

Grolimund + Partner AG
Entfelderstrasse 45, 5000 Aarau, T 062 836 30 30
www.grolimund-partner.ch



Pilotprojekt

Monitoring adaptiver Antennen mittels eines räumlichen Sensornetzes

Schlussbericht

Aarau / Zürich, Oktober 2022
Im Auftrag des Kantons Aargau, BVU-AFU



Impressum

Projektteam FaW/G+P

Marco Zahner, Jürg Fröhlich, Fields at Work GmbH, Hegibachstrasse 41, 8032 Zürich
Erik Bühlmann, Michal Kovacik, Toni Ziegler, Grolimund + Partner AG

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.6	16.01.2023	mz, jf, zi	Schlussbericht	Auftraggeber

Inhalt

1	Einführung und Ziele	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Ziele	5
2	Standorte	6
2.1	Auswahl der adaptiv betriebenen 5G Antenne	6
2.2	Auswahl der Mess-Standorte für die Langzeitmessung	7
3	Vorgehen und Methoden	9
3.1	Messgeräte und Einstellungen	9
3.2	Langzeitmessung	9
3.3	Messgeräte und Aufbauten für die hochaufgelösten Vergleichsmessungen	10
3.3.1	Real-Time Spectrum Analyzer (RTSA)	10
3.3.2	Oszilloskop	10
3.4	Messungen mit forciertem «Traffic» / 'Worst-case'-Abschätzungen	11
3.4.1	Standorte Traffic-Test	11
3.4.2	Messprotokoll	13
4	Übersicht der erfassten Messgrößen und Beurteilung der Grenzwertausschöpfung	14
4.1	Definition und Geltungsbereich der Grenzwerte	14
4.2	Definition und Erfassung der relevanten Messgrößen	14
5	Resultate Langzeitmessung	16
5.1	Zeitverläufe Standort 'OMEN' (Mai / Juni 2022)	19
5.1.1	Total über alle Bänder 3G/4G/5G	20
5.1.2	3G Band	21
5.1.3	4G Bänder (inkl. 5G-NRR nicht-adaptiv)	22
5.1.4	5G Band (5G-NR-adaptiv)	25
5.1.5	Fazit zum Standort 'OMEN'	26
5.2	Zeitverläufe Standort Büro Obergeschoss Kt. AG (April 2022)	27
5.2.1	Total über alle Bänder 3G/4G/5G	27
5.2.2	3G Band	28
5.2.3	4G Bänder	29
5.2.4	5G Band	31
5.2.5	Fazit zum Standort 'Kt. AG'	32
5.3	Zeitverläufe Standort Büro G+P (April 2022)	32
5.3.1	Total über alle Bänder 3G/4G/5G	33
5.3.2	3G Band	34
5.3.3	4G Bänder	35
5.3.4	5G Band	37
5.3.5	Fazit zum Standort G+P	38
5.4	Fazit der Langzeitmessungen	39
6	Resultate der hochaufgelösten Messungen	40
6.1	Messung mit RTSA	40

6.2	Messung mit Oszilloskop	40
6.2.1	Oszilloskop: Kurzzeitverläufe.....	41
6.2.2	Gegenüberstellung (3650 MHz).....	44
7	Resultate Messung adaptive Antenne	45
7.1	Messungen mit forciertem Traffic	45
7.1.1	Übertragungsgeschwindigkeiten Mobilfunknetz (Netzeffizienz)	45
7.1.2	“Beamforming” Beobachtung.....	46
7.1.3	Feldstärke-Verlauf (Standort ‘OMEN’)	48
7.1.4	Feldstärke und Datenrate	48
7.2	Analyse Gebäudedämpfung.....	48
8	Fazit und Ausblick	50

1 Einführung und Ziele

1.1 Ausgangslage

Die Emissionen adaptiver Antennen im für die Beurteilung nach NISV massgebenden Betriebszustand lassen sich aufgrund ihrer variablen Abstrahlungscharakteristik nicht «konventionell» mit einem Messgerät direkt erfassen. Für die Beurteilung der Feldstärke-Exposition werden deshalb nicht die eigentlichen «Datensignale» gemessen, sondern ein Signalisierungskanal mit (während der Messung) konstanter Sendeleistung. Daraus wird die maximal zu erwartende Feldstärke mit einem Hochrechnungsfaktor ermittelt, welcher unter anderem auf Angaben des Antennenherstellers und des Antennenbetreibers basiert. Zudem wurde in der NISV mit der Einführung der adaptiven Antennentechnologie die Definition des massgebenden Betriebszustands angepasst. Für adaptive Antennen wurde ein Korrekturfaktor eingeführt, welcher der räumlichen Mittelung der abgestrahlten Leistung Rechnung trägt. Neuerdings sind kurzzeitige Spitzen in der Feldstärke zulässig, sofern der Anlagegrenzwerts (AGW) im 6-Minuten Mittel nicht überschritten wird. Dies muss seitens Betreiber mit der Implementierung einer automatischen Leistungsbegrenzung garantiert werden. Eine lückenlose Kontrolle dieser Betreiberangaben ist allerdings nicht möglich. Diese indirekte Bestimmung der maximal auftretenden Feldstärken wird von Kritikern und Gegnern der 5G-Technologie als Intransparenz gewertet und stark kritisiert.

1.2 Ziele

Wichtigstes Ziel dieses Projektes ist die Erfassung der real anzutreffenden Expositionsfeldstärken unter praxisnahen Bedingungen mit niedrigem und hohem Mobilfunk-Datenverkehr. Dies ermöglicht eine Validierung der von der Vollzugsbehörde angewendeten Methoden und Hochrechnungsfaktoren bei Abnahmemessungen sowie die Repräsentativität der Messwerte der vom Kanton eingesetzten Messgeräte (ExpoM-RF 4). Der Fokus liegt dabei auf dem 5G Standard und dessen spezifischen Eigenschaften (Signalformen, adaptive Antennen). Wo dies machbar ist, werden auch Vergleiche mit den anderen Mobilfunkstandards durchgeführt welche aktuell in Betrieb sind (primär 4G). Ein weiteres Ziel besteht in der Erarbeitung der technischen Voraussetzungen für ein "low-cost" Monitoring-Netz zur Erfassung der zeitlichen und sektoriellen Dynamik von adaptiven Antennen. Dies beinhaltet die Ermittlung der nötigen Anforderungen, die ein Sensor erfüllen muss, um die relevanten statistischen Grössen von Feldstärke, Dynamik, Verlauf etc. eines 5G Netzwerks erfassen zu können. Diese Punkte werden im Rahmen einer Pilotmessung um eine ausgewählte Anlage in Aarau im Kanton Aargau untersucht. Die Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Anlage waren: 1. eine «nennenswerte» bewilligte Sendeleistung im Frequenzband um 3.5 GHz und 2. Ein gleichzeitig aktiver anderer Mobilfunkstandard (mindestens 4G) auf der gleichen Anlage. Dies erlaubt entsprechende Vergleiche zwischen den verschiedenen Mobilfunkstandards.

2 Standorte

2.1 Auswahl der adaptiv betriebenen 5G Antenne

Mit Unterstützung der Vollzugsbehörde wurde der Antennenstandort auf dem Gebäude am Gönhardweg 8 in Aarau ausgewählt.

Dienste und Frequenzen

Auf der ausgewählten Anlage sind Dienste der 3G, 4G und 5G Mobilfunkgeneration in 7 verschiedenen Frequenzbändern aktiv. Die Details gemäss BAKOM – Datenbank sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Sendefrequenz (MHz)	Generation	Diensttyp	Bewilligte Leistung (W)
780.5	4G	LTE 700 FDD	445.66
806.0	4G	LTE 800	368.13
947.6	3G	UMTS 900	357.27
1815.1	4G	LTE 1800	468.81
2130.3	4G	LTE 2100	243.22
2130.3	5G	NR < 3 GHz ('nicht adaptiv')	243.22
2655.0	4G	LTE 2600	137.72
3650.0	5G	NR > 3 GHz ('adaptiv')	988.55

Tabelle 1: Aktive Frequenzen und Dienste der ausgewählten Anlage (Sektor 3)

Der Anteil von 5G 'nicht-adaptiv' wird im Folgenden als 4G mitgemessen und kann nicht weiter vereinzelt werden. Dazu wäre eine Unterscheidung der Technologien innerhalb eines Bandes nötig, was ein separates Projekt darstellen würde.

2.2 Auswahl der Mess-Standorte für die Langzeitmessung

Für die geplanten Langzeitmessungen wurden drei verschiedene Orte innerhalb dem Versorgungssektor der Antenne bestimmt. Die Kriterien für die Auswahl dieser Standorte sind: 1. Sichtverbindung zur Antenne, 2. ähnliche Distanz (Luftlinie) aber unterschiedliche Blickwinkel auf die Antenne (zentrale und periphere Senderichtung), um den Einfluss von "Beamforming" in der Praxis beobachten zu können. Mindestens ein Standort soll ein «leistungslimitierender» OMEN sein. Die Wahl fiel auf folgende Standorte:

- OMEN: Privatwohnung Zelglistr. 1A, (OMEN, Limitierend für die maximal mögliche Sendeleistung der gewählten Antennenanlage)
- Büro G+P: Büro Grolimund und Partner AG (G+P), Entfelderstrasse 45 (Erdgeschoss, Arbeitsplatz OMEN)
- Kt. AG: Büro Verwaltung Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Entfelderstrasse 22 (Dachgeschoss, Arbeitsplatz OMEN)

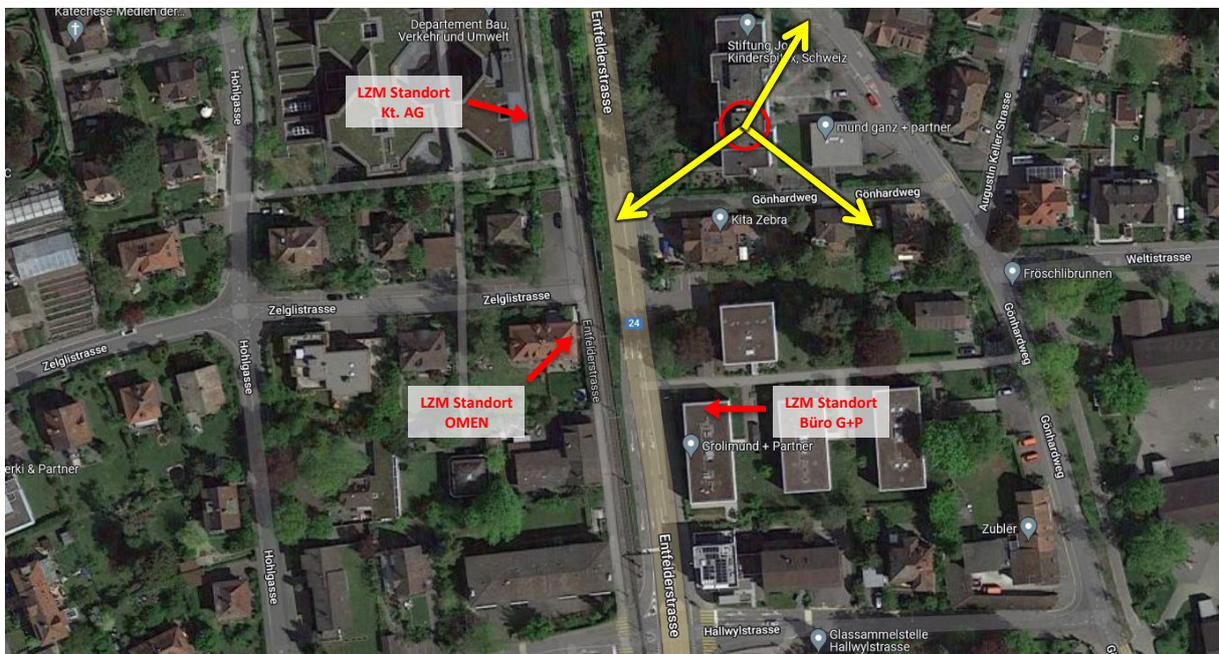
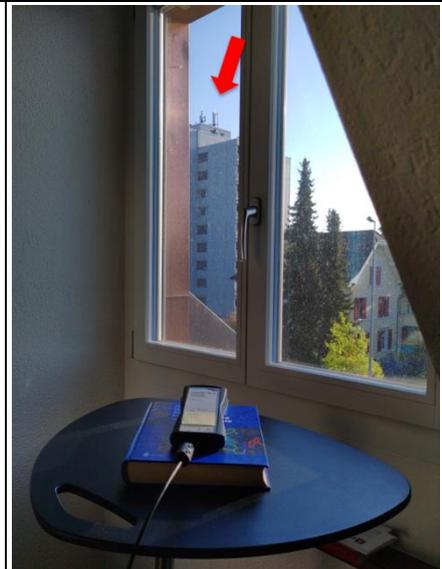


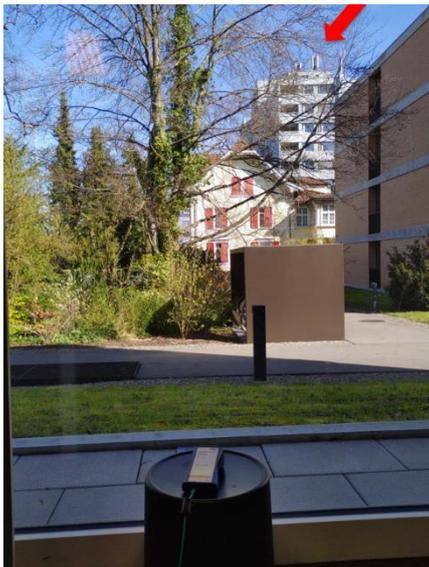
Abbildung 1: Situationsplan Langzeitmessungen. Die Grafik zeigt die Positionen der drei Langzeit-Messstationen (rote Pfeile) und die Ausrichtung der drei Sektoren der untersuchten Mobilfunkanlage (gelb).



Standort OMEN (Aussenansicht)



Standort OMEN (Messgerät LZM)



Standort Büro G+P (Messgerät LZM)



Standort Kt. AG (Messgerät LZM)

Abbildung 2: Übersicht der Standorte, an denen die Langzeitmessungen durchgeführt wurden. Die roten Pfeile zeigen auf die untersuchte Mobilfunkanlage. Diese ist von allen Standorten aus direkt sichtbar.

3 Vorgehen und Methoden

Um auf die einzelnen Fragestellungen einzugehen, wurden 3 verschiedene Arten von Messungen durchgeführt:

- Langzeitmessung: Erfassung typischer Tagesverläufe und Extremwerte unter normalen Bedingungen während der Dauer von mindestens einer Woche an den 3 ausgewählten Standorten
- Messungen mit forciertem Datenverkehr ('Traffic'): Beobachtung der Dynamik der Exposition bei unterschiedlichen Auslastungen des Mobilfunknetzes, Erzeugung von 'Worst-case'-Bedingungen zur Triggerung von Extremwerten.
- Vergleichsmessung mit hochaufgelösten Messinstrumenten: Das ExpoM-RF liefert die wichtigsten statistischen Größen der erfassten Signale (der Effektivwert und der Peak-Wert während der jeweiligen Messdauer), jedoch keine Detailinformationen über den kurzzeitigen Verlauf der Messgröße.

Deshalb wird ein direkter Vergleich zwischen ExpoM-RF Messung und einer Messung mit Laborinstrumenten mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. Diese Messung dient einerseits der Validierung der ExpoM-RF Messwerte und erlaubt gleichzeitig eine detaillierte Visualisierung der real anzutreffenden Mobilfunksignale. Dies wiederum kann als Leitfaden dienen, um die vom ExpoM-RF gemessenen statistischen Größen korrekt zu interpretieren.

3.1 Messgeräte und Einstellungen

Die Konfiguration der ExpoM-RF (Version 4) Messgeräte wurde auf das Messobjekt zugeschnitten. Die Liste der gemessenen Bänder deckt die auf der ausgewählten Antenne aktiven 3G- und 4G Downlink-Bänder sowie das von 5G benutzte Frequenzband um 3.5 GHz ab. Auf die Erfassung zusätzlicher Frequenzbänder wurde verzichtet, um das Messintervall möglichst kurz zu halten (2 Sekunden). Die entsprechende Bänderliste ist in Tabelle 2 aufgeführt. Diese Einstellungen wurden für sämtliche ExpoM-RF Messungen verwendet.

Bezeichnung Frequenzband	Mittenfrequenz	Bandbreite	Dienst	Weitere Einstellungen
11-0771M-dl	770.5 MHz	35 MHz	4G	Intervall: 2s Messbereich: 0.02 - 20 V/m GPS: OFF WiFi: OFF
12-0809M-dl	808.5 MHz	35 MHz	4G	
15-0943M-dl	942.5 MHz	35 MHz	3G	
18-1843M-dl	1842.5 MHz	75 MHz	4G	
21-2145M-dl	2145 MHz	75 MHz	4G	
25-2657M-dl	2657 MHz	75 MHz	4G	
36-3650M-nr	3650 MHz	100 MHz	5G	

Tabelle 2: ExpoM-RF Bänderliste

3.2 Langzeitmessung

Für die Langzeitmessung wurden die ExpoM-RF Geräte an den jeweiligen Standorten positioniert (Abbildung 2) und via USB-Kabel und Netzteil mit Strom versorgt. Um allfällige dadurch verursachte Antenneneffekte zu minimieren, wurden die USB-Kabel mit Klappferriten versehen. Die ExpoM-RF wurden jeweils im Teil des Gebäudes positioniert, welcher der Antenne am nächsten ist.

An allen drei Langzeitmessung-Standorten konnten die Messgeräte so positioniert werden, dass eine Sichtverbindung (durch ein Fenster hindurch) zur Antenne besteht. Dies in der Annahme, dass Fenster im Vergleich zu Mauerwerk, Fassadenverkleidungen, etc. elektromagnetische Strahlung weniger stark dämpfen.

3.3 Messgeräte und Aufbauten für die hochaufgelösten Vergleichsmessungen

3.3.1 Real-Time Spectrum Analyzer (RTSA)

Der Signal Shark der Firma Narda (Narda Safety Test Solutions, USA) ist ein portabler Echtzeit-Spektrum Analyzer mit einer Echtzeit-Bandbreite von 40 MHz. Bei Messungen innerhalb dieser Bandbreite kann ein lückenloses Spektrogramm aufgezeichnet werden, d.h. es gibt keine Wartezeiten zwischen den einzelnen Spektren, wie dies bei herkömmlichen Geräten der Fall ist. Messungen mit höherer Bandbreite werden aus vielen 40 MHz breiten Abschnitten zusammengesetzt. Dies führt zwar wiederum zu kleinen zeitlichen Lücken im Spektrogramm, welche aber immer noch klein genug sind, um alle wichtigen Eigenschaften der Mobilfunksignale zu sehen. Ein generelles herausragendes Merkmal von Spektrum Analysatoren ist der grosse erfassbare Dynamikbereich. Der Signal Shark verfügt über eine Messantenne mit integrierten Kalibrierungsdaten für die direkte Darstellung der Messwerte in V/m.

Hersteller	Narda Safety Test Solutions	
Modellbezeichnung	Signal Shark 3310	
Messbereich Frequenz	8 kHz - 8 GHz	
Real-time Bandbreite (RTBW)	40 MHz	
Dynamikbereich (bei 3.5 GHz)	Noise Figure < 22 dB IP3 = 12 dBm	
Antenne	Kalibrierte Narda Log-Per Antenne	

Tabelle 3: Kenndaten des eingesetzten Echtzeit-Spektrum Analyzer (RTSA)

3.3.2 Oszilloskop

Im Gegensatz zum Spektrum Analyzer ist ein Oszilloskop für Messungen im Zeitbereich ausgelegt. Der Momentanwert der Spannung des gemessenen Signals wird mit sehr hoher zeitlicher Auflösung gemessen und grafisch dargestellt, im Falle des MSO9404A mit bis zu 20 Milliarden Abtastwerten pro Sekunde. Dies ermöglicht es, sogar die einzelnen Perioden der Trägerfrequenz eines 5G-Signals bei 3.5 GHz zeitlich aufzulösen. Wenn eine Antenne an das Oszilloskop angeschlossen wird, ist die gemessene Signalform proportional zur elektrischen Feldstärke des einfallenden elektromagnetischen Feldes. Die Umrechnung erfolgt in einem zweiten Schritt über die uns bekannten Kalibrierungsfaktoren der eingesetzten Antenne bzw. Kabeldämpfungen.

Hersteller	Agilent	
Modellbezeichnung	MSO9404A	
Bandbreite	4 GHz	
Abtastrate	20 GS/s	
Speichertiefe	40 Mio. Messpunkte	
Dynamikbereich	8-bit A/D-Wandler	
Antenne	Externe Log-Per Antenne (Schwarzbeck ESLP-9145), Gewinn ca. 6 dBi	
Filter	Externer 3.2 GHz Hochpassfilter (für Messungen der 5G Signale eingesetzt)	

Tabelle 4: Kenndaten des eingesetzten Oszilloskops



Abbildung 3: Messaufbau Vergleichsmessung mit Oszilloskop auf der Dachterrasse des Gebäudes der Verwaltung des Kt. Aargau. Rechts neben dem Oszilloskop ist das ExpoM-RF Gerät zu sehen.

3.4 Messungen mit forciertem «Traffic» / 'Worst-case'-Abschätzungen

Mit jeder neuen Generation der Mobilfunkstandards ist die Steigerung der Effizienz der Datenübertragung ein zentrales Ziel. Mit dieser Entwicklung kommt die Tendenz zunehmender zeitlicher Variabilität und Lastabhängigkeiten einher. «Verwaltungsaktivitäten» des Funknetzes werden auf ein Minimum reduziert und der Funkkanal praktisch nur dann belegt, wenn auch Nutzdaten zu übertragen sind. Bei 5G ist mit der Einführung adaptiver Antennen eine Technologie dazugekommen, welche diese Eigenschaften nochmals deutlich effizienter nutzt.

Im Rahmen dieser Studie soll, neben der in der Praxis zu beobachtenden Tagesverläufen der Expositionsfeldstärken, auch der Fall maximal möglicher Exposition angenähert werden, so dass die im Standortdatenblatt berechneten Exposition-Maximalwerte validiert werden können. Zudem soll der Einfluss der adaptiven Antennentechnologie untersucht werden.

Für diesen Zweck wurden zwei 5G-fähige Smartphones des Typs OPPO Reno 5G und Swisscom SIM mit unlimitiertem Datenvolumen eingesetzt. Damit wurden während den Tests mit forciertem Datenverkehr bereitgestellte Test-Dateien von 0.1 – 10 GB via Mobilfunknetz (falls nötig wiederholt) heruntergeladen, um den Downlink-Kanal möglichst auszulasten. Je nach Test wurden beide Smartphones gleichzeitig eingesetzt, wahlweise mit Priorität fürs 4G- oder 5G Mobilfunknetz (siehe Messprotokoll in 3.4.2).

3.4.1 Standorte Traffic-Test

Für die Tests mit forciertem Traffic wurden die Mess-Standorte gegenüber der Langzeitmessung leicht angepasst, um maximale Feldstärken zu erreichen. Dazu wurden die ExpoM-RF Messgeräte an möglichst exponierte Stellen verschoben. An den Standorten 'Kt. AG Terrasse' und 'G+P - Dach' wurden die Geräte auf der Dachterrasse bzw. auf dem Flachdach installiert. Beim OMEN-Standort wurden hingegen zwei Geräte installiert. Eines im Inneren des Hauses (gleiche Position wie für die Langzeitmessungen) sowie eines aussen auf dem Dach vor dem Fenster in der Nähe des ersten Geräts. Diese Anordnung beim OMEN-Standort ermöglicht eine grobe Abschätzung der Gebäudedämpfung. Die Traffic-Tests wurden so angeordnet, dass für sämtliche Messgeräte sowie Smartphones eine direkte Sichtverbindung zur Basisstation herrscht. Im 3.5 GHz TDD Band können die

ExpoM-RF Messwerte durch die Emissionen des Smartphones verfälscht werden (keine Unterscheidung zwischen Uplink und Downlink aufgrund der Frequenz möglich). Deshalb wurde im Rahmen der Möglichkeiten ein möglichst grosser Abstand zu den Messgeräten eingehalten. Gleichzeitig ist es aber essenziell, dass Basisstation, Messgerät und Smartphone auf einer Linie liegen, damit diese vom selben Beam der adaptiven Antenne erfasst werden.

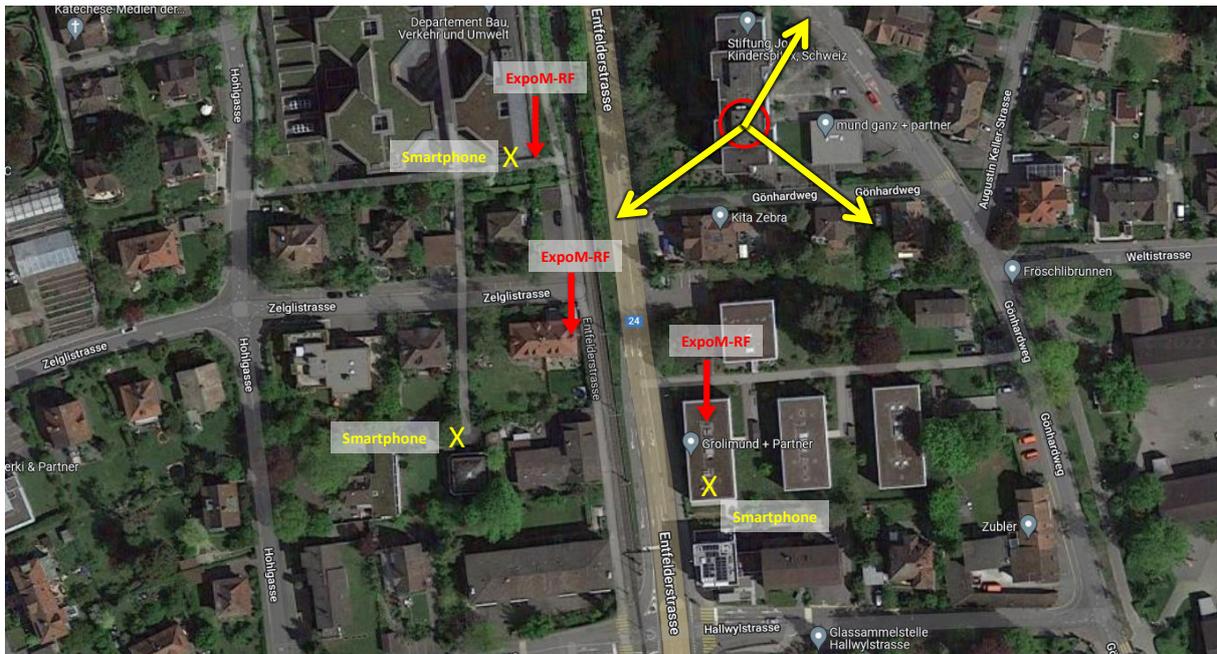


Abbildung 4: Standorte «Traffic-Test» inklusive der Positionierung der Messgeräte und der Smartphones. Die Hauptabstrahlrichtungen der Mobilfunkantenne sind gelb eingezeichnet.



Abbildung 5: Traffic-Tests: Standorte der Messgeräte (Sicht vom Dach von G+P) mit Detailansicht der Installation des Messkoffers

3.4.2 Messprotokoll

In Tabelle 5 ist das Ablauf-Schema der Traffic-Messungen dargestellt. Es beinhaltet 5 Aktivitäts-Szenarien, welche jeweils an den «Smartphone» Standorten nacheinander durchgespielt werden. Diese Szenarien ermöglichen es, verschiedene Eigenschaften des 4G- und 5G Mobilfunknetz zu vergleichen:

Mit Szenario 1 und 2 wird ein Vergleich der erreichten Datenübertragungsrate unter 4G und 5G gemacht. In Szenario 3 und 4 wird mit 2 gleichzeitig aktiven Android Smartphones der Downlink jeweils so stark wie möglich ausgelastet mit dem Ziel, die Aktivität (bzw. Sendeleistung) der Mobilfunkantenne zu maximieren. Szenario 5 ist die Kombination von Szenario 3 und 4.

Szenario Nr.	Smartphone #1	Smartphone #2	Bemerkungen
1	Einstellung: 5G Zeitmessung für Download von 1 GB	Flugmodus	Messung 3x wiederholt
2	Einstellung: 4G Zeitmessung für Download von 1 GB	Flugmodus	Messung 3x wiederholt
3	Einstellung: 5G Dauer-Datentransfer Download	Einstellung: 5G Dauer-Datentransfer Download	5G Stresstest / Power-Lock Test
4	Einstellung: 4G Dauer-Datentransfer Download	Einstellung: 4G Dauer-Datentransfer Download	4G Stresstest
5	Einstellung: 5G Dauer-Datentransfer Download	Einstellung: 4G Dauer-Datentransfer Download	4G + 5G Stresstest

Tabelle 5: Messprotokoll Traffic-Tests für alle drei Standorte mit 5G-fähigen Smartphones

4 Übersicht der erfassten Messgrößen und Beurteilung der Grenzwertausschöpfung

4.1 Definition und Geltungsbereich der Grenzwerte

Technische Telekommunikationssignale wie Mobilfunksignale sind komplex und weisen prinzipbedingt einen dynamischen und unregelmässigen Zeitverlauf auf, der unter anderem von der momentanen Auslastung der Anlage abhängen. Entsprechend variabel ist der Momentanwert der Feldstärke-Immissionen einer Mobilfunkanlage über die Zeit.

Die Definition der Grenzwerte in der NISV basiert deshalb auf der Beurteilung statistischer Messgrößen der Feldstärke, welche für beliebige Signalformen ermittelt werden können und eindeutig definiert sind. Je nach Situation definiert die NISV allerdings unterschiedliche Grenzwerte und Messgrößen für die Beurteilung von Mobilfunk-Anlagen:

Der Immissionsgrenzwert (IGW) muss überall eingehalten werden, wo sich Menschen auch nur kurzfristig aufhalten. Der Immissionsgrenzwert ist international harmonisiert und schützt vor wissenschaftlich anerkannten Gesundheitsschäden. Für die Beurteilung des Immissionsgrenzwerts ist die relevante Messgrösse der über 6 Minuten gemittelte Effektivwert der elektrischen Feldstärke. Der IGW beträgt je nach Frequenzband zwischen 36 V/m (700 MHz) und 61 V/m (≥ 2000 MHz). Der IGW gilt nur für Aussendungen von ortsfesten Anlagen, wobei nicht differenziert wird, ob die Immissionen von einer einzelnen Anlage stammen oder eine Überlagerung von mehreren Quellen vorliegt.

Der in der NISV definierte Anlagengrenzwert (AGW) ist ein schweizerischer Vorsorgegrenzwert, der an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) eingehalten werden muss. OMEN sind Orte, an denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten. Zum Beispiel fallen Innenräume von Wohnungen und Büros sowie Kinderspielplätze in diese Kategorie. Für eine ausführliche Definition von OMEN siehe BAFU-Webseite. Der AGW bezieht sich auf die Immissionen einer einzelnen Anlage und beträgt 5 V/m für Anlagen, die gleichzeitig auf mehreren Frequenzbändern senden, was heutzutage den Normalfall darstellt.

Für die Beurteilung einer Anlage nach dem AGW wird unterschieden, ob diese über eine adaptive Antenne verfügt oder nicht. Im Fall einer adaptiven Antenne, ist der über 6 Minuten gemittelte Effektivwert der elektrischen Feldstärke zu betrachten. Bei einer nicht adaptiven Antenne ist der bei maximaler Sendeleistung und Auslastung zu erwartende Effektivwert der elektrischen Feldstärke massgebend. Dieser Zustand ist eine theoretische 'Worst-case' Abschätzung und tritt in der Praxis (wenn überhaupt) nur sehr selten und für sehr kurze Dauer auf. Dieser wird deshalb bei Abnahmemessungen mittels Hochrechnungen basierend auf der Messung von Mobilfunkstandard-spezifischen Referenzsignalen rekonstruiert. In der NISV ist in diesem Zusammenhang deshalb auch keine explizite Mittelungsdauer für die Bestimmung des Effektivwerts vorgegeben im Fall von nicht adaptiven Antennenanlagen.

4.2 Definition und Erfassung der relevanten Messgrößen

Abbildung 6 illustriert anhand eines schematischen Beispiels, wie die in diesem Bericht verwendeten Messgrößen definiert sind, was sie bedeuten und wie sie vom ExpoM-RF Messgerät erfasst werden.

Das elektromagnetische Feld, das von einer Mobilfunkantenne ausgesendet wird (Abbildung 6, oben links) besteht aus hochfrequenten Wellen, die mit einer Trägerfrequenz im Bereich von 700 MHz bis 3800 MHz oszilliert. Die zur Übertragung der Daten verwendeten Modulationsverfahren und variable Auslastung der Anlage führen zu kurzzeitigen und langzeitigen Schwankungen der Amplitude dieser Wellen. Bei adaptiven Antennen sind diese Schwankungen wegen der zusätzlich dynamisch veränderbaren Hauptabstrahlrichtung besonders akzentuiert.

Um die Feldstärke von solchen schwer zu charakterisierenden «zufälligen» Signalverläufen zu beurteilen, hat sich der Effektivwert (RMS) etabliert. Der Effektivwert (Abbildung 6, unten links) entspricht der äquivalenten mittleren Leistung eines Signals, wenn es über eine gewisse Mittelungszeit beobachtet wird. Die Verwendung des Effektivwerts folgt aus der thermischen Dosis-Betrachtung, welche den Grenzwerten implizit zugrunde liegt. Wenn Gewebe mit elektromagnetischen Feldern exponiert wird, ist die dadurch verursachte mittlere Erwärmung nämlich proportional zum Effektivwert der Feldstärke, und zwar unabhängig von der Signalform. Allerdings hat die gewählte Mittelungszeit T_M bei der Ermittlung des Effektivwerts einen wichtigen Einfluss auf die resultierende Messgröße. Bei Verwendung langer Mittelungszeiten werden kurzzeitige Schwankungen der Feldstärke stark geglättet. Wenn eine reale, (bzw. nicht hochgerechnete) Feldstärkemessung mit dem Anlagegrenzwert verglichen werden soll, ist es deshalb im Sinne einer 'Worst case' Abschätzung angebracht, eine kurze Mittelungsdauer bei der Ermittlung des Effektivwerts zu verwenden.

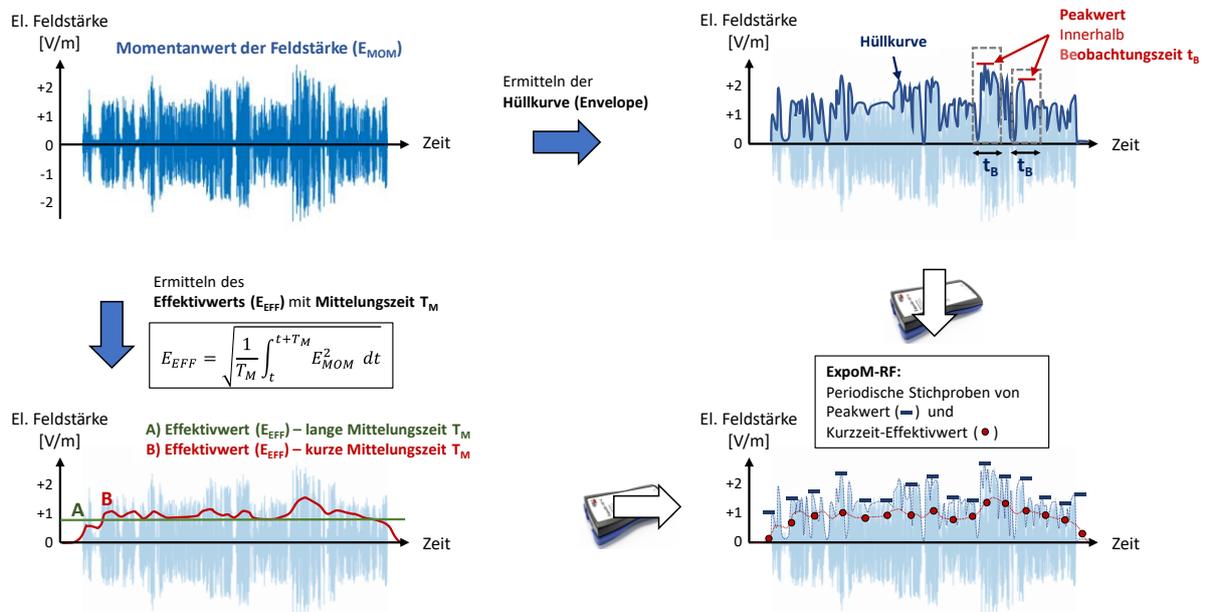


Abbildung 6: Weg vom Hochfrequenz-Signal zu den statistischen Messgrößen, die in diesem Bericht ausgewertet werden und zum Teil als Grundlage für die Bestimmung der Grenzwertausschöpfungen dienen. Die Messgrößen des ExpoM-RF Messgeräts (Effektivwert bzw. RMS-Wert und Peakwert) stellen periodische Stichproben des kurzzeit-Effektivwerts sowie des Peakwerts innerhalb einer Beobachtungszeit von $t_B = 50$ Millisekunden dar.

Wenn aber die Erfassung der maximalen Feldstärke von beliebig kurzen Ereignissen (Peak-Wert bzw. Spitzenwert) erwünscht ist, darf keine Mittelung stattfinden. Die Messung des Spitzenwerts basiert auf der Auswertung der Hüllkurve des erfassten Signals (Abbildung 6, oben rechts). Diese wird in Zeitabschnitte unterteilt, wovon jeweils der höchste aufgetretene Momentanwert betrachtet wird.

Das ExpoM-RF (Abbildung 6, unten rechts) erfasst für jedes konfigurierte Band den Effektivwert und den Peak-Wert basierend auf einer Beobachtungsdauer von 50 Millisekunden. Diese Auswertung findet periodisch mit einem vordefinierten Messintervall statt. Es handelt sich deshalb um periodische Stichproben der Feldstärke. Die quadratische Mittelung dieser Stichproben über 6-Minuten stellt eine sehr gute Näherung des über 6 Minuten gemittelten Effektivwerts dar.

5 Resultate Langzeitmessung

In den folgenden Abschnitten sind die Resultate der Langzeitmessungen grafisch dargestellt. Es werden jeweils die Effektivwerte (RMS Werte) gemessen mit dem ExpoM-RF sowie die über 6 Minuten gemittelten Effektivwerte der Feldstärken über die Zeit dargestellt.

In den folgenden Histogrammen sind die Verteilungen der Effektivwerte und Peak Messwerte an den verschiedenen Standorten dargestellt. Die Verteilungen von 4G und 5G Messwerten sehen sich für die ersten zwei Standorte 'OMEN' und 'Kt. AG' ähnlich. Beim Standort 'G+P Büro' ist offensichtlich noch eine andere Quelle in der Nähe, die den Beitrag von 4G beeinflusst (DECT 'cross-talk'). Dieser Beitrag sowie die Beiträge des Uplinks im 5G Band müssten noch rausgerechnet und die verschiedenen Anteile noch gemäss Vorschrift summiert werden, um die gemessenen Werte zur abschliessenden Beurteilung der Grenzwertausschöpfung verwenden zu können. Es zeigt sich aber ein klarer Unterschied in der Streuung der Werte zwischen 4G (inklusive 5G-NR nicht-adaptiv) und 5G (5G-NR adaptiv) sowie in den Verteilungen der Effektivwerte und den Peak Werten. Es ist zu beachten, dass auch diese Verteilungen sehr stark von der jeweiligen Auslastung der Antennenanlage abhängig sind. Die Häufigkeit in den Darstellungen ist logarithmisch skaliert, um auch seltenere Ereignisse sichtbar zu machen.

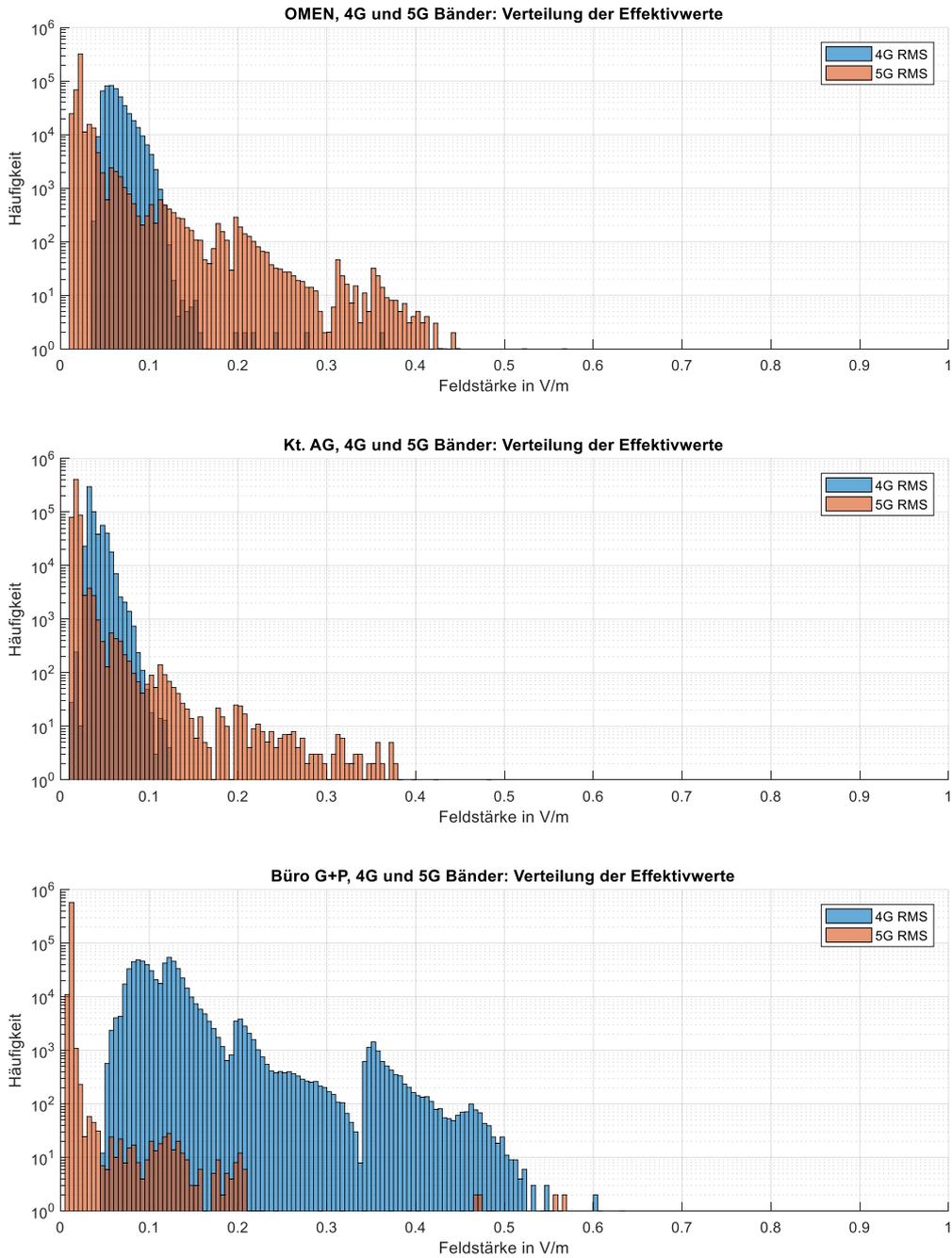


Abbildung 7: Histogramme der Effektivwerte (RMS) an den verschiedenen Standorten (Häufigkeit ist logarithmisch skaliert)

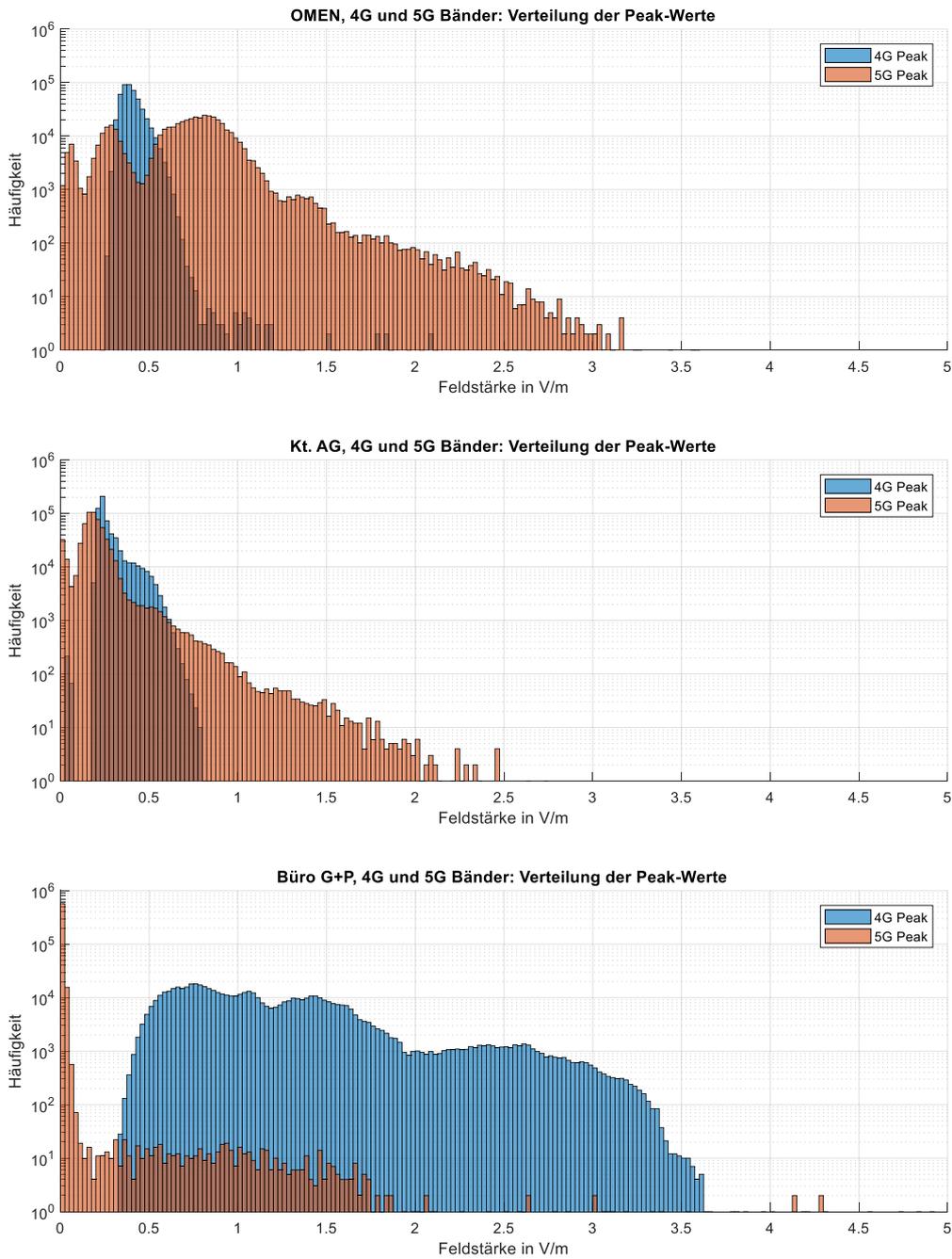


Abbildung 8: Histogramme der Peak-Messwerte an den verschiedenen Standorten (Häufigkeit ist logarithmisch skaliert); die Peak Werte in den 4G-Bändern sind die quadratische Summe aller gemessenen 4G-Bänder, was einem 'Worst-case' entspricht

In Tabelle 6 sind die jeweiligen Werte für die statistische Verteilung der Messwerte an den verschiedenen Standorten zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Maximalwerte am Ort generiert werden und dadurch auch Ausreisser verursacht durch Endgeräte in der unmittelbaren Umgebung (DECT-Telefone und Uplink von 5G Endgeräten) beinhalten. Die gegebenen Werte können deshalb nicht direkt zur Beurteilung der Einhaltung des Anlagegrenzwertes herangezogen werden. Für 5G sind auch die Werte für den über 6 Minuten gemittelten Effektivwert angegeben, da dieser an den gewählten Orten relevant ist.

	Perzentil	1%	Median	99%	Maximum
OMEN	4G RMS	0.043	0.060	0.104	0.450
	5G RMS	0.013	0.021	0.113	0.570
	4G Peak	0.307	0.392	0.585	3.568
	5G Peak	0.045	0.738	1.436	3.580
	5G 6-min	0.014	0.024	0.078	0.182
Kt. AG	4G RMS	0.029	0.034	0.067	0.132
	5G RMS	0.013	0.017	0.037	0.484
	4G Peak	0.200	0.243	0.558	0.827
	5G Peak	0.002	0.184	0.667	2.739
	5G 6-min	0.013	0.018	0.035	0.202
G+P Büro	4G RMS	0.064	0.111	0.353	0.630
	5G RMS	0.006	0.011	0.013	0.570
	4G Peak	0.472	1.035	2.923	4.141
	5G Peak	0.002	0.003	0.033	4.912
	5G 6-min	0.010	0.011	0.012	0.160

Tabelle 6: Auflistung der statistischen Grössen der gemessenen Werte (in V/m) an den verschiedenen Standorten.

Im den folgenden Unterkapiteln sind die Zeitverläufe der Effektivwerte, der 6-Minuten Durchschnitt sowie den Peak Werten für die verschiedenen Standorte und Telekommunikationsbänder respektive Technologien dokumentiert.

5.1 Zeitverläufe Standort 'OMEN' (Mai / Juni 2022)

Die Messungen am Standort 'OMEN' (Innenraum, siehe Abbildung 2) wurden über den Zeitraum vom 23. Mai bis zum 3. Juni 2022 durchgeführt. Der 28. und der 29. Mai 2022 sind Wochenendtage.

5.1.1 Total über alle Bänder 3G/4G/5G

Abbildung 9 zeigt das Total der Effektivwerte über alle Bänder der Bänderliste gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2. In dieser Abbildung ist die Variation im Tages- und Wochenverlauf gut zu sehen. Der Verlauf des Totals variiert stark über den Tag und auch über die jeweiligen Wochentage. Der betrachtete Zeitraum weist ausser der 'Tag – Nacht' Differenz keine klaren Muster auf.

In Abbildung 10 ist der entsprechende gleitende 6-Minuten Durchschnitt gezeigt. Die Werte bewegen sich mehrheitlich unter 0.1 V/m.

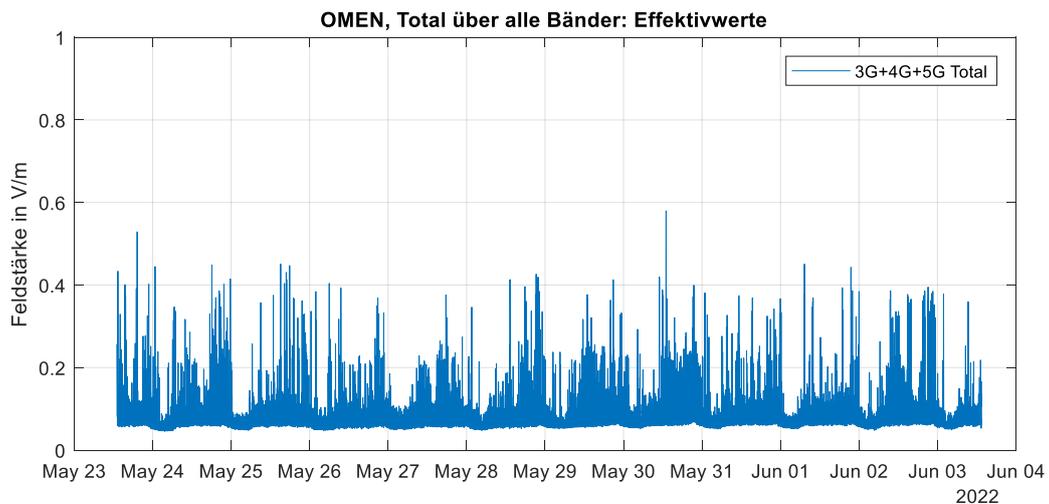


Abbildung 9: Effektivwerte der Langzeitmessungen am Standort 'OMEN'

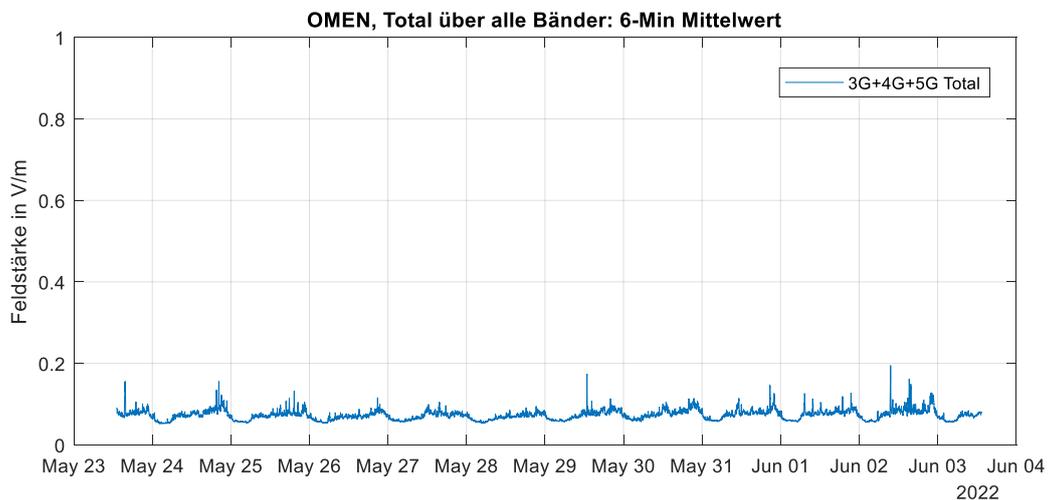


Abbildung 10: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen am Standort 'OMEN'

5.1.2 3G Band

Abbildung 11 zeigt den zeitlichen Verlauf des Effektivwerts im einzigen 3G Band. Die Werte sind allesamt tief, was auf eine geringe Nutzung des Netzes hinweist. Entsprechend ist auch der gleitende 6-Minuten Durchschnitt sehr tief (Abbildung 12).

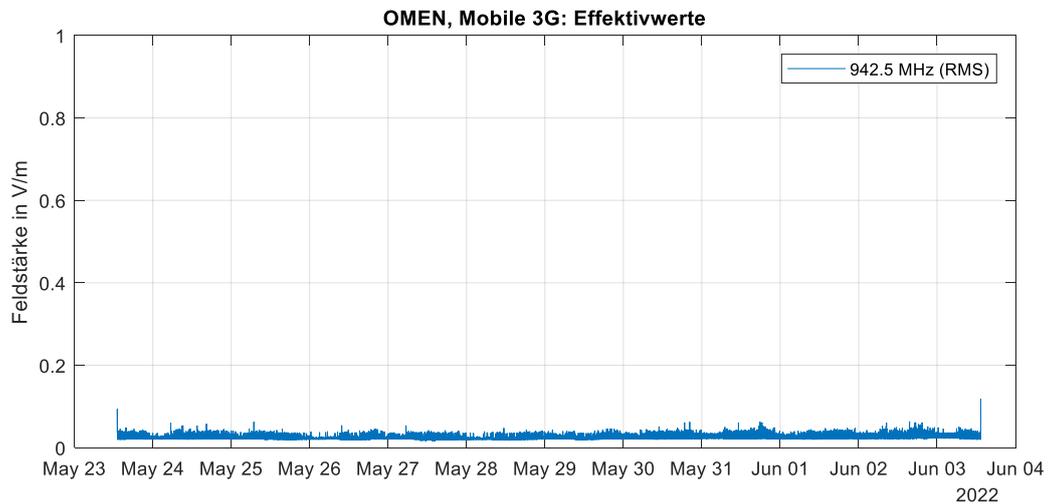


Abbildung 11: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort 'OMEN'

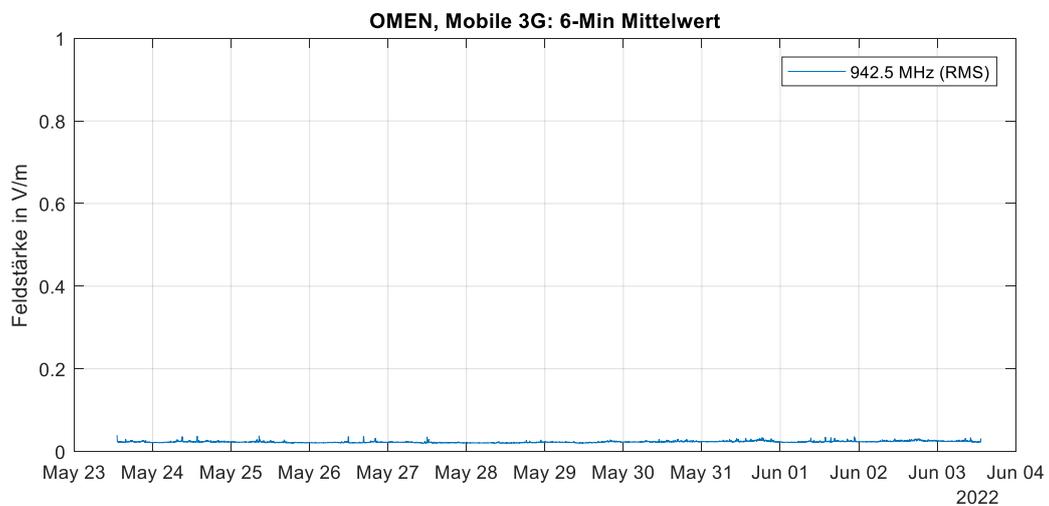


Abbildung 12: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort 'OMEN'

5.1.3 4G Bänder (inkl. 5G-NRR nicht-adaptiv)

Im Folgenden sind die zeitlichen Verläufe für die verschiedenen 4G Bänder abgebildet. Auch hier sind die Werte tief. Es ist ein einzelner hoher Peak zu sehen, welcher aber auch von einem in der Nähe getätigten Anruf herrühren kann.

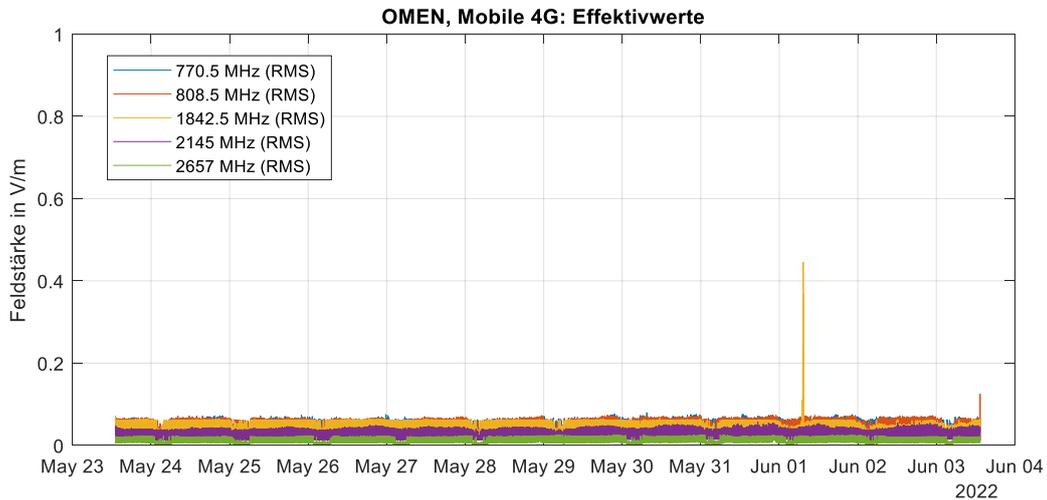


Abbildung 13: Effektivwerte der Langzeitmessungen der 4G Bänder am Standort 'OMEN'

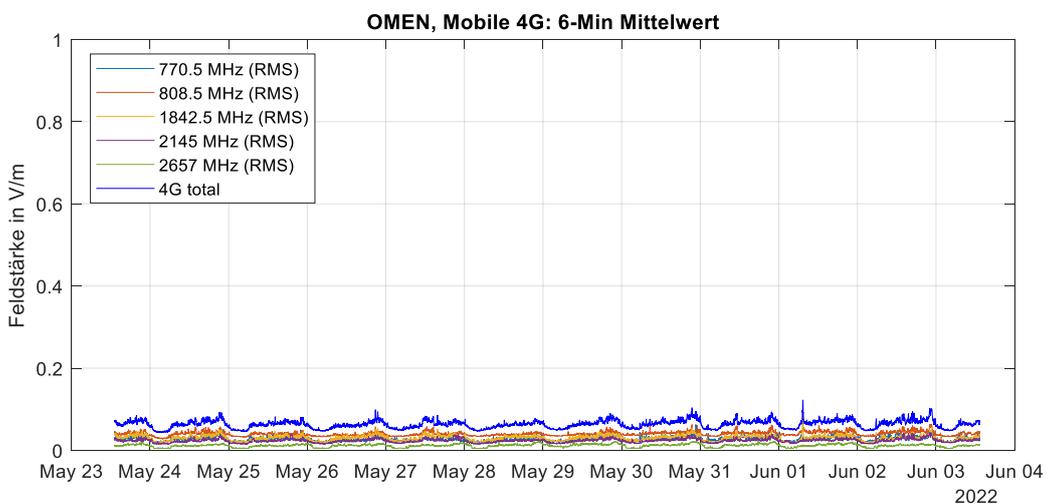


Abbildung 14: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen der 4G-Bänder am Standort 'OMEN'

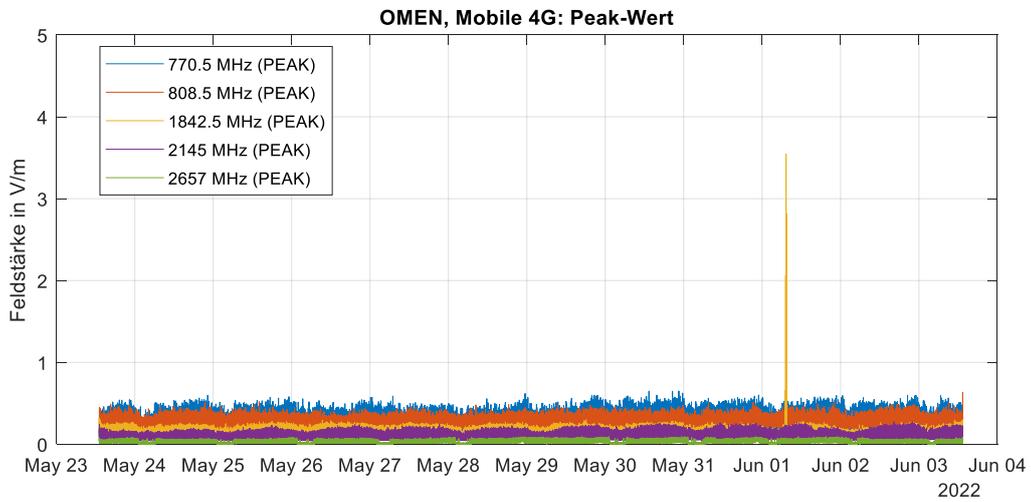


Abbildung 15: Peak-Werte der Langzeitmessungen in den 4G-Bänder am Standort 'OMEN'

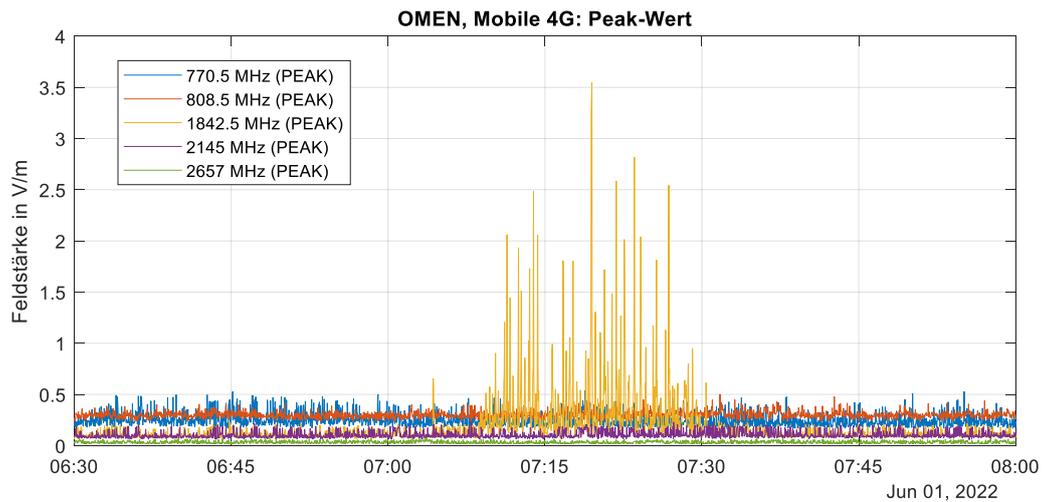


Abbildung 16: Ausschnitt der Zeitreihe aus Abbildung 15: Auffälligkeit im 1.8 GHz Band; vermutete Ursache: Anruf mit DECT-Telefon (Cross-talk).

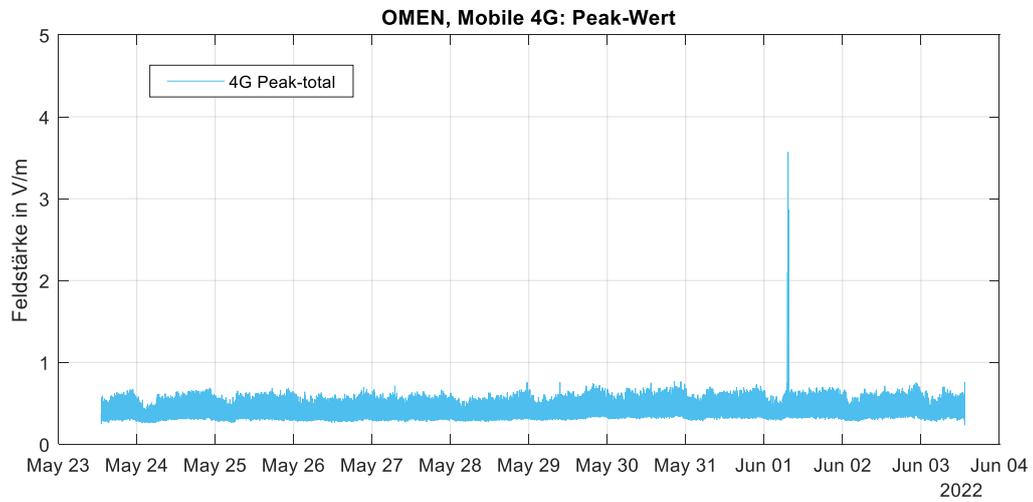


Abbildung 17: Total der Peak-Werte der verschiedenen 4G-Bänder am Standort 'OMEN' (Bemerkung: Bei dieser Auswertung handelt es sich um eine Worstcase-Abschätzung, da im Allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Peaks in den jeweiligen Bändern genau zur selben Zeit aufgetreten sind).

5.1.4 5G Band (5G-NR-adaptiv)

Die folgenden Abbildungen zeigen die zeitlichen Verläufe für das 5G-FR1 Band bei 3.5GHz. Auffallend ist die höhere Variabilität der Zeitwerte der Effektiv- und Peak-Werte im Vergleich zum 6-Minuten Durchschnitt und den anderen Standards. Diese Dynamik der Signalstärken ist spezifisch für die 5G Technologie. Die Werte des 6-Minuten Mittelwerts sind dann in einem ähnlichen Bereich wie bei 4G.

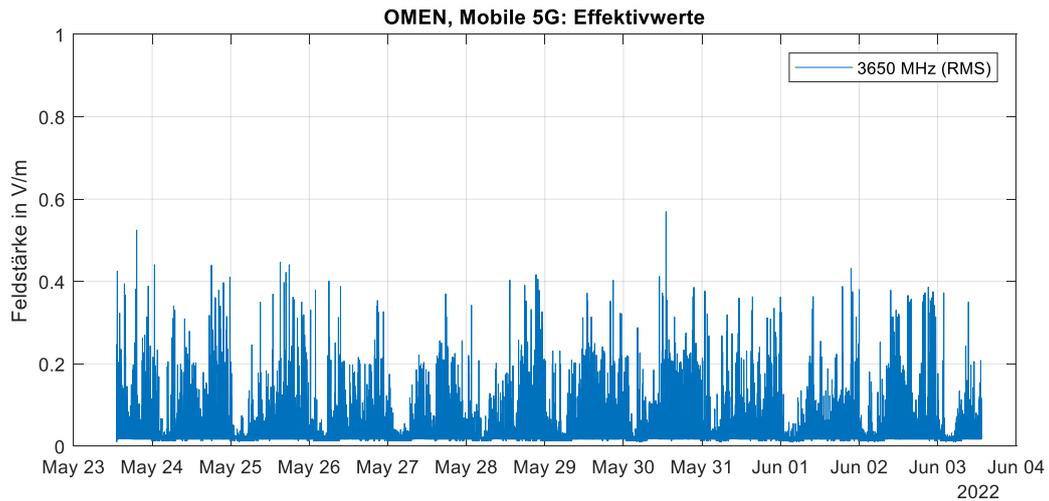


Abbildung 18: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort 'OMEN'

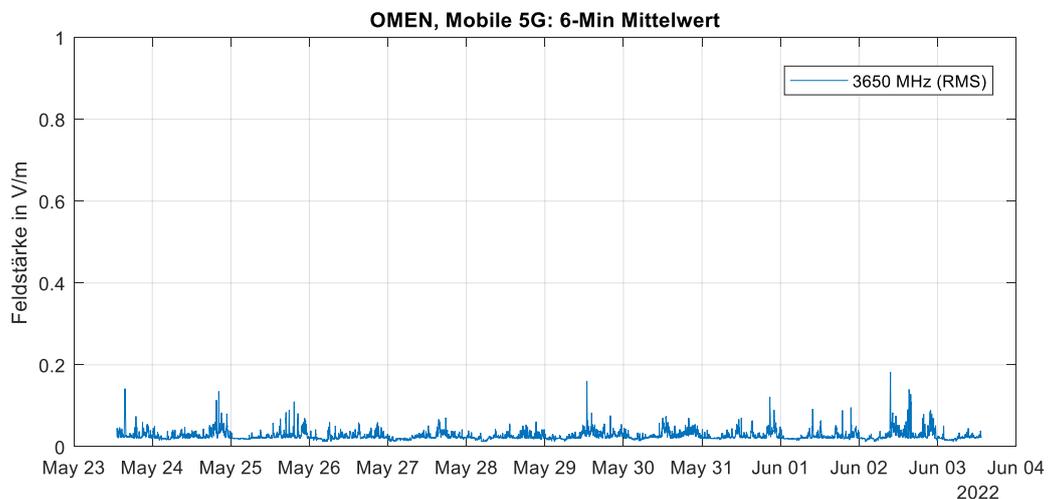


Abbildung 19: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 5G-Bands am Standort 'OMEN'

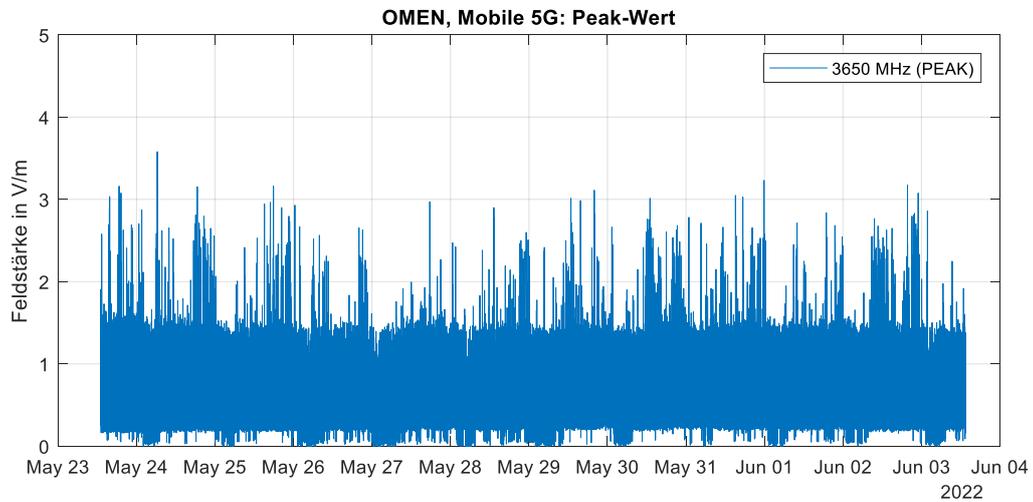


Abbildung 20: Peak-Werte des 5G-Bands am Standort 'OMEN'

5.1.5 Fazit zum Standort 'OMEN'

Das Total der gesamten Feldstärke ist von der neuen 5G Technologie dominiert. Dies ist aus dem Vergleich der zeitlichen Verläufe klar ersichtlich. Die Dynamik des Signals ist bei 5G auch deutlich höher als bei den anderen Mobilfunkstandards. Während der Phasen tiefer Nutzung (z.b. in der Nacht) sind die Effektivwerte dafür deutlich tiefer als bei den vorherigen Standards. Der nächtliche Rückgang ist bei den 5G Peakwerten nicht so stark ausgeprägt. Dies bedeutet, dass kurzzeitige Leistungsspitzen auch während Phasen tiefer Nutzung immer wieder auftreten. Allerdings treten diese so selten und für so kurze Zeit auf, dass deren Beitrag zum Effektivwert verschwindend klein ist.

5.2 Zeitverläufe Standort Büro Obergeschoss Kt. AG (April 2022)

Die Messungen am Standort in einem Büro der Verwaltung des Kanton Aargau (Innenraum, siehe Abbildung 2) wurden auch im April 2022 durchgeführt. Der Zeitraum der Messungen reicht vom 6. Bis zum 20. April 2022. Der 9. und der 10. April 2022 sind auf ein Wochenende gefallen. Die Daten 15. bis und mit 18. April 2022 sind auf den Karfreitag, beziehungsweise Ostermontag gefallen.

5.2.1 Total über alle Bänder 3G/4G/5G

Abbildung 21 zeigt das Total der Effektivwerte in allen gemessenen Bändern. Die meiste Zeit bewegen sich die Werte unterhalb 0.1V/m. Zu vereinzelt Zeitpunkten zeigen sich Ausreisser.

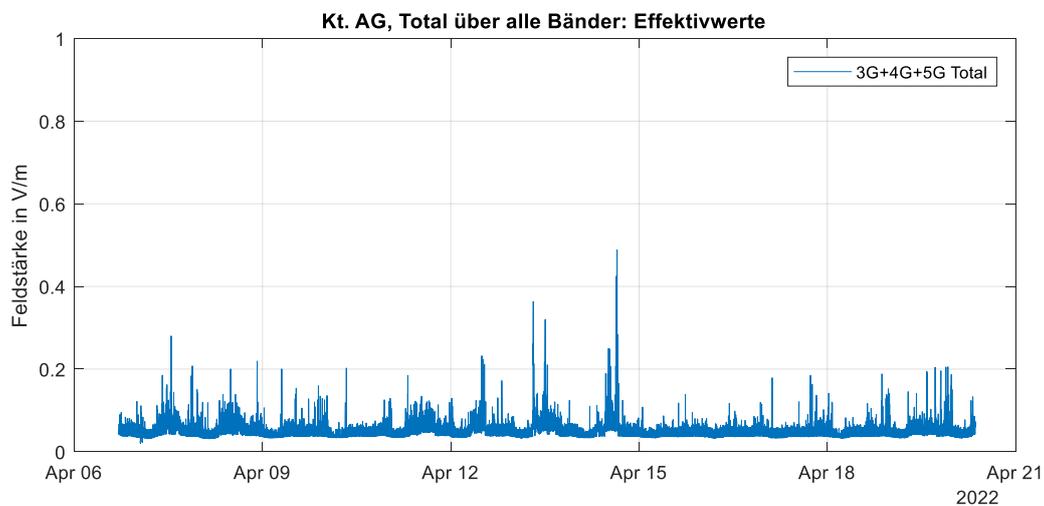


Abbildung 21: Effektivwerte der Langzeitmessungen am Standort 'Kt. AG'

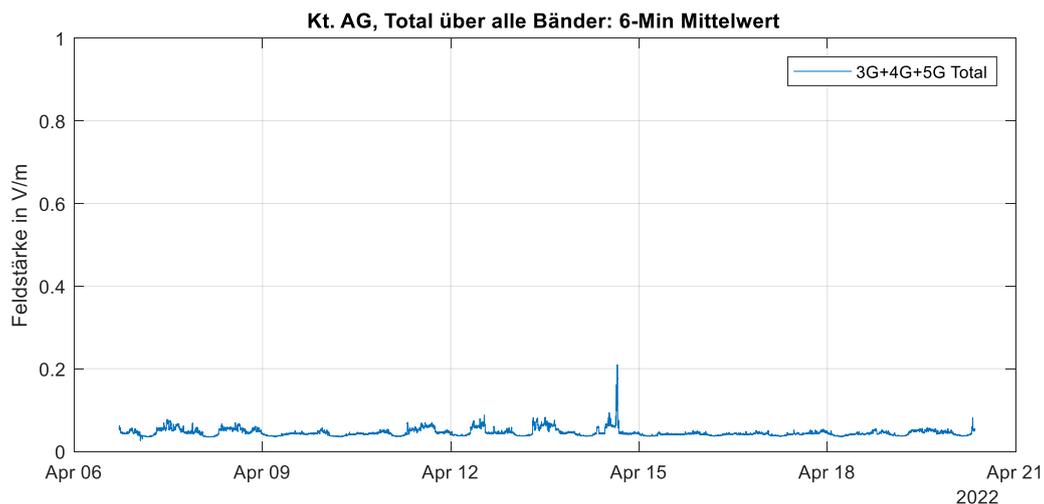


Abbildung 22: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen am Standort 'Kt. AG'

5.2.2 3G Band

Wie am vorherigen Standort ist auch hier der Beitrag des 3G Bands sehr tief.

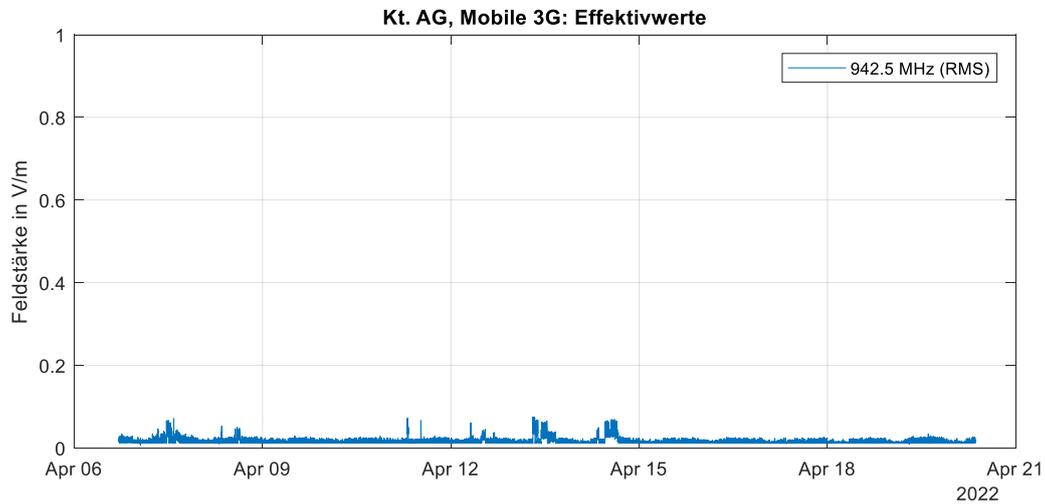


Abbildung 23: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort 'Kt. AG'

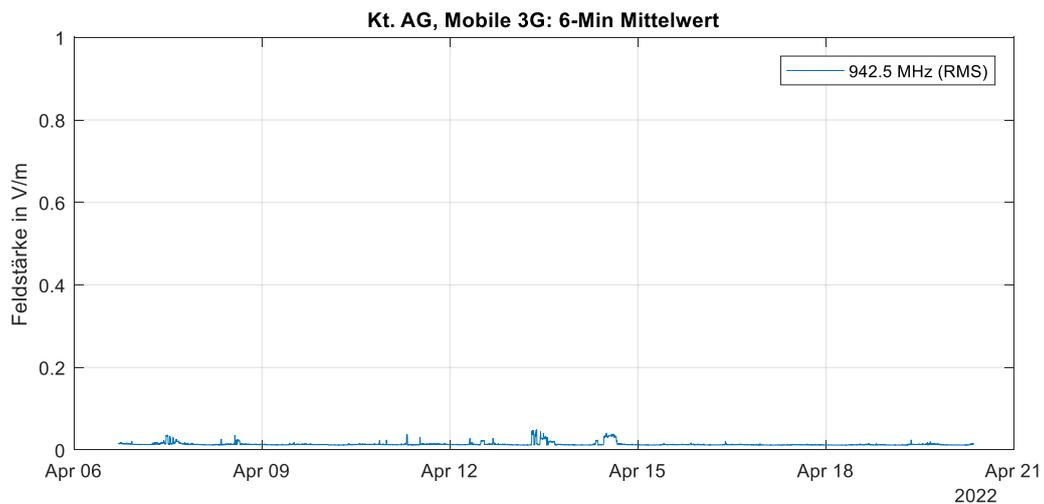


Abbildung 24: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort 'Kt. AG'

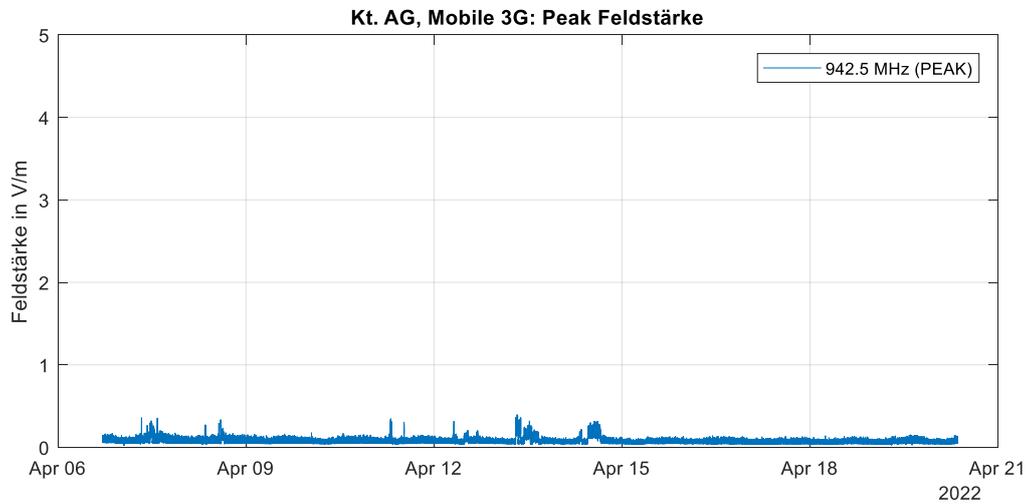


Abbildung 25: Peak-Werte des 3G-Bands am Standort 'Kt. AG'

5.2.3 4G Bänder

Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Verhältnisse bezüglich der gemessenen 4G Bänder bezüglich Effektivwerte, 6-Minuten Durchschnitt und Peak-Werte. Auch hier scheint im nahen DECT Band eine Quelle vorhanden gewesen zu sein. Dies ist an den Zeitabschnitten mit einem erhöhten Beitrag um 1842.5MHz zu sehen, die nur sporadisch auftreten.

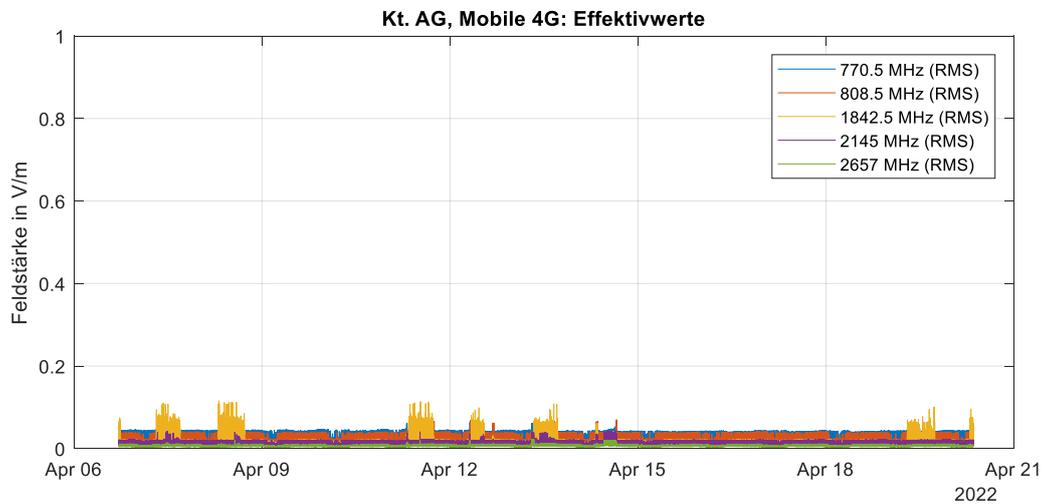


Abbildung 26: Effektivwerte der Langzeitmessungen der 4G Bänder am Standort 'Kt. AG'

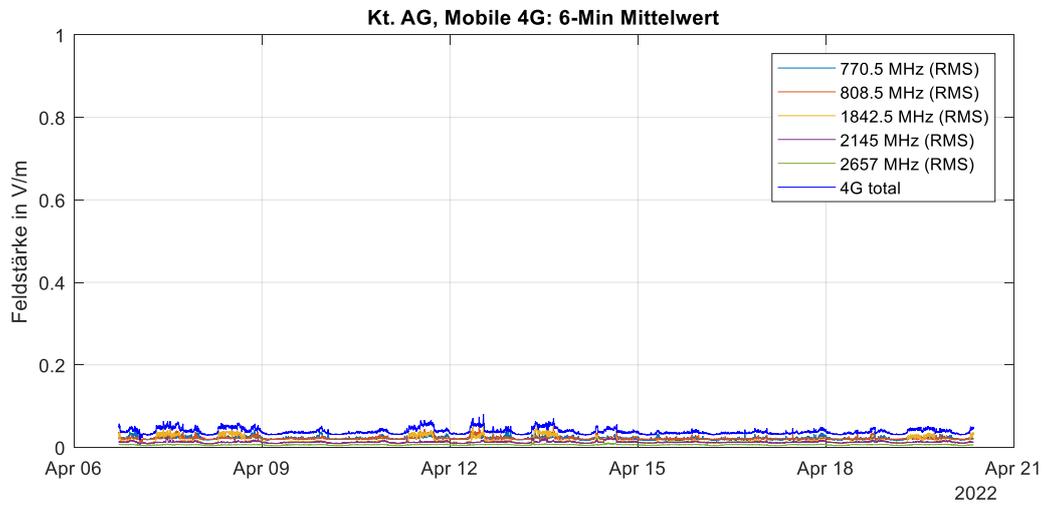


Abbildung 27: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen der 4G Bänder am Standort 'Kt. AG'

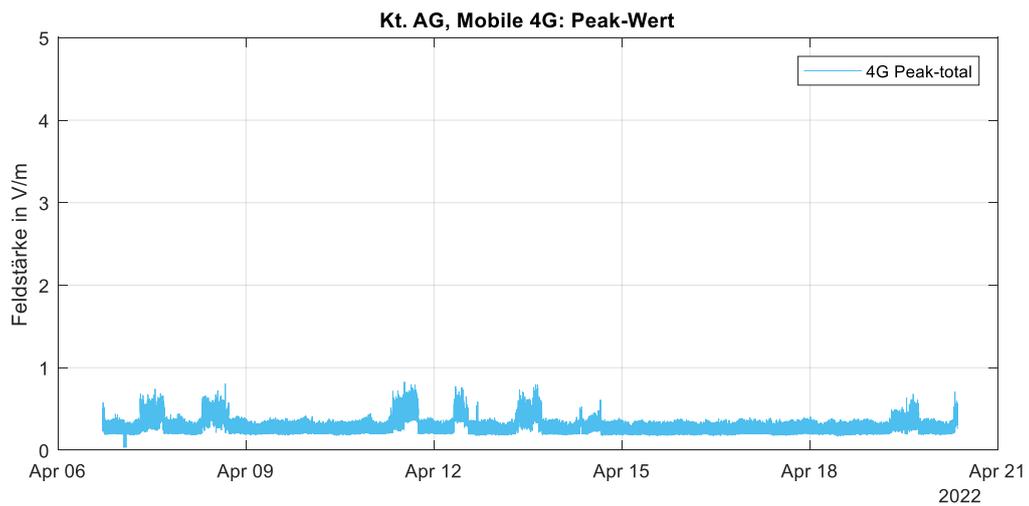


Abbildung 28: Peak-Werte der 4G-Bänder am Standort 'Kt. AG'

5.2.4 5G Band

Die Messverläufe an den Bürostandorten sind sehr ähnlich. Beim Standort 'OMEN' ist eine deutlich höhere Dynamik der Signalverläufe sichtbar. Im 5G Band sind die Testmessungen am 14. April sichtbar. Die Spitzen vorher scheinen von vorherigen Testmessungen mit einem 5G Smartphone in der Nähe des Messgerätes zusammen zu hängen.

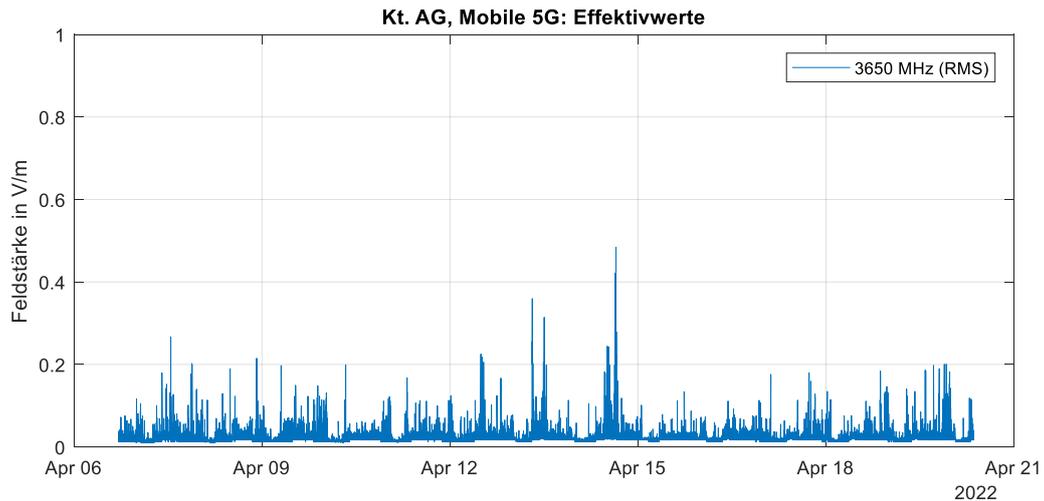


Abbildung 29: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort 'Kt. AG'

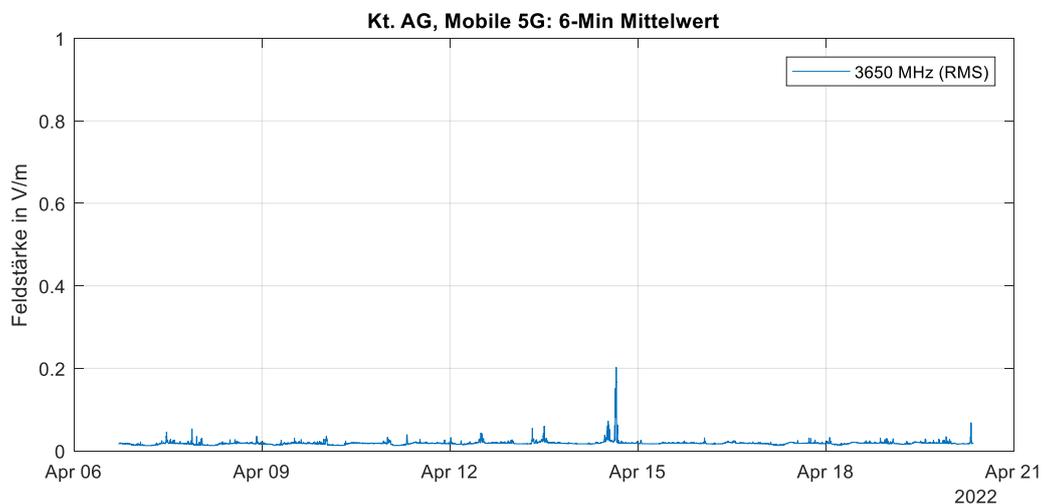


Abbildung 30: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort 'Kt. AG'

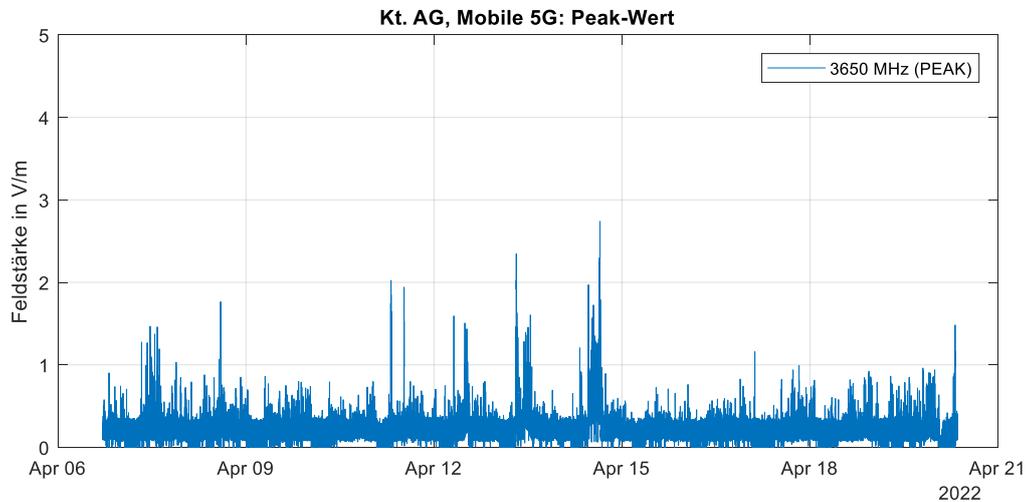


Abbildung 31: Peak-Werte des 5G-Bands am Standort 'Kt. AG'

Die Peak Werte erreichen auch während der Testmessungen nicht die als Anlagegrenzwert festgelegte Feldstärke. Offen bleibt, inwiefern die komplette Auslastung der Antennenanlage durch die forcierten Datentransfers erreicht wurde.

5.2.5 Fazit zum Standort 'Kt. AG'

An diesem Standort wurden in den meisten Bändern sehr tiefe Werte gemessen.

5.3 Zeitverläufe Standort Büro G+P (April 2022)

Die Messungen am Standort im Büro G+P (Innenraum, siehe Abbildung 2) wurden im April 2022 durchgeführt. Der Zeitraum der Messungen reicht vom 6. Bis zum 20. April 2022. Der 9. und der 10. April 2022 sind auf ein Wochenende gefallen. Die Daten 15. bis und mit 18. April 2022 sind auf den Karfreitag, beziehungsweise Ostermontag gefallen.

5.3.1 Total über alle Bänder 3G/4G/5G

Abbildung 32 zeigt das Total der Effektivwerte über alle erfassten Bänder. In Abbildung 33 ist der dazugehörige gleitende Durchschnitt über 6 Minuten dargestellt. Im 4G Band um 1.9 GHz scheint ein gewisser 'Cross-talk' einer anderen Telefonanlage (DECT) vorhanden zu sein, wie man in den Einzeldarstellungen der verschiedenen Bänder sehen kann (siehe Abbildung 37).

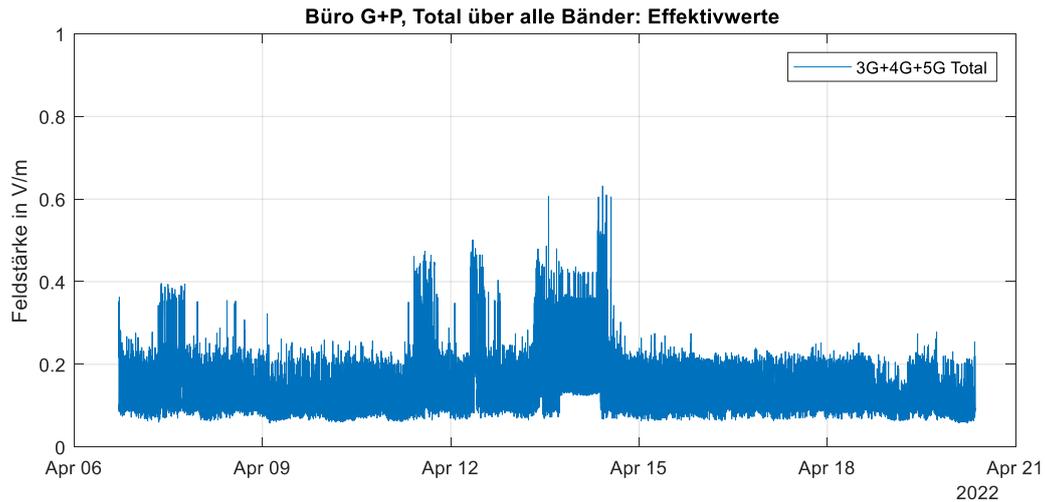


Abbildung 32: Effektivwerte der Langzeitmessungen am Standort G+P

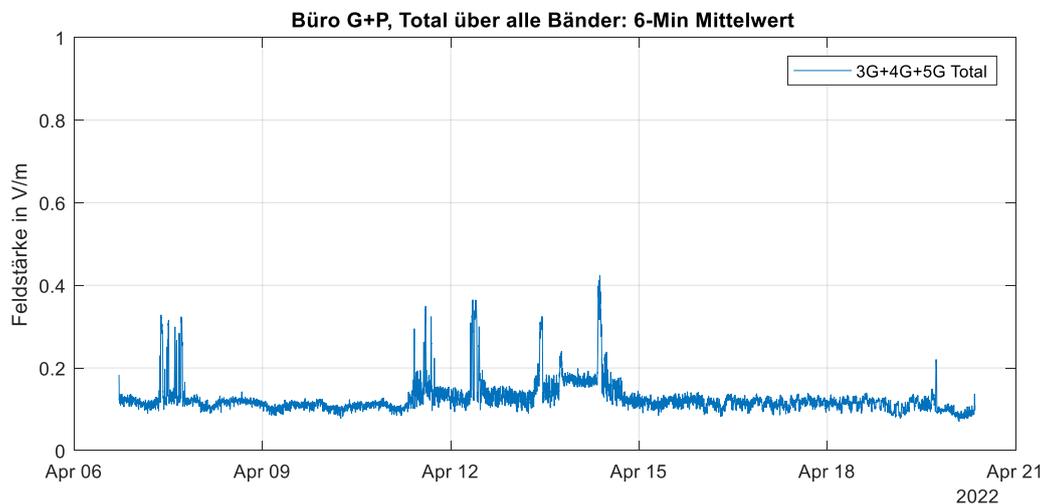


Abbildung 33: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen am Standort G+P

5.3.2 3G Band

Wie an den anderen Standorten ist der Beitrag des 3G Bandes sehr gering. Dies gilt für die Effektiv- sowie die Peak-Werte.

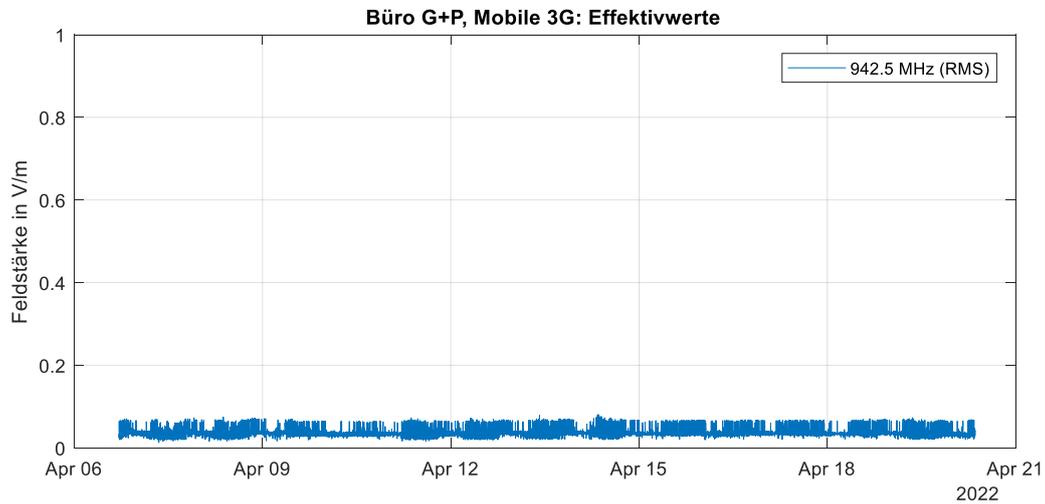


Abbildung 34: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort G+P

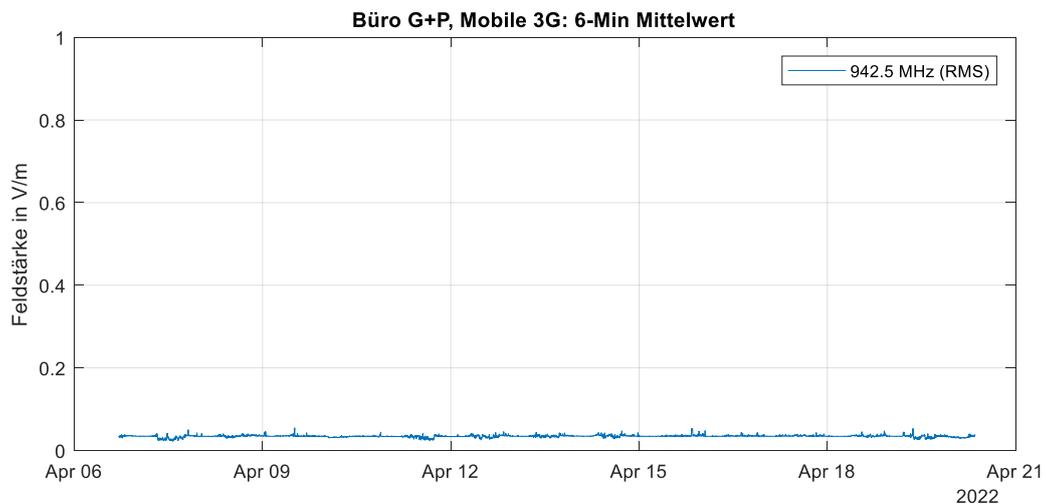


Abbildung 35: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort G+P

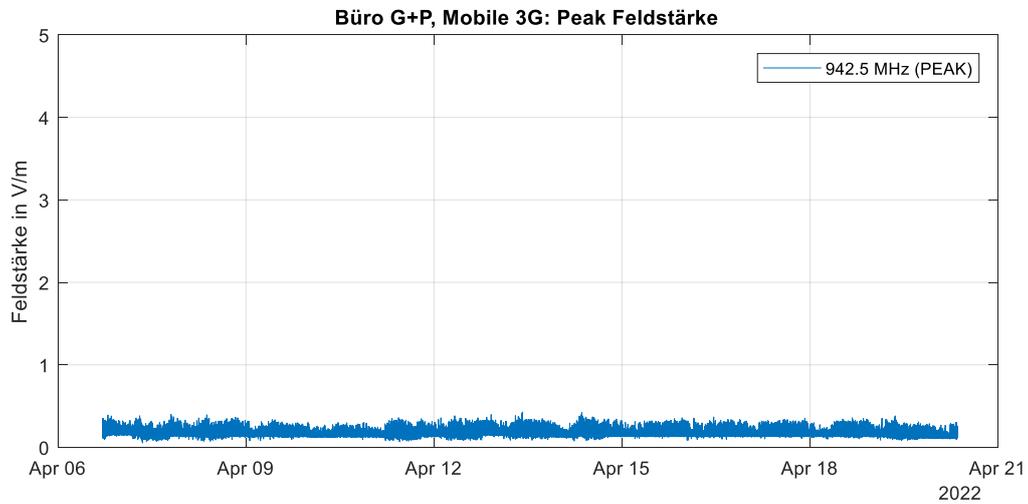


Abbildung 36: Spitzenwerte der Langzeitmessungen des 3G Bands am Standort G+P

5.3.3 4G Bänder

In Abbildung 37 sind die Effektivwerte der einzelnen Bänder für 4G zusammengefasst. Im Band um 1842.5 MHz scheint ein 'Cross-talk' einer anderen Telefonanlage vorhanden zu sein. Dieser Beitrag dominiert den gesamten Anteil an 4G.

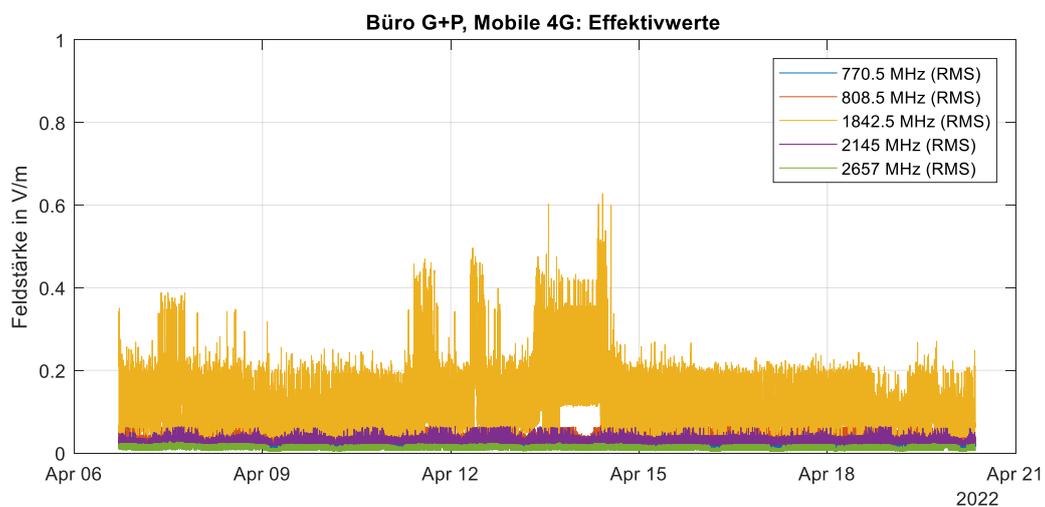


Abbildung 37: Effektivwerte der Langzeitmessungen der 4G Bänder am Standort G+P

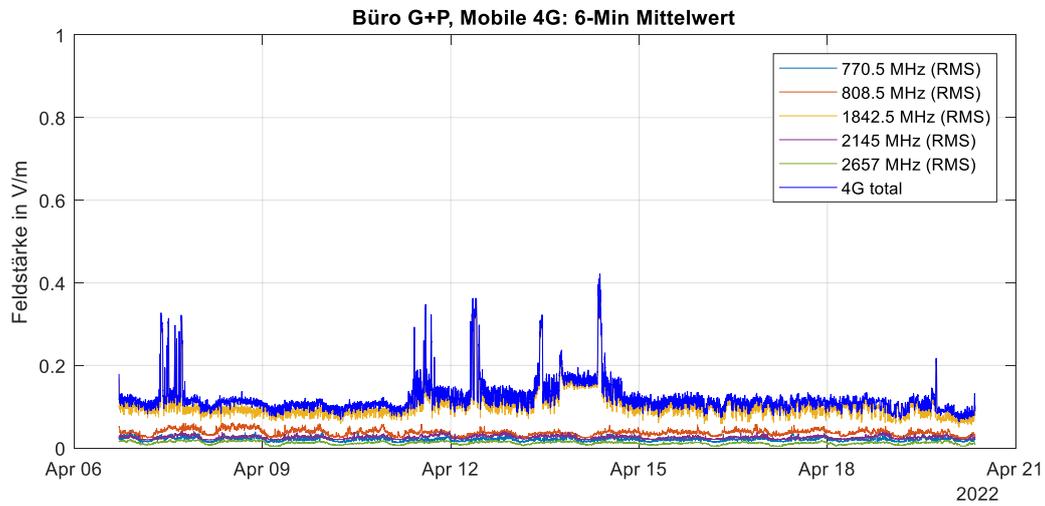


Abbildung 38: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen der 4G-Bänder am Standort G+P

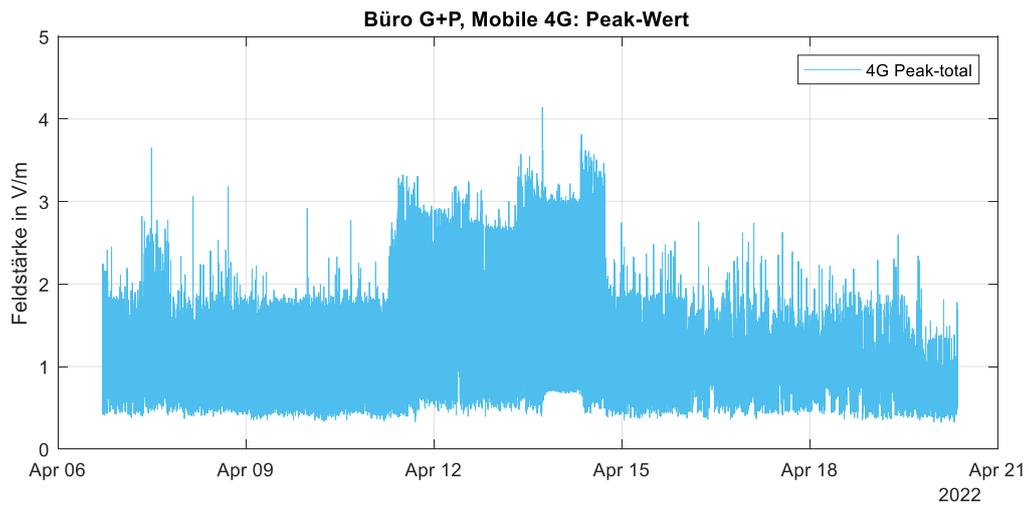


Abbildung 39: Peak-Werte der Langzeitmessungen der 4G-Bänder am Standort G+P

5.3.4 5G Band

Im 5G Band sind auch hier die Testmessungen am 14. April 2022 sichtbar. Die Spitzen vorher scheinen von vorherigen Testmessungen mit einem 5G Smartphone in der Nähe des Messgerätes zusammen zu hängen.

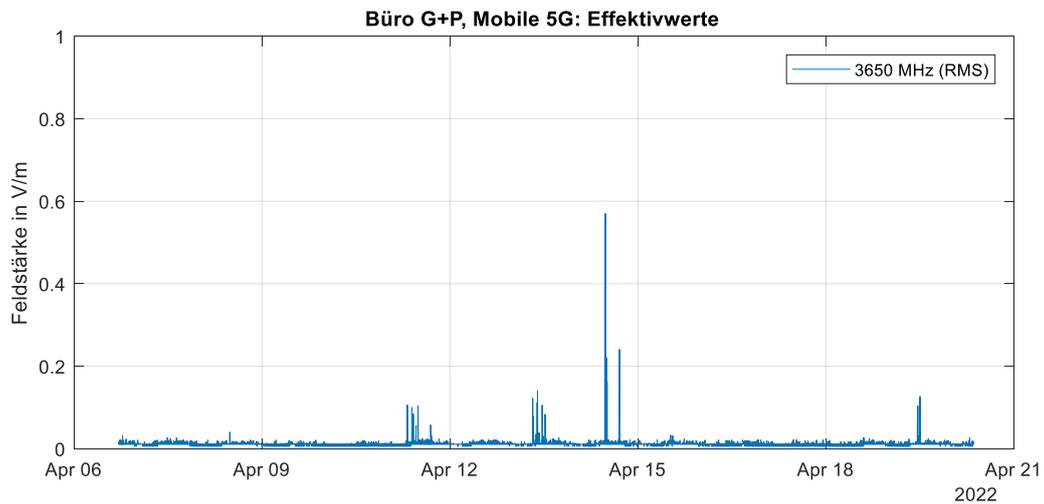


Abbildung 40: Effektivwerte der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort G+P

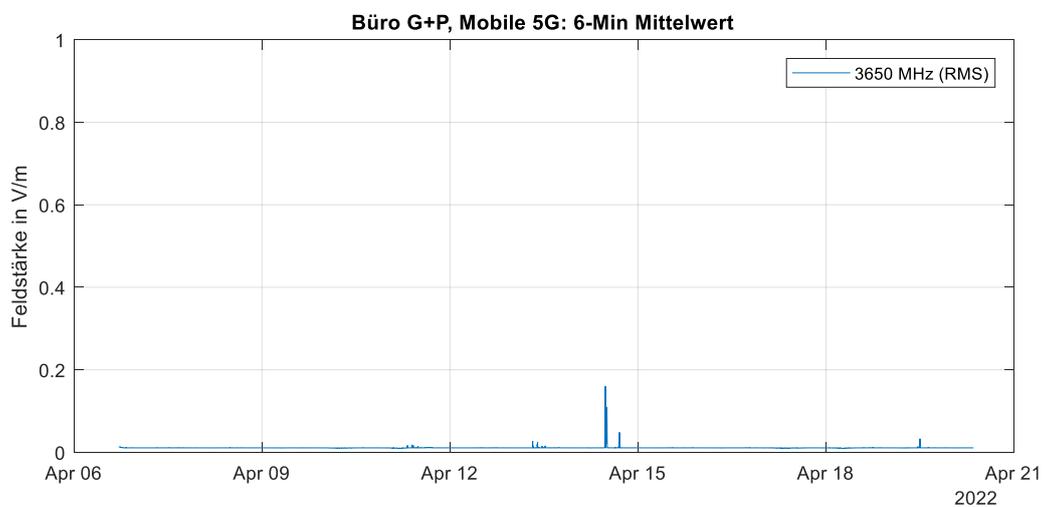


Abbildung 41: Gleitender 6-Minuten Mittelwert der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort G+P

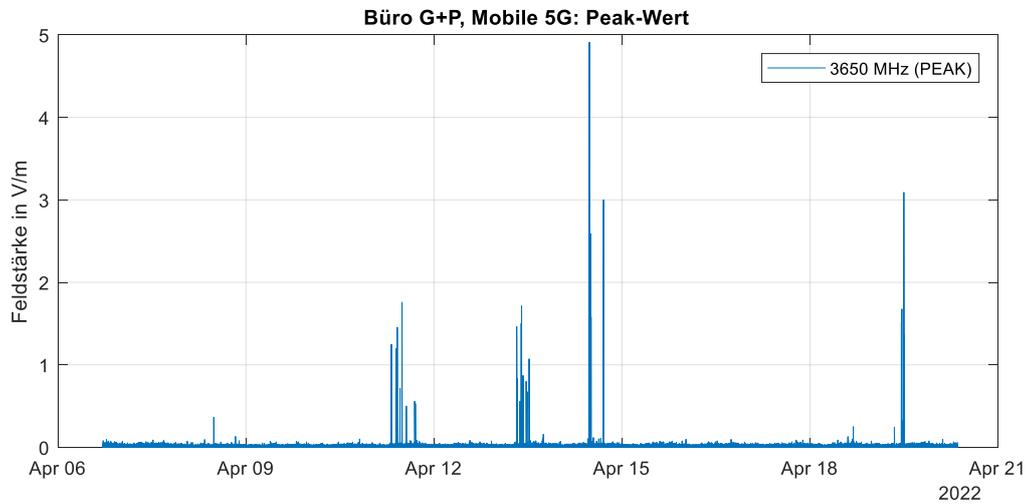


Abbildung 42: Peak-Werte der Langzeitmessungen des 5G Bands am Standort G+P

5.3.5 Fazit zum Standort G+P

An diesem Standort wurden in dem meisten Bänder sehr tiefe Werte gemessen. Einzige Ausnahme ist das Band um 1842.5 MHz. In diesem Band sind die Werte nicht nur auffällig höher als der Rest der Messungen, sondern weisen auch Aktivitätsmuster auf, die untypisch für ein Mobilfunkband sind. Vermutlich befindet sich eine DECT Telefonanlage in der Nähe. Die von DECT benutzten Frequenzen grenzen unmittelbar an das 1800 MHz Mobilfunkband. Dadurch ist eine scharfe Trennung der beiden Anteile bei der Messung aufgrund von Übersprecheffekten ('Cross-talk') erschwert.

5.4 Fazit der Langzeitmessungen

- Am 14. April 2022 fanden Testmessungen mit forciertem 'Up-' und 'Download' an den Standorten im Büro G+P und der Verwaltung des Kt. Aargau statt. Diese Testepisoden sind in den jeweiligen Messungen klar zu sehen.
- 4G bei 1.9 GHz zeigt allenfalls hohen Anteil an 'Cross-talk' von DECT Telefonen. Ohne diesen Anteil wären die Kurven gleichmässig flach.
- AGW sind an allen Standorten (OMEN) mit einer deutlichen Marge eingehalten.
- Hohe Zeitwerte durch 5G Technologie bedingt. Andererseits sind die Werte bei der 5G Technologie während den wenig aktiven Phasen tiefer.
- Das Verhältnis der Spitzenwerte (Peakwerte) zum Effektivwert (RMS) ist bei 5G deutlich grösser als bei 4G. Bei Mittelung über 6-Minuten liegen die Werte von 5G aber die meiste Zeit unterhalb derjenigen von 4G.
- Momentan ist es schwierig vorzusagen, inwiefern sich diese Muster bei stärkerer Nutzung (Verbreitung von 5G fähigen Endgeräten) des 5G Netzes verändern.

6 Resultate der hochaufgelösten Messungen

In diesem Kapitel sind die Resultate der hochaufgelösten Messungen zusammengefasst. Diese Messungen wurden unabhängig von in 3.4 beschriebenen Traffic-Tests und zu einem anderen Zeitpunkt durchgeführt. Für das Generieren von Datenverkehr im 'Up-' und 'Downlink' wurden aber die gleichen Smartphones eingesetzt.

6.1 Messung mit RTSA

Die folgende Grafik zeigt den Vergleich zwischen dem vom RTSA erfassten Effektivwert (RMS) im 3.5 GHz Band und den entsprechenden ExpoM-RF Messwerten mit und ohne forciertem 5G Traffic. Die RTSA-Messung («RTSA RMS Rohdaten») ist zeitlich sehr hoch aufgelöst und deshalb sehr «unruhig». Zum besseren Vergleich mit der ExpoM-RF Messung ist deshalb auch der gleitende RMS-Mittelwert über 2s der RTSA-Messung dargestellt («RTSA RMS 2s Mittelungszeit»). Die Messung fand auf der G+P Dachterrasse statt.

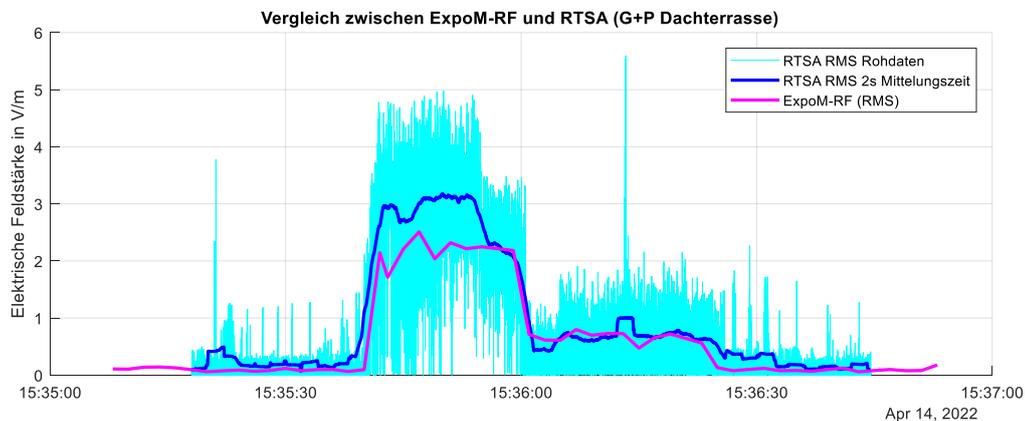


Abbildung 43: Direktvergleich zwischen den vom RTSA (Rohdaten; hellblau) und vom ExpoM-RF (violett) gemessenen Effektivwerte. Die dunkelblaue Kurve stellt den über 2 Sekunden gemittelten Effektivwert der RTSA-Messung dar.

6.2 Messung mit Oszilloskop

Messort war die Dachterrasse des Kt. AG Gebäude. Der Messorts ist so gewählt, dass eine Sichtverbindung zur Antenne besteht, keine höheren Gebäude in der Nähe sind und dadurch möglichst hohe Feldstärken erreicht werden, um eine saubere Kurve mit dem Oszilloskop erfassen zu können. An diesem Standort müssen lediglich die IGW eingehalten werden, da es sich nicht um ein OMEN handelt (siehe Kapitel 4.1). Es wurden Messungen sowohl während wenig aktiven Phasen wie auch während forciertem Daten-Download mit einem bzw. zwei Smartphones über das 5G Netz durchgeführt. Im Zeitverlauf der Messung sind die Zeitabschnitte mit hoher Aktivität im 5G Mobilfunkband sehr deutlich zu erkennen (Abbildung 44). Ausschnitte der Parallelmessung mit dem Oszilloskop während den verschiedenen Aktivitätsphasen sind in Abbildung 45 zu sehen.

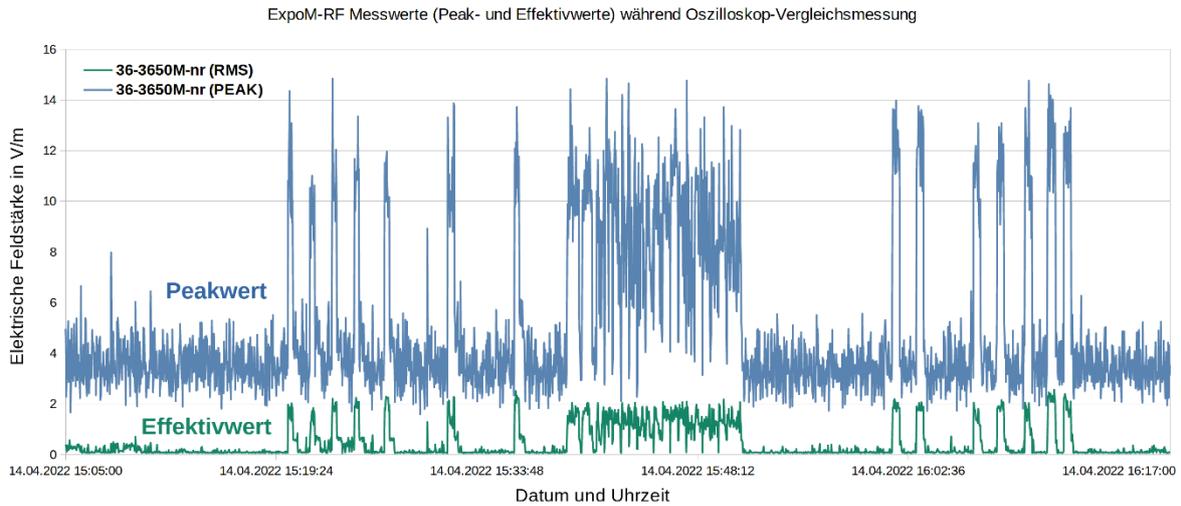
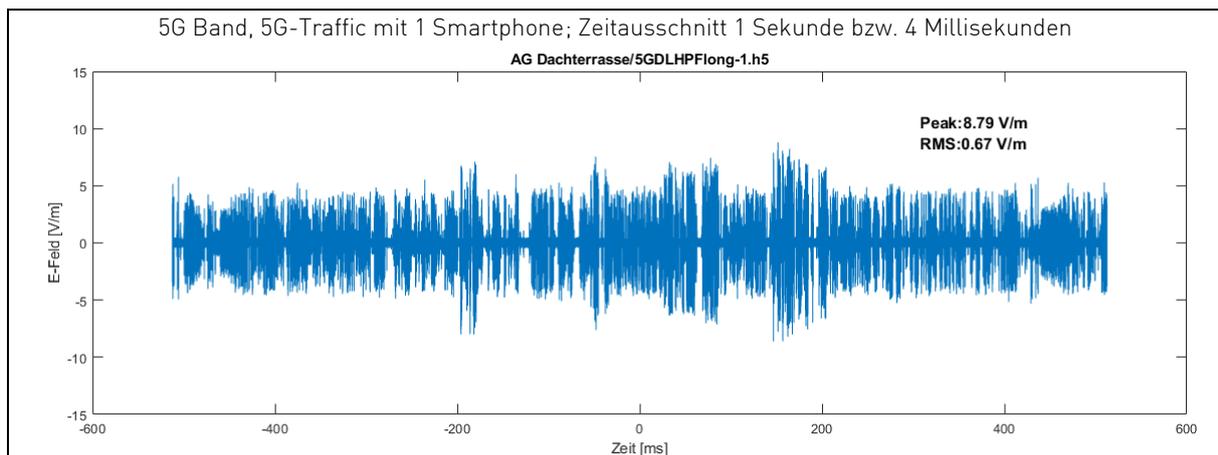
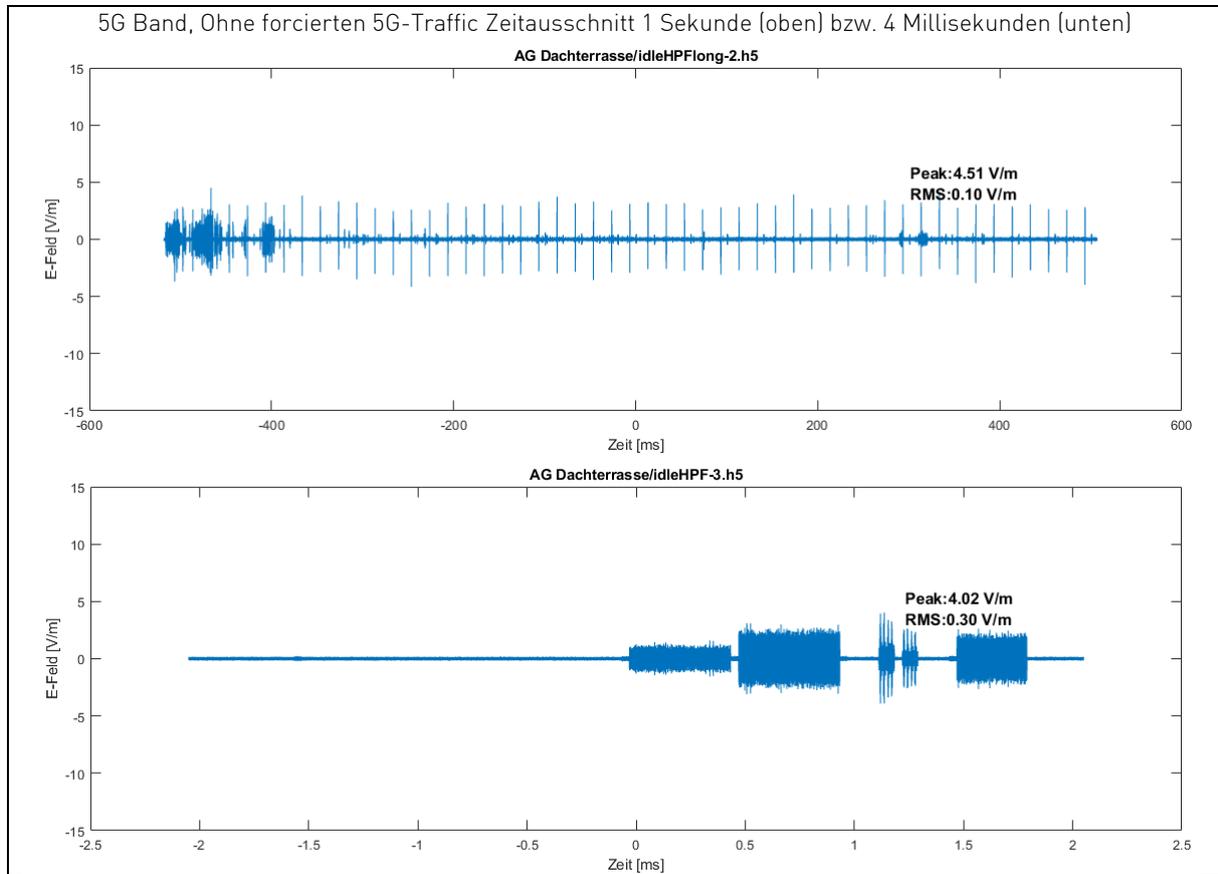


Abbildung 44: Zeitverlauf der ExpoM-RF Messwerte im 5G Band («36-3650M-nr») während den Vergleichsmessungen mit der hochaufgelösten Oszilloskop-Messung. Grün: Effektivwerte in V/m; blau: Peakwerte in V/m.

6.2.1 Oszilloskop: Kurzzeitverläufe

Die folgenden Grafiken zeigen einige Beispiele der gemessenen Signalverläufe im 5G Band, welche die Komplexität und Dynamik der Mobilfunksignale illustrieren. Wenn die Antenne wenig ausgelastet ist, finden nur sporadisch kurze Sendeaktivitäten statt. Bei erhöhter Auslastung verdichten sich die Aktivitätsphasen und die Feldstärke in den gut erkennbaren Zeitschlitten (0.5 ms) ist im Durchschnitt etwas höher. Höhere Momentanwerte der Feldstärke deuten darauf hin, dass man sich gerade in der Nähe Hauptabstrahlrichtung der Antenne befindet. Die Dichte der Sendeaktivität bzw. die Anzahl der belegten Zeitschlitze pro Zeiteinheit widerspiegelt die Gesamt-Auslastung der 5G Antenne. Der resultierende Effektivwert (RMS-Feldstärke) hängt von der Kombination beider Faktoren ab. Die Forcierung von hohem Downlink-Datenaufkommen mit einem Endgerät führt zu einer höheren Auslastung der Antenne und erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass der Hauptstrahl der adaptiven Antenne in Richtung Endgerät gelegt wird.



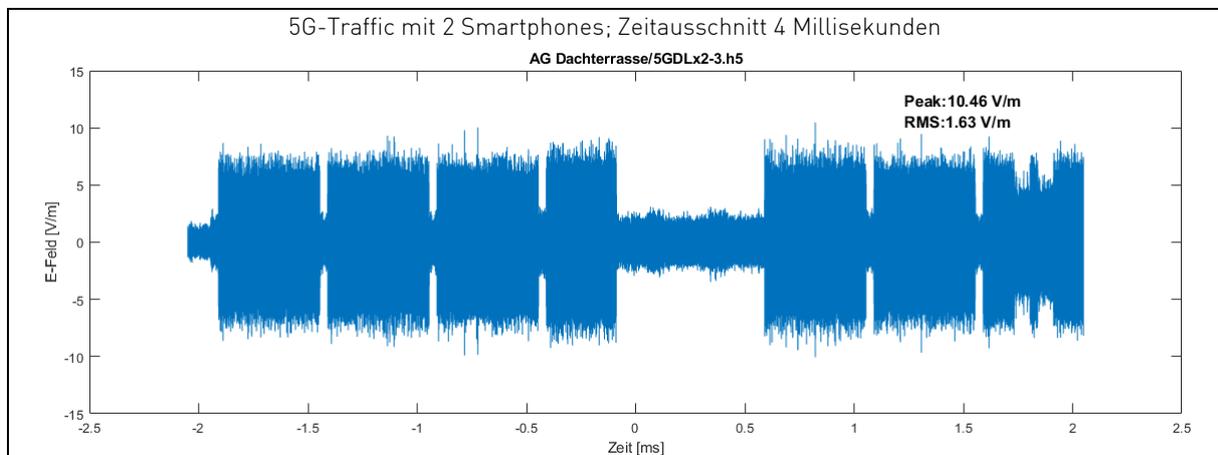
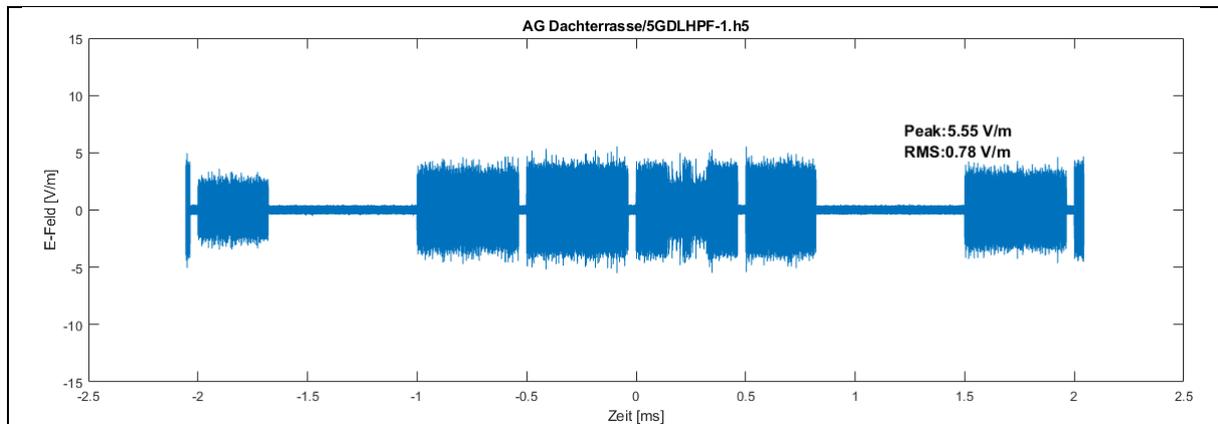


Abbildung 45: Oszilloskop-Messungen; Beispiele während Phasen mit unterschiedlich stark forcierter 5G-Aktivität

Aus diesen Kurzzeitverläufen lassen sich die wichtigsten übergeordneten Eigenschaften typischer 5G Signale ableiten bzw. verifizieren, welche für die Dimensionierung des 'low-cost' Sensors notwendig sind:

- 5G Mobilfunksignale sind in Zeitschlitzten von 0.5 ms organisiert. Zwischen diesen Zeitschlitzten herrschen kurze Sendepausen zur Synchronisierung und Umschaltung der Senderichtung zwischen Basisstation und Endgeräten (TDD).
- Der Momentanwert der Feldstärke kann von Zeitschlitz zu Zeitschlitz erheblich variieren, auch zwischen zwei unmittelbar benachbarten Zeitschlitzten. Innerhalb eines solchen 0.5 ms Zeitschlitzes bleibt die Feldstärke allerdings in den meisten Fällen näherungsweise konstant, was in den hochaufgelösten Messungen wie eine Aneinanderreihung von «Aktivitäts-Blöcken» aussieht. Bei niedriger Aktivität werden gewisse Zeitschlitzte auch ganz ausgelassen.
- Die kurzzeitigen Peak-Werte können Feldstärken im zweistelligen V/m Bereich erreichen und sind um ein Vielfaches höher als die über mehrere Millisekunden gemittelten Durchschnittswerte.

6.2.2 Gegenüberstellung (3650 MHz)

Das ExpoM-RF und das Oszilloskop sind nicht miteinander synchronisiert und arbeiten mit sehr unterschiedlichen Zeitskalen und Messzeiten. Ein Vergleich zwischen den beiden Geräten auf der Ebene einer Einzelmessung ist nicht ohne weiteres möglich. Die folgende Tabelle beschränkt sich deshalb auf eine Zusammenfassung der Wertebereiche, welche während den verschiedenen Testszenarien bzw. Aktivitätsphasen gemessen wurden. Diese zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und belegen insbesondere, dass auch die Peak Werte der sporadischen Aussendungen bei niedriger 5G-Aktivität vom ExpoM-RF zuverlässig erfasst werden.

Szenario	Effektivwert V/m ExpoM-RF	Effektivwert V/m Oszilloskop	PEAK V/m ExpoM-RF	PEAK V/m Oszilloskop
«Ruhe»	0.06 - 0.2	0.08 - 0.15	2 - 7	2 - 6
5G Traffic (1 Smartphone)	1.5 - 2.5	1.6 - 2.0	9 - 15	8 - 14
5GTraffic (2 Smartphones)	1.8 - 2.2	2.0 - 2.3	7 - 15	8 - 14

Tabelle 7: Vergleich der gemessenen Feldstärkewerte in V/m während den verschiedenen Messphasen.

7 Resultate Messung adaptive Antenne

7.1 Messungen mit forciertem Traffic

7.1.1 Übertragungsgeschwindigkeiten Mobilfunknetz (Netzeffizienz)

In der folgenden Übersicht (Tabelle 8) sind die gemessenen Übertragungsraten für die Szenarien 1 und 2 (vgl. Tabelle 5) an den drei evaluierten Standorten aufgelistet.

An allen drei Standorten führt der Wechsel von 4G nach 5G zu einem deutlichen Anstieg der effektiven durchschnittlichen Datenübertragungsrate um einen Faktor von 2 - 6. Da der Messaufbau «am lebenden Objekt» zahlreiche nicht kontrollierbare Parameter beinhaltet, sind die Messwerte zum Teil recht starken Variationen unterworfen. Auffällig sind z.B. die 4G Messungen am Standort 'OMEN'. Hier ist denkbar, dass sich das Smartphone nach der zweiten Messung auf einem anderen 4G Frequenzband oder einer anderen Basisstation registriert hat. Letzteres ist ein Faktor, der als Endnutzer im Allgemeinen nicht ohne weiteres beeinflusst werden kann. Zusammenfassend lässt sich aber in jedem Fall sagen, dass bei Benutzung von 5G die Übertragung einer gegebenen Datenmenge deutlich weniger Zeit in Anspruch nimmt als mit 4G.

Standort	Download via 4G+	Download via 5G	Datenrate 5G vs. 4G
G+P	2:30 min 2:28 min 2:23 min Durchschnitt: 6.8 MB/s	40 sec 33 sec 18 sec 18 sec Durchschnitt: 41.6 MB/s	611% (Durchschnitt)
OMEN	51 sec 43 sec 2:56 min Durchschnitt: 16.2 MB/s	31 sec 29 sec 26 sec 38 sec Durchschnitt: 32.9 MB/s	203% (Durchschnitt)
Kt. AG	1:31 min 1:50 min 2:26 min Durchschnitt: 8.9 MB/s	26 sec 28 sec 24 sec 27 sec Durchschnitt: 38.2 MB/s	426% (Durchschnitt)

Tabelle 8: Download-Zeiten, um eine Datei von 1 GB via Mobilfunk herunterzuladen (Experiment 3-4x wiederholt)

7.1.2 "Beamforming" Beobachtung

Durch die gleichzeitige Beobachtung der Feldstärke an drei Standorten lässt sich die Funktion der adaptiven Antenne in der Praxis nachvollziehen. Abbildung 46 zeigt den (über 6 Minuten gemittelten) Feldstärkeverlauf der drei Mess-Stationen während der Zeit, in der die Traffic Tests an den drei Standorten nacheinander durchgeführt wurden. Im hervorgehobenen 3.5 GHz Band sind zwei Phänomene sehr deutlich zu sehen:

Je nach (von uns herbeigeführter) Aktivität im 5G Netz sehr grosse Unterschiede in der Feldstärke zu beobachten. Während der Phasen mit hoher 5G-Aktivität dominiert der Beitrag des 3.5 GHz Bands deutlich. Wenn das 5G Netz allerdings wenig ausgelastet ist, sinkt die Feldstärke in diesem Band unter das Niveau der meisten 4G Bänder.

Das zweite Phänomen betrifft die Adaptivität der Antenne, welche in dieser Darstellung auch gut zu erkennen ist. Die höchsten Feldstärken treten jeweils am Standort auf, der in der Linie zwischen Antenne und Smartphone liegt. Bei einer Antenne mit statischem Richtdiagramm ist eine solche Beobachtung gar nicht möglich, da die Sendeleistung unabhängig von der Lage der Endgeräte immer gleich im Raum verteilt wird.

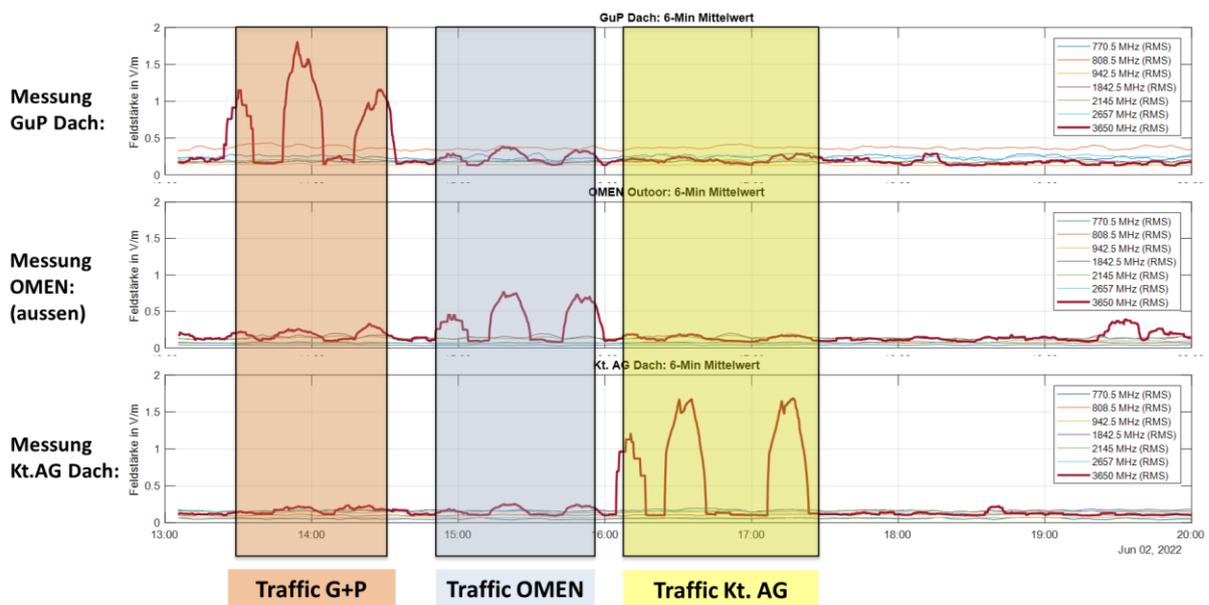


Abbildung 46: 6-Minuten Mittelwert des Feldstärkeverlauf an den drei Mess-Stationen am Nachmittag an dem die Traffic Tests durchgeführt wurden. Hervorgehoben ist jeweils das 5G-Band um 3.5 GHz.

Um diesen Zusammenhang in der Praxis zu visualisieren, ist in Abbildung 47 dieselbe Grafik ohne 5G Band dafür mit dem Fokus auf den 4G Bänder dargestellt. Die blau hervorgehobene Kurve zeigt das Total der Feldstärke in den gemessenen 4G Bänder. Im Vergleich zum 5G Band bietet sich hier ein völlig anderes Bild, wobei folgende Unterschiede besonders auffällig sind: Die Feldstärke-Maxima sind bei 5G viel stärker ausgeprägt und erreichen z.B. am Standort 'Kt. AG Dach' rund den fünffachen Wert im Vergleich zu 4G (1.5 vs. 0.3 V/m). Andererseits ist unter 4G eine ziemlich konstante «Grundlast» zu beobachten, die selbst während Perioden mit niedriger Aktivität nicht unterschritten wird. An den Standorten 'GuP Dach' und 'Kt. AG Dach' ist zudem zu beobachten, dass die gemessene Feldstärke während den Traffic-Tests nur unmerklich von dieser «Grundlast» abweicht. Am Standort 'OMEN' zeigt sich hingegen ein gewisser Anstieg der Feldstärke während der forcierten Daten-Downloads. Im Unterschied zur adaptiv betriebenen Antenne hängt die Stärke dieses temporären Anstiegs allerdings nicht vom Ort ab, an dem die Traffic Tests durchgeführt werden. Der Feldstärkeverlauf sieht bei den

drei Wiederholungen des Tests sehr ähnlich aus, unabhängig davon in welchem Winkel zur Antenne das Smartphone den Daten-Download durchführt.

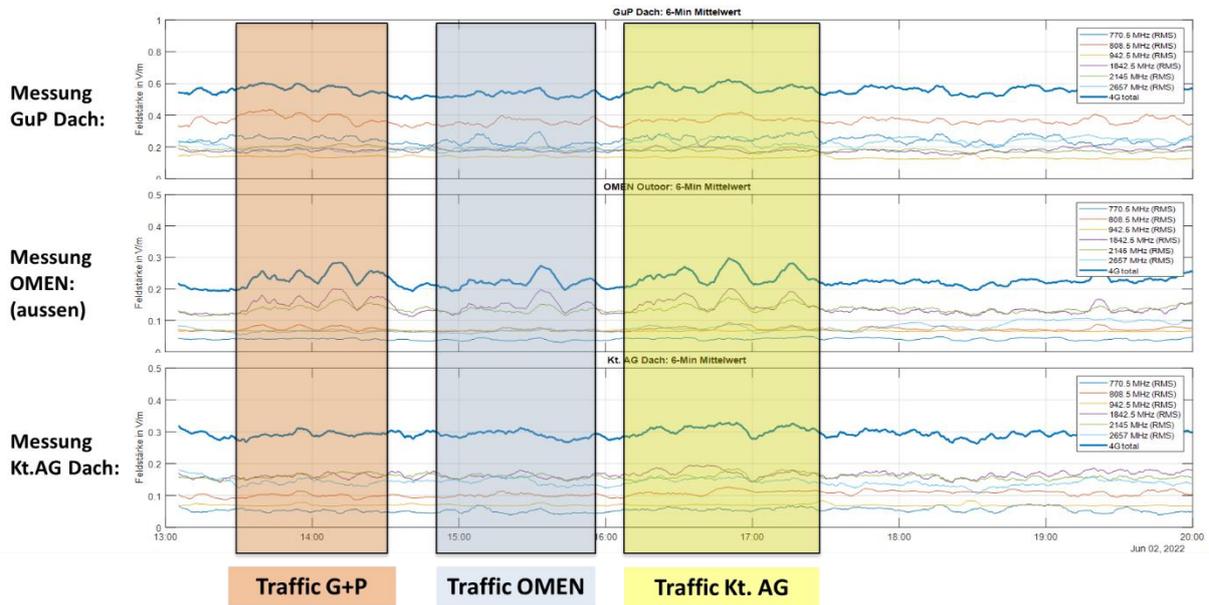


Abbildung 47: 6-Minuten Mittelwert des Feldstärkeverlauf an den drei Mess-Stationen am Nachmittag an dem die Traffic Tests durchgeführt wurden. Hervorgehoben ist das Total aller 4G Bänder. Das 5G-Band ist hier ausgeblendet

7.1.3 Feldstärke-Verlauf (Standort 'OMEN')

Abbildung 48 zeigt den Verlauf der vom ExpoM-RF gemessenen Effektivwert der Feldstärke (ohne Mittelung) am Standort 'OMEN' während des Traffic-Tests am Standort 'OMEN'. Diese Darstellung visualisiert die stark unterschiedliche zeitliche Dynamik der beiden Mobilfunkstandards. 5G zeigt eine ausgeprägte «bedarfsgesteuerte» Aktivität, während dies bei 4G in einem viel schwächerem Masse der Fall ist. Die Deutlichkeit dieses Phänomens dürfte allerdings zumindest teilweise damit begründet sein, dass 5G zurzeit noch nicht sehr intensiv genutzt wird und somit dieses Netz aktuell auch effektiv weniger «Grundlast» zu bewältigen hat.



Abbildung 48: Feldstärkeverlauf im 5G Band (obere Grafik) und 4G Bänder (unten) am Standort 'OMEN'-Aussen während den Traffic-Tests am Standort 'OMEN'. Abgebildet sind die vom ExpoM-RF gemessenen Effektivwerte (ohne zeitliche Mittelung)

7.1.4 Feldstärke und Datenrate

Basierend auf den Messungen mit forciertem Traffic kann man festhalten, dass die 5G Technologie einerseits um ein Vielfaches höhere Datenübertragungsraten als 4G ermöglicht, andererseits aber auch zu höheren maximalen Feldstärken als die älteren Standards führt. Eine pauschale Aussage, dass 5G der effizientere Standard ist, lässt sich aufgrund der Pilotmessung nicht tätigen, da die Feldstärken nicht am Ort des Smartphones gemessen wurden. Aussagen über die Effizienz des Netzes als Ganzes würden zudem die parallele Auswertung an mehreren Orten voraussetzen. Letzteres könnte mit einer Anordnung der vorgeschlagenen 'low-cost' Sensoren durchgeführt werden.

7.2 Analyse Gebäudedämpfung

Die Parallelmessung aussen / innen beim Standort 'OMEN' während ca. 24 Stunden erlaubt es, die durch das Gebäude verursachte Dämpfung abzuschätzen. Aus dem Verlauf der beiden Messungen (Abbildung 49) ