoren ab. Die Werte bei S10 fallen über die gesamte Messung etwas niedriger aus. Nach Erreichen von S6 (roter Pfeil) und anschliessendem Hochziehen kehrt sich das Muster um und die Feldstärkewerte nehmen für höher gelegene Sensoren wieder zu. Bei den Peak-Werten ist ebenfalls eine Verschiebung der Feldstärkenintensität von S9 zu S7 und anschliessend wieder zurück zu S9 beobachtbar. Die Peak-Feldstärkespitzen bei S1-S3 zwischen 12:37:55 und 12:38:15 werden vermutlich durch weitere Mobilfunkteilnehmer verursacht und stehen nicht im Zusammenhang mit dem forcierten Download. Abermals zeichnet sich vertikales adaptives Beamforming im gemessenen Feldstärkemuster ab.

Vertikal, Abseilen/Hochziehen S9-S6-S9, RMS, Donnerstag, 2024-05-02



Vertikal, Abseilen/Hochziehen S9-S6-S9, PEAK, Donnerstag, 2024-05-02

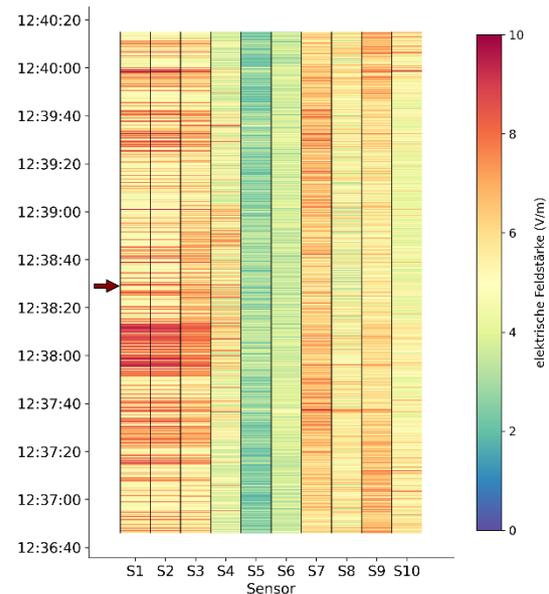


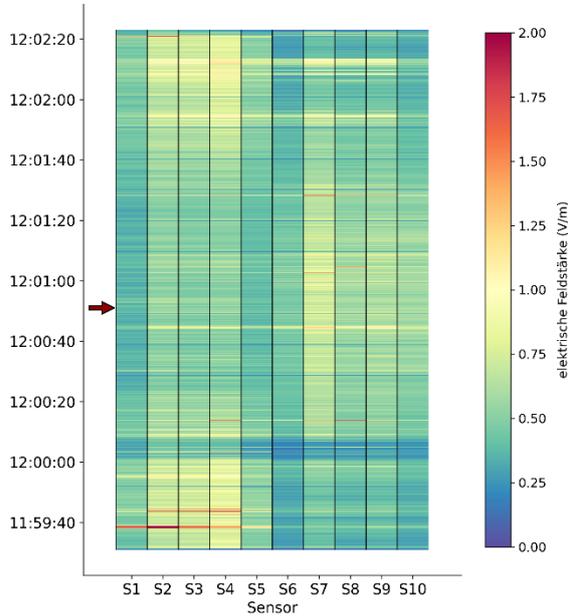
Abbildung 28: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim vertikalen Sensornetzwerk S1-S10 während forcierten Downloads beim Abseilen von S9 zu S6 und anschliessendem Hochziehen zurück in die Ausgangsposition, siehe Abbildung 7. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Das Erreichen des Sensors S6 wird durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des Abseilens wurde mit einem Samsung Galaxy A15 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen.

8.3.3 Horizontales Abschreiten der Balkone auf unterschiedlichen Höhen

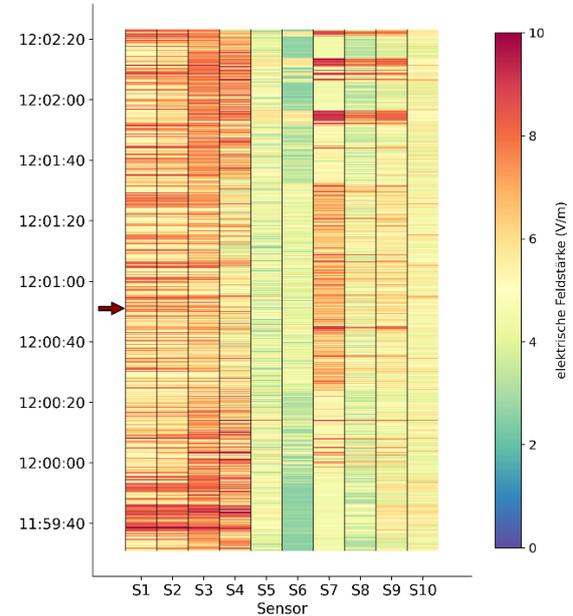
Abbildung 29 zeigt die horizontale Verlagerung der Feldstärkeintensitäten während forcierten Downloads bei Abschreiten der Fluchtbalkone auf unterschiedlichen Höhen. Das Abschreiten startet und endet jeweils beim rechten Sensorstrang (S1-S5). Der Wendepunkt liegt beim linken Sensorstrang (S6-S10) und wird durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Bei der Route auf Etage 1, weisen Sensoren S2-S4 erhöhte Feldstärkewerte auf. Ab ca. 12:00:30 verlagert sich die Feldstärkeintensität in den rechten Strang, da sich das für den forcierten Download verwendete Gerät nun näher bei dieser Sensorgruppe befindet. Der rote Pfeil kennzeichnet den Wendepunkt und anschliessend wird die Route in umgekehrter Richtung nochmals abgeschritten. Auf dem Rückweg sind ab ca. 12:01:30 die Feldstärkewerte im rechten Strang wieder höher. Die horizontale Auslenkung des Beams ist sowohl bei den RMS- wie auch bei den Peakwerten deutlich sichtbar. Verglichen mit den RMS-Feldstärkewerten von S2-S4 weist S1 über die gesamte Messung hinweg niedrigere Werte auf. Ein identisches, aber zeitlich verschobenes Muster lässt sich auch bei S7-S9 und S10 beobachten. Bei S5 und S6 sind die Werte ebenfalls niedriger, obwohl sich S5 und S6 auf Etage 1 befinden. Dieses Verhalten wurde auch in Kapitel 8.2 beobachtet und liegt vermutlich daran, dass der Sichtwinkel auf die Antenne in der untersten Etage relativ steil ist und der intensive Teil des Beams auf die darüberliegenden Sensoren gerichtet ist.

Das horizontale Abschreiten auf den Fluchttreppen wurde auf Etage 4 wiederholt. Die RMS- und Peakwerte befinden sich im unteren Panel von Abbildung 29. Erneut zeichnet sich eine Feldstärkeverlagerung vom rechten (S1-S5) zum linken (S6-S10) und wieder zurück zum rechten Sensorstrang ab. Verglichen mit den Messungen bei forciertem Download auf der ersten Etage registrierten Sensoren S1,S2 und S9,S10 vermehrt hohe Werte. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass der Beam aufgrund des forcierten Downloads auf der vierten Etage nach oben gelenkt wurde. Die Ursache für die hohen Feldstärkespitzen bis 11:44:30 bei den Peakwerten ist nicht bekannt.

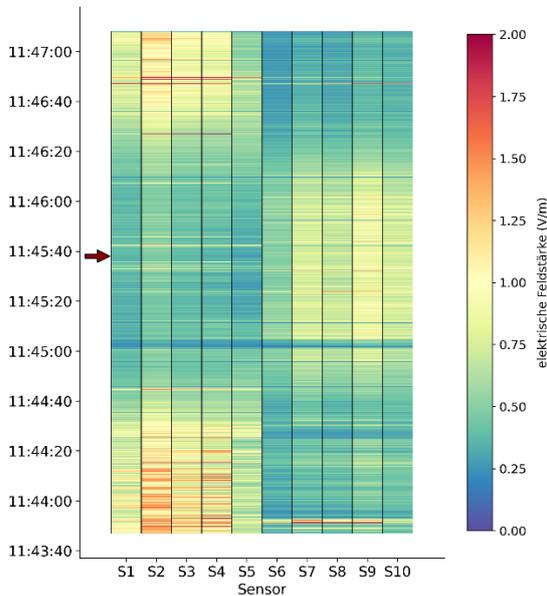
Vertikales Netzwerk, Abschreiten L1, RMS, Donnerstag, 2024-05-02



Vertikales Netzwerk, Abschreiten L1, PEAK, Donnerstag, 2024-05-02



Vertikales Netzwerk, Abschreiten L4, RMS, Donnerstag, 2024-05-02



Vertikales Netzwerk, Abschreiten L4, PEAK, Donnerstag, 2024-05-02

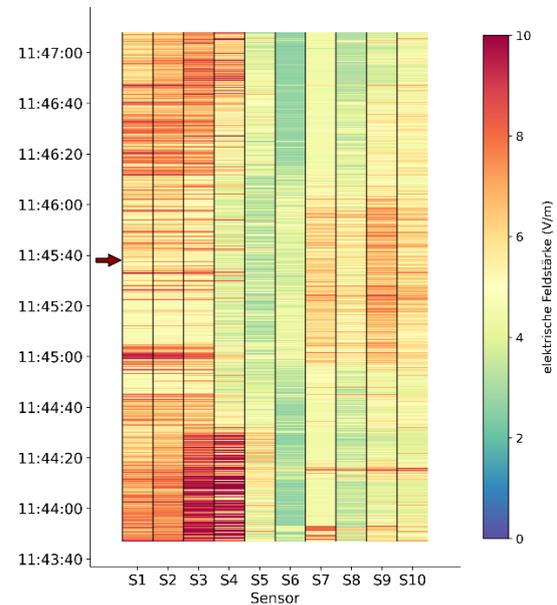


Abbildung 29: Wasserfalldiagramme des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Feldstärke beim vertikalen Sensornetzwerk S1-S10 während forcierten Downloads beim horizontalen Abschreiten (hin und zurück) der Etagen 1 und 4. Der Zeitpunkt des Messstarts liegt am unteren Ende der Ordinate. Die Zeitskala nimmt von unten nach oben hin zu. Die Feldstärkewerte lassen sich anhand des rechten Farbbalkens auslesen. Das Abschreiten startet bei der Treppe beim rechten Strang und der Wendepunkt beim linken Strang wird durch einen roten Pfeil gekennzeichnet. Links: RMS-Feldstärkewerte, Rechts: Peak-Feldstärkewerte. Während des forcierten Downloads wurde mit einem Samsung Galaxy A15 eine 10 GB grosse Datei vom Fields at Work Server heruntergeladen.

9. Power Locking

In der Regel sendet eine adaptiv betriebene Mobilfunkantenne Beams nur in jene Raumsegmente aus, in denen Mobilfunkteilnehmer versorgt werden müssen. Die ausgesendete Leistung wird dabei auf einen oder mehrere Beams aufgeteilt, welche eines oder mehrere Mobilfunkgeräte in der Zielregion versorgen. Die elektrische Feldstärke kann aufgrund der Fokussierung der Sendeleistung in ein begrenztes Raumsegment kurzzeitig stark zunehmen. Hingegen werden Raumsegmente, in denen kein Mobilfunkbedarf herrscht, nicht direkt mit einem Beam versorgt. Die Immissionswerte fallen dort entsprechend niedrig aus. Die Fähigkeit, Sendeleistung bei Bedarf in ein räumlich begrenztes Gebiet zu fokussieren, macht die adaptive Mobilfunktechnologie besonders effizient. Dass bei adaptiv betriebenen Sendeanlagen die Richtung der Beams in schneller Folge wechseln kann, führt zu einer hohen Variabilität der zeitlichen und räumlichen Feldstärkeverteilung und hat einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Exposition vor Ort. Die mittlere Exposition ist bei adaptiven Antennen oft tiefer als bei konventionellen Antennen, welche über ein gleichbleibendes Abstrahlmuster verfügen und dauerhaft aussenden. [7,8]

Für die Bewilligung einer Antenne muss die massgebende Sendeleistung ERP_n (effectively radiated power) so ermittelt werden, dass der Anlagegrenzwert bei Verwendung des umhüllenden Antennendiagramms eingehalten ist. Die Berücksichtigung der Abstrahlcharakteristik mit einem umhüllenden Antennendiagramms stellt für adaptive Antennen allerdings ein Worstcase Szenario dar, da nie alle möglichen Beams gleichzeitig und in eine Vielzahl von Richtungen abgestrahlt werden. Die Beurteilung für adaptive Antennen nach einem solchen Vorgehen ist somit besonders streng. Aufgrund der im obigen Abschnitt beschriebenen Eigenschaften von adaptiven Antennen, wird der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Sendeleistung durch einen Korrekturfaktor K_{AA} Rechnung getragen, sofern die adaptive Antenne über acht und mehr Subarrays verfügt [7,8,12]. Der Korrekturfaktor K_{AA} gibt an, um wie viel kleiner der 6-Minuten Mittelwert der Sendeleistung im adaptiven Betrieb gegenüber der möglichen Maximalleistung ist. Somit gilt für den Korrekturfaktor: $K_{AA} \leq 1$. Je grösser die Anzahl an Sub-Arrays, desto kleiner kann K_{AA} gewählt werden, da die abgestrahlten Beams fokussierter sind. Wird die bewilligte massgebende Sendeleistung ERP_n mit dem reziproken Wert des Korrekturfaktors K_{AA} multipliziert, so erhält man die maximal mögliche Sendeleistung $ERP_{max, n}$, welche in adaptivem Betrieb kurzzeitig emittiert werden darf. In diesem Modus betriebene Antennen bedürfen einer automatischen Leistungsbegrenzung, welche die Sendeleistung so einstellt, dass der gleitende 6-minütige Leistungsmittelwert die bewilligte massgebende Sendeleistung ERP_n nicht übersteigt. [7,8]

Das verwendete Sensornetzwerk erlaubt die Überprüfung der automatischen Leistungsbegrenzung der Antenne. Zu diesem Zweck wurde hinter Sensor S2 mit zwei Mobiltelefonen während 20 Minuten ein forcierter Download durchgeführt. Der Download wurde gleichzeitig gestartet und Daten wurden von verschiedenen Servern heruntergeladen, um serverseitige Bandbreitenlimitierungen zu verhindern. Abbildung 30 zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke in blau, sowie den gleitenden 6-minütigen RMS-Mittelwert in orange. Zu Beginn des forcierten Downloads ist die elektrische Feldstärke hoch und der gleitende 6-Minutenwert steigt an. Nach etwa einer Minute forcierten Downloads sinkt die elektrische Feldstärke wieder und es treten sporadisch Feldstärkespitzen auf. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass die automatische Leistungsbegrenzung eingegriffen hat und die Anzahl an Übertragungen mit hoher Sendeleistung reduziert hat, damit der 6-Minuten Mittelwert die bewilligte Sendeleistung ERP_n nicht überschreitet. Nach ca. 6 Minuten, um ca. 09:42 wiederholt sich das Muster, da aufgrund der Leistungseinsparungen der letzten Minuten wieder Kapazität frei wurde. Nach einem Zeitabschnitt mit hoher Sendeleistung greift die automatische Leistungsbegrenzung erneut ein und

drosselt die Sendeleistung. Die orange Kurve bleibt ab ca. 09:42 konstant, was ein erfolgreiches Power Locking bestätigt. Ähnliche Messergebnisse wurden vom BAKOM in einer Messserie zur Überprüfung der Implementierung von Power-Locking bei adaptiven Antennen kommuniziert. [10]

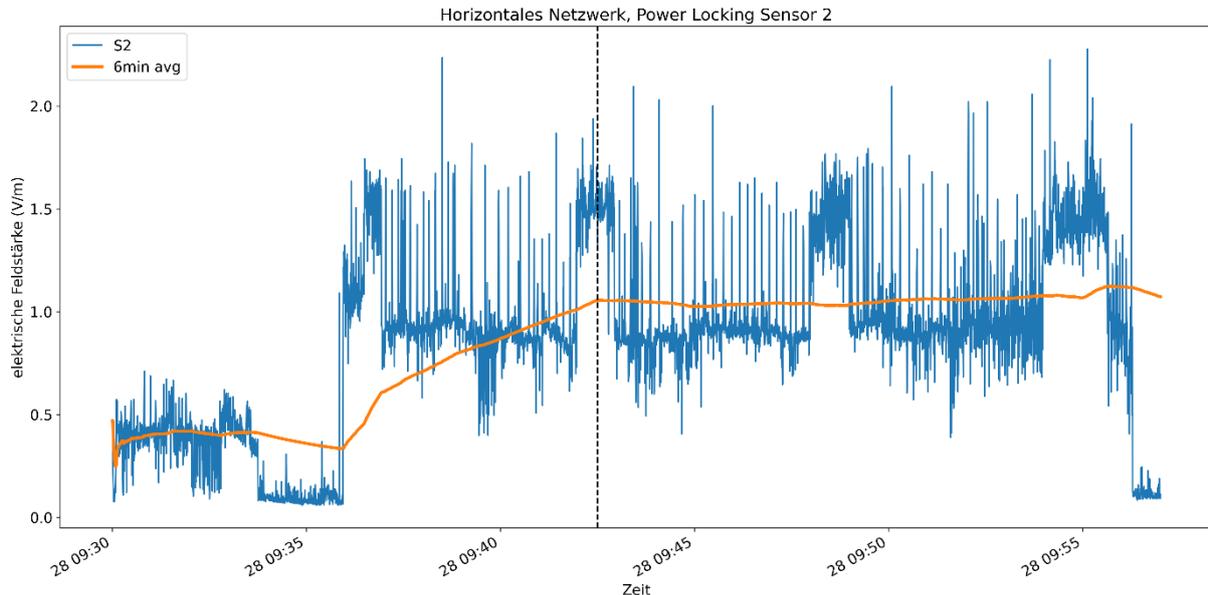


Abbildung 30: Blaue Kurve: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Feldstärke vor Sensor S2. Orange Kurve: Gleitender 6-minütiger RMS-Mittelwert. Der forcierte Download wurde am 28.03.2024 um 09:36 gestartet. Der Power-Locking Mechanismus greift bei der gestrichelten Linie erstmals ein und bleibt aktiv bis zum Messende.

10. Validierungsmessungen mit dem ExpoM-RF

Die Messergebnisse des horizontalen und vertikalen Sensornetzwerks wurden mit ExpoM-RF Expo-simetern der Firma Fields at Work [9] validiert. Wie in Abbildung 4 und in Abbildung 5 dargestellt, wurden 3 Exposimeter in der horizontalen, respektive in der vertikalen Anordnung verteilt, um Referenzfeldstärken an Tagen mit forciertem Download zu erhalten. Bei der horizontalen Anordnung wurde das Referenzexposimeter ExpoM-RF 1 neben Sensor S2 platziert. Das ExpoM-RF 2 wurde auf der Betonwand beim Georg Büchner Platz neben S6 platziert und das ExpoM-RF 3 wurde neben S10 auf dem Fluchtbalkon der ersten Etage angebracht. Das Sensornetzwerk misst im 5G-Band zwischen 3400–3800 MHz. Für die Referenzmessung mit den Exposimetern wurde bei drei Mittenfrequenzen 3475 MHz, 3605 MHz und 3735 MHz mit je 100 MHz Bandbreite gemessen. Somit ist der vom Sensornetzwerk erfasste Frequenzbereich abgedeckt. Beim Sensornetzwerk beträgt die Samplingdauer 250 ms, was 4 Messungen/s entspricht. Beim Exposimeter beträgt das Samplingintervall 2 s. Dabei werden alle konfigurierten Bänder sequenziell während 50 ms gemessen und anschliessend werden die RMS- und Peak-Werte berechnet und gespeichert [9]. Für den Vergleich der Feldstärkewerte wurde der Zeitstempel synchronisiert und die 5G-Gesamtfeldstärke wurde aus allen drei Frequenzbereichen des ExpoMs gebildet. Für Vergleichszwecke wurde die Differenz aus der 5G-Gesamtfeldstärke des Exposimeters mit der vom Sensornetzwerk erfassten Feldstärke gebildet. Dazu wurden die Messwerte des Sensornetzwerks auf ein Intervall von 2 s heruntergesampelt. Konnte während des Downsamplings aus mehreren Messwerten ausgesucht werden, wurde das Maximum verwendet.

Abbildung 31 zeigt den Vergleich der RMS- und Peak-Feldstärkewerte zwischen dem Exposimeter und Sensor S10 des Sensornetzwerks. Es zeigt sich, dass das Exposimeter sowohl bei den RMS- wie

auch bei den PEAK-Werten während der gesamten Dauer der forcierten Downloads gegenüber dem Sensor S10 höhere Feldstärkewerte erfasst hat. Dies zeigt sich auch bei der Differenz der beiden Feldstärkewerte in der blauen Kurve. Bei den Peak-Werten sind die Unterschiede zwischen dem Exposimeter 3 und dem Sensor S10 besonders stark ausgeprägt. Die RMS-Werte wurden vom Exposimeter um einen Faktor von ca. 2.5–3 höher gemessen und die Peak-Werte des Exposimeters lagen ungefähr einen Faktor 2.5 höher.

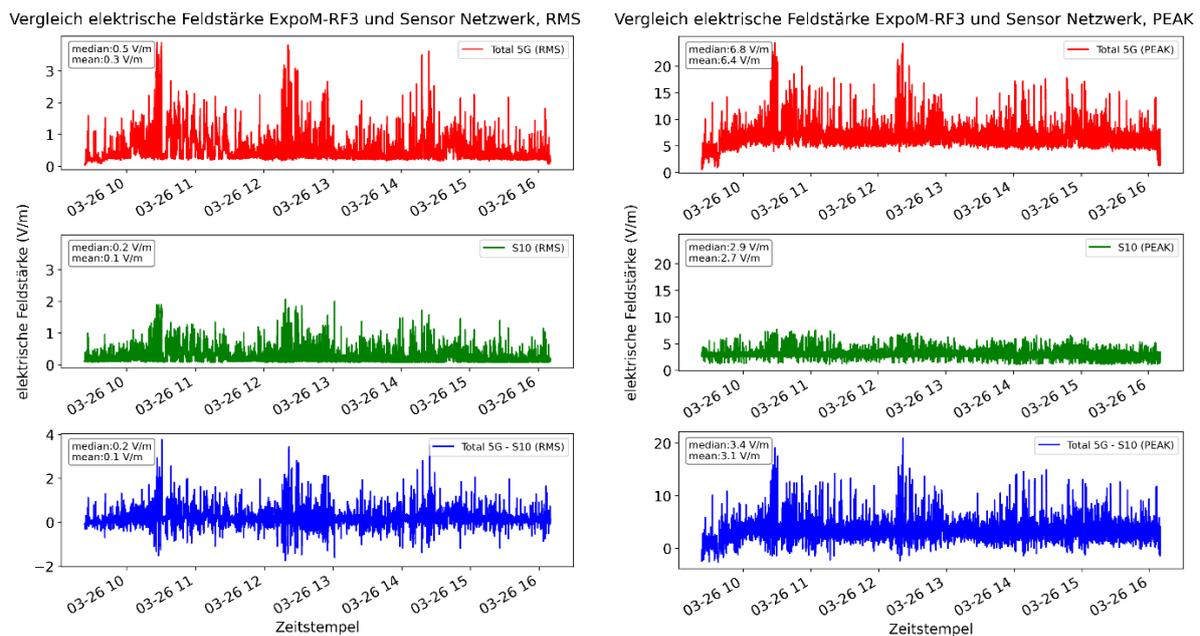


Abbildung 31: Vergleich der erfassten RMS (links) und Peak (rechts) Feldstärkewerte zwischen dem Exposimeter ExpoM-RF 3 (rot, oben) und dem Sensor S10 des Sensornetztes (grün, mitte). Die Differenz beider Feldstärkewerte ist im untersten Panel (blau, unten) dargestellt. Für die Bildung der Differenz zwischen Exposimeter und Sensornetzwerk wurden die Werte des Sensornetztes auf ein Messintervall von 2 s heruntergesampelt. Das Referenzexposimeter und S10 befinden sich auf dem ersten Stock des Fluchtbalkons von Gebäude Y17. Die Vergleichsmessungen wurden während der forcierten Downloads am 26.03.2024 durchgeführt.

Da das Sensornetzwerk die Feldstärkewerte im 5G-Band deutlich häufiger abtastet als das Exposimeter sind die Unterschiede in der Feldstärke kaum auf unterschiedliche Messzeitpunkte und die Samplingdauer zurückzuführen. Wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, neigt der Peak-Detektor bei Einzelereignissen dazu, die Feldstärkewerte von kurz auftretenden Spitzen zu unterschätzen. Durch Modifikation der Hardware und einer Anpassung der Methodik für die Ermittlung Kalibrierungsfaktoren kann diesem Verhalten bei künftigen Hardwarerevisionen entgegengewirkt werden. Die übrigen Validierungsmessungen mit den Exposimetern 1 und 2 sind im Anhang V aufgeführt und weisen ähnliche Unterschiede zwischen Sensornetzwerk und Exposimeter auf. Die grundsätzlichen Aussagen des Berichts sind aber trotz den vorhandenen Messunsicherheiten gültig.

11. Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Bericht wird ein neuartiges Sensornetzwerk für die Erfassung und Sichtbarmachung der zeitlichen und räumlichen Dynamik von adaptiv betriebenen 5G Anlagen vorgestellt. Bei der Entwicklung der Sensoren wurde ein Augenmerk auf die kostengünstige Fertigung und Kalibrierung gelegt. Das Sensornetzwerk lässt sich einfach erweitern und die Sensorelemente sind kompakt, leicht und witterungsfest. Dies erleichtert die Installation der Sensoren und das Sensornetzwerk lässt sich effizient an die örtlichen Gegebenheiten anpassen. Die Elektronik wurde für die Erfassung der elektrischen Feldstärke von 5G-Aussendungen optimiert und zeichnet sich durch einen niedrigen Energiebedarf aus. Die Erweiterung der Low-Cost Sensoren für den Einsatz in weiteren Frequenzbändern ist möglich. Durch eine geeignete Auswahl des Standortes konnte das Sensornetzwerk ausgiebig validiert werden.

Es wird gezeigt, dass durch forcierten Download sowohl die räumliche wie auch zeitliche Dynamik in der horizontalen und vertikalen Messanordnung erfasst werden kann. Wurde das User Equipment (UE) während des forcierten Downloads bewegt, wurde der Beam von der Antenne so ausgelenkt, dass das Mobiltelefon optimal versorgt wurde. Die gemessenen charakteristischen Verteilungsmuster der elektrischen Feldstärke decken sich gut mit den abgeschrittenen Routen. Es kann also festgestellt werden, dass adaptive 5G-Mobilfunkantennen Beams vorwiegend in jene Raumsegmente abstrahlen, in denen Mobilfunkbedarf herrscht. Die übrigen Gebiete ausserhalb des vom Beam abgedeckten Gebiets weisen dabei kleine Feldstärkewerte auf. Dies macht die 5G-Technologie besonders effizient und führt dazu, dass die mittlere Exposition durch elektrische Felder klein gehalten werden kann. Zu ähnlichen Schlüssen gelangte auch eine Studie mit Testmessungen zu adaptiven Antennen des BAKOMs [11]. Insgesamt war die horizontale Adaptivität der Antenne ausgeprägter als die vertikale. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Verteilungsmuster der Feldstärke nicht immer vorhersehbar sind. Dies ist besonders dann der Fall, wenn keine direkte Sichtverbindung zur Antenne besteht. In solchen Fällen konnte beobachtet werden, dass das UE durch mehrere Beams auf verschiedenen Ausbreitungswegen, welche z.T. auch Reflexionen beinhalten, versorgt wurde. Dies bedeutet, dass gewisse Verteilungen der Mobilfunknutzer auch an Orten ohne direkte Sichtverbindung erhöhte Feldstärkewerte hervorrufen können. Das hier vorgestellte Sensornetzwerk hat sich als besonders nützliches Instrument erwiesen, um solch unerwartete kurzzeitige Hotspots ausfindig zu machen. Line of Sight Routenmessungen haben gezeigt, dass beim Messort der Uplinkanteil durch TDD vernachlässigbar ist.

Durch langanhaltenden forcierten Download konnte das Eingreifen des Power-Locking Mechanismus beobachtet werden. Dies bedeutet, dass für den Betrieb der Antenne softwaremässig ein K_{AA} -Korrekturfaktor für die Ermittlung der maximal zulässigen abgestrahlten Leistung hinterlegt ist. Der sechsminütige RMS-Mittelwert der abgestrahlten Leistung darf dabei den für die Bewilligung massgebenden Leistungswert ERP_n nicht überschreiten. Die einfache Möglichkeit zur Überprüfung des gesetzlich geforderten Power-Lockings wird als wichtiger Einsatzbereich bei Kontrollmessungen im NISV-Vollzug erachtet.

Werden die Sensorelemente über einen längeren Zeitraum für das Expositionsmonitoring eingesetzt, lässt sich die Antenne und die abgestrahlten Verteilungsmuster der elektrischen Feldstärke, welche z.T. auf hinterlegte Beampatterns zurückzuführen sind, charakterisieren. Durch Dauermessung kann eine Veränderung der Exposition festgestellt werden, was eine hohe Transparenz bei der Erfassung ermöglicht. Zusätzlich stellt das Sensornetzwerk die Funktionsweise von adaptivem Beamforming auf anschauliche Weise dar. Aufgrund der kostengünstigen Fertigung der Sensorelemente wäre es

denkbar, an verschiedenen Standorten mit dem Sensornetzwerk Messungen durchzuführen und die aufbereiteten Ergebnisse im Sinne einer Öffentlichkeitsarbeit zugänglich zu machen. Ausserdem bietet sich das Sensornetzwerk für die Verwendung beim Bewilligungsprozess und im Vollzug an.

12. Literaturverzeichnis

- [1] BAKOM, «Standorte von Sendeanlagen». 30. November 2022. Verfügbar unter: <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/frequenzen-antennen/standorte-von-sendeanlagen.html>
- [2] Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung, Jahresbericht 2023 – Projektkonsortium SwissNIS, T. Ziegler, M. Rösli, D. Haas, N. Loizeau, M. Zahner, C. Stephan, J. Schindler, M. Gugler, J. Fröhlich, E. Bühlmann, M. Kovacik, 2024, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/elektrosmog-belastung/nis-expositionsmessungen.html>.
- [3] Massive MIMO Handbook, Ericsson, 2nd edition, 2023, <https://foryou.ericsson.com/Massive-MIMO-handbook-extended-version-download.html>.
- [4] iPhone 14 - Tech Specs, Apple, <https://support.apple.com/en-us/111850>, 04.09.2024.
- [5] Antenna Integrated Radio Unit AIR 6488, Ericsson, 2019.
- [6] Standortdatenblatt ZHUU, Swisscom, Rev. 1.19, 2021.
- [7] BAFU, Erläuterungen zu adaptiven Antennen und deren Beurteilung gemäss der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), 23.2.2021, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/mitteilungen.msg-id-82401.html>
- [8] Adaptive Antennen. Nachtrag vom 23. Februar 2021 zur Vollzugsempfehlung zur Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) für Mobilfunk- und WLL-Basisstationen, BUWAL 2002., BAFU, Umwelt-Vollzug Nr. 2107, 16, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/mitteilungen.msg-id-82401.html>.
- [9] ExpoM-RF 4, Fields at Work, <https://fieldsatwork.ch/products/expom-rf/expom-rf4/>, Stand: 06.10.24.
- [10] BAKOM, «Validierungsberichte vom 8. Juli 2021 zur automatischen Leistungsbegrenzung bei (Swisscom, Salt, Sunrise)», <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/5g/voraussetzungen-zum-betrieb-adaptiver-antennen-sind-erfullt.html>, Stand: 07.10.2024.
- [11] BAKOM, «Testkonzession und Messungen adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1)», 24.09.2020, <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/5g/erste-tests-und-messungen-mit-adaptiven-antennen.html>.
- [12] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung, NISV, AS 2000 213, <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2000/38/de>.

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 4'644'873 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.09	0.08
std	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.07	0.06	0.06	0.05
min	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
5%	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
25%	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.06	0.04
50%	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08
75%	0.05	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.1	0.09
95%	0.07	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.15	0.14	0.17	0.14
max	0.6	2.14	1.77	1.53	1.96	1.73	2.07	2.5	2.53	2.65	2.35

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 4'644'873 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.52	0.92	1.17	1.31	1.34	1.5	1.7	1.87	2.12	2.14	1.88
std	0.26	0.52	0.65	0.69	0.67	0.8	0.95	1.18	1.33	1.12	1.04
min	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
5%	0.12	0.24	0.23	0.25	0.21	0.18	0.13	0.1	0.13	0.2	0.14
25%	0.39	0.44	0.36	0.55	0.91	0.66	0.6	0.83	0.82	1.75	0.94
50%	0.59	0.91	1.3	1.6	1.67	1.89	2.16	2.04	2.3	2.62	2.37
75%	0.68	1.12	1.46	1.66	1.72	2.01	2.28	2.71	3.19	2.78	2.48
95%	0.94	1.75	2.1	1.85	1.86	2.27	2.46	3.67	3.47	3.32	2.66
max	3.05	8.78	11.53	7.94	8.84	10.55	7.31	8.51	10.42	8.73	8.51

II Statistische Kennwerte für den Normalbetrieb und den forcierten Download

Tabelle 4: Statistische Kenndaten der S1-S11 RMS-Feldstärkewerte am 19.03.2024 während einer Periode des Normalbetriebs zwischen 10:00 und 14:40. 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: 64'541.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.07	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.14	0.13	0.17	0.14
std	0.02	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.1	0.11	0.12	0.1
min	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07
5%	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.09	0.08
25%	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.11	0.1
50%	0.06	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.1	0.13	0.11
75%	0.07	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.14	0.13	0.17	0.14
95%	0.11	0.18	0.17	0.16	0.17	0.18	0.2	0.29	0.28	0.36	0.32
max	0.39	0.99	1.77	1.3	1.38	1.22	1.18	1.97	2.17	2.33	2.07
IQR	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.06	0.05

Tabelle 5: Statistische Kenndaten der S1-S11 Peak-Feldstärkewerte am 19.03.2024 während einer Periode des Normalbetriebs zwischen 10:00 und 14:40. 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: 64'541.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.72	1.45	1.82	1.72	1.77	2.14	2.38	2.62	2.48	2.96	2.6
std	0.13	0.48	0.41	0.4	0.35	0.25	0.35	0.77	0.73	0.59	0.64
min	0.46	0.58	1.1	0.44	0.64	1.55	0.4	0.59	1.81	0.85	0.71
5%	0.57	0.91	1.3	1.48	1.6	1.96	2.2	1.86	1.86	2.36	2.28
25%	0.65	1.12	1.51	1.6	1.65	2.05	2.27	2.08	1.92	2.69	2.33
50%	0.69	1.39	1.78	1.64	1.67	2.1	2.31	2.4	2.28	2.81	2.37
75%	0.77	1.64	2.01	1.68	1.73	2.16	2.34	2.85	2.81	3.09	2.48
95%	0.99	2.4	2.54	2.48	2.39	2.42	3.04	4.24	3.65	4.11	4.11
max	2.13	6.99	6.65	6.05	5.97	6.28	6.48	8.51	9.6	8.73	7.74
IQR	0.13	0.52	0.5	0.08	0.07	0.11	0.07	0.77	0.89	0.4	0.15

5. Dezember 2024

Tabelle 6: Statistische Kenndaten der S1-S11 RMS-Feldstärkewerte am 26.03.2024 während einer Periode des forcierten Downloads zwischen 10:00 und 14:40. 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: 64'440.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.1	0.18	0.18	0.19	0.21	0.21	0.26	0.24	0.23	0.27	0.24
std	0.06	0.16	0.17	0.19	0.22	0.21	0.29	0.22	0.22	0.27	0.25
min	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07
5%	0.05	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.1	0.09
25%	0.06	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.1	0.09	0.12	0.1
50%	0.07	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.13	0.12	0.16	0.13
75%	0.11	0.2	0.21	0.22	0.25	0.25	0.31	0.32	0.29	0.35	0.28
95%	0.24	0.5	0.57	0.61	0.73	0.66	0.92	0.68	0.71	0.81	0.72
max	0.6	1.99	1.59	1.51	1.68	1.63	2.19	1.69	1.82	2.06	2.01
IQR	0.05	0.12	0.12	0.14	0.17	0.16	0.22	0.22	0.2	0.23	0.18

Tabelle 7: Statistische Kenndaten der S1-S11 Peak-Feldstärkewerte am 26.03.2024 während einer Periode des forcierten Downloads zwischen 10:00 und 14:40. 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: 64'440.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
mean	0.76	1.61	2.04	2.04	2.2	2.39	2.75	2.61	2.72	3.06	2.85
std	0.22	0.79	0.87	0.74	0.88	0.93	1.03	0.75	0.78	0.75	0.86
min	0.34	0.73	1.15	0.57	0.64	0.57	0.46	0.7	1.72	1.07	0.69
5%	0.56	0.95	1.3	1.48	1.64	1.85	2.12	1.85	1.85	2.39	2.4
25%	0.61	1.13	1.51	1.64	1.72	1.88	2.21	2.06	2.12	2.64	2.48
50%	0.67	1.36	1.81	1.7	1.77	1.92	2.25	2.4	2.48	2.8	2.56
75%	0.83	1.73	2.16	2.17	2.28	2.36	2.76	2.88	3.23	3.3	2.71
95%	1.2	3.3	3.91	3.67	4.35	4.58	5.33	4.19	4.19	4.61	4.94
max	2.62	9.36	9.12	7.5	6.95	8.3	7.99	7.04	7.99	7.69	8.14
IQR	0.22	0.6	0.64	0.53	0.57	0.48	0.55	0.82	1.12	0.65	0.23

5. Dezember 2024

III Statistische Kennwerte der RMS- und Peak-Messwerte der vertikalen Sensoranordnung

Tabelle 8: Statistische Kenndaten der Feldstärkeverteilung der RMS-Messung gruppiert nach Sensor in der vertikalen Anordnung. Das fünfzigste Perzentil entspricht dem Median. Die untersuchte Datengesamtheit umfasst 5'841'499 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
mean	0.15	0.19	0.14	0.13	0.09	0.08	0.1	0.1	0.13	0.14
std	0.12	0.16	0.12	0.12	0.07	0.05	0.08	0.08	0.1	0.1
min	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
5%	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
25%	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.09
50%	0.14	0.18	0.13	0.12	0.09	0.08	0.1	0.1	0.12	0.13
75%	0.2	0.25	0.19	0.16	0.11	0.1	0.12	0.12	0.16	0.17
95%	0.3	0.38	0.29	0.27	0.18	0.15	0.2	0.2	0.26	0.26
max	3.88	4.63	4.18	4.98	2.36	2.66	3.43	3.4	4.44	4.63

Tabelle 9: Statistische Kenndaten der Feldstärkeverteilung der Peak-Messung gruppiert nach Sensor in der vertikalen Anordnung. Das fünfzigste Perzentil entspricht dem Median. Die untersuchte Datengesamtheit umfasst 5'841'499 Messpunkte.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
mean	4.23	4.45	4.15	3.19	1.92	1.86	3.26	2.66	3.25	3.33
std	2.62	2.7	2.52	1.98	1.22	1.11	1.86	1.59	2.02	1.92
min	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
5%	0.06	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.09
25%	4.22	4.52	4.11	2.96	1.59	1.21	1.55	2.16	3.21	3.38
50%	4.58	5	4.58	3.6	2.08	2.25	4.16	3.15	3.51	3.76
75%	5.26	5.57	5.3	3.88	2.62	2.59	4.41	3.36	4.01	4.14
95%	8.46	8.51	7.89	6.05	3.86	3.13	4.7	4.78	6.44	6.12
max	11.97	12.52	14.2	15.72	8.4	9.12	11.53	10.82	12.76	12.92

5. Dezember 2024

IV Statische Messungen vor jedem Sensor in der vertikalen Sensoranordnung, Peak-Werte

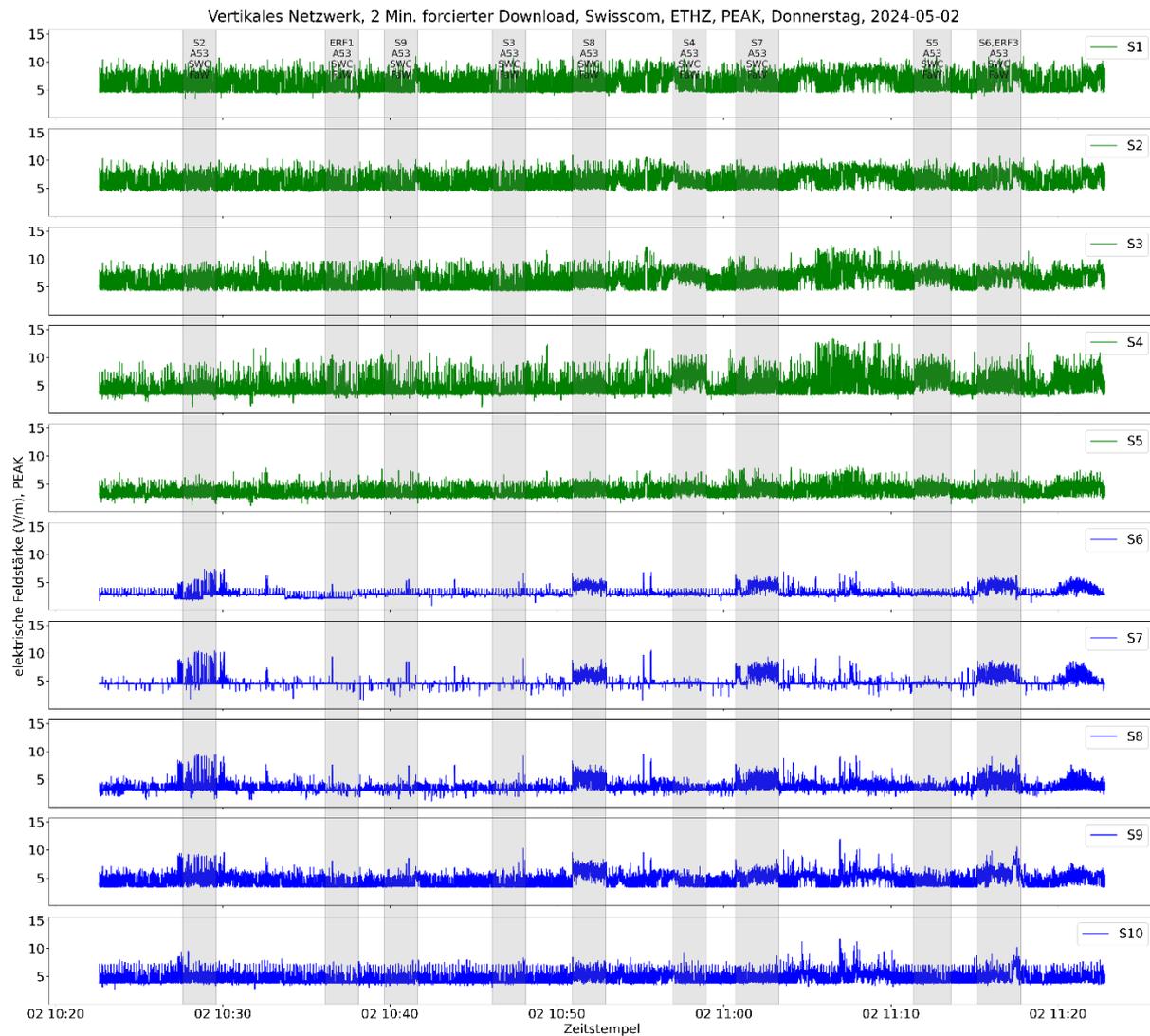
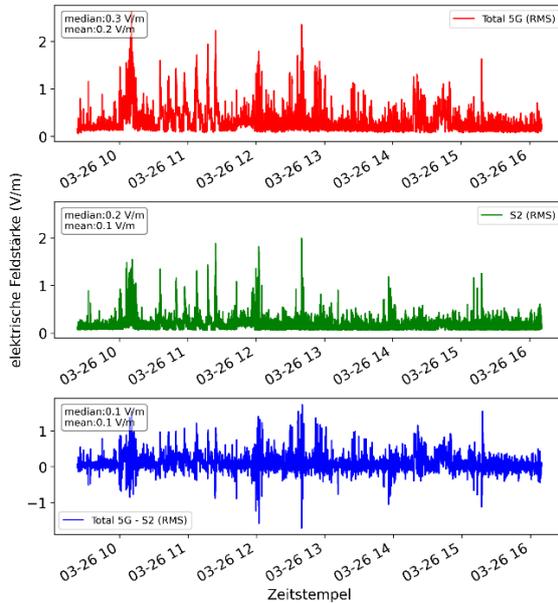


Abbildung 32: Zweiminütiger forciertes Download vor jedem Sensorelement für die vertikale Messkonfiguration. Jede Zeile zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke (Peak) des entsprechenden Sensorelements. Abhängig vom Montageort des Sensors werden zwei räumliche Gruppen unterschieden: Grüne Gruppe (S1–S5): Rechter vertikaler Strang bei Blick in Richtung Gebäudefassade Y17, blaue Gruppe (S6–S10): Linker vertikaler Strang bei Blick in Richtung Gebäudefassade Y17. 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#) oder Nummer Exposimeter (ERF#), Gerätetyp (A53: Samsung Galaxy A53), Mobilfunknetz (SWC: Swisscom), Serverstandort (FaW: Fields at Work).

V Validierungsmessungen mit dem ExpoM-RF

Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF1 und Sensor Netzwerk, RMS



Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF1 und Sensor Netzwerk, PEAK

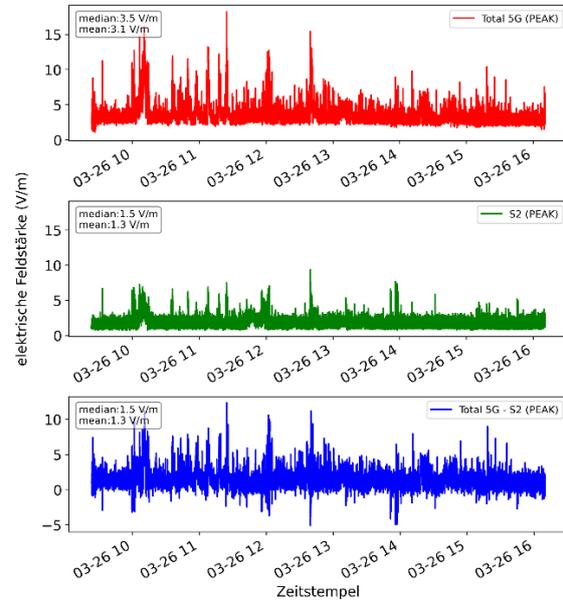
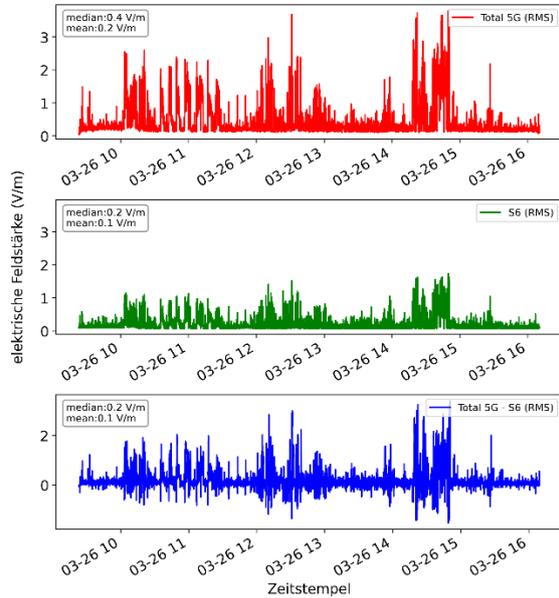


Abbildung 33: Vergleich der erfassten RMS (links) und Peak (rechts) Feldstärkewerte zwischen dem Exposimeter ExpoM-RF 1 (rot, oben) und dem Sensor S2 des Sensornetzes (grün, mitte). Die Differenz beider Feldstärkewerte ist im untersten Panel (blau, unten) dargestellt. Für die Bildung der Differenz zwischen Exposimeter und Sensornetzwerk wurden die Werte des Sensornetzes auf ein Messintervall von 2 s heruntergesampelt. Das Referenzexposimeter und S2 befinden sich an einem Betonpfeiler des Säulengangs bei Gebäude Y24. Die Vergleichsmessungen wurden während der forcierten Downloads am 26.03.2024 durchgeführt.

Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF2 und Sensor Netzwerk, RMS



Vergleich elektrische Feldstärke ExpoM-RF2 und Sensor Netzwerk, PEAK

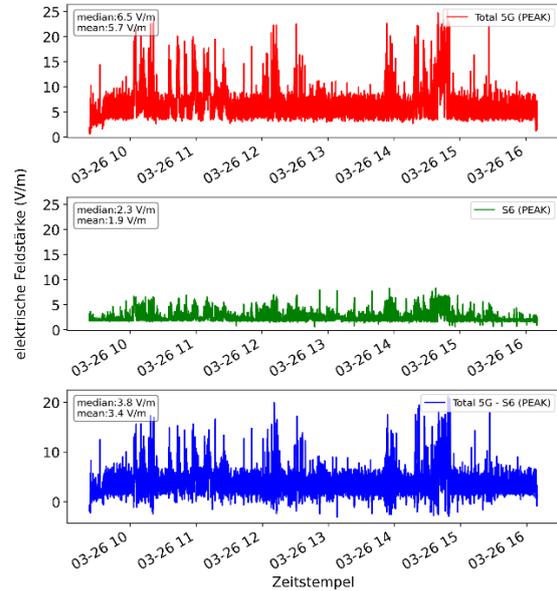


Abbildung 34: Vergleich der erfassten RMS (links) und Peak (rechts) Feldstärkewerte zwischen dem Expositometer ExpoM-RF 2 (rot, oben) und dem Sensor S6 des Sensornetzes (grün, mitte). Die Differenz beider Feldstärkewerte ist im untersten Panel (blau, unten) dargestellt. Für die Bildung der Differenz zwischen Expositometer und Sensornetzwerk wurden die Werte des Sensornetzes auf ein Messintervall von 2 s heruntergesampelt. Das Referenzexpositometer und S6 befinden sich auf einer Betonmauer auf dem Georg Büchner Platz. Die Vergleichsmessungen wurden während der forcierten Downloads am 26.03.2024 durchgeführt.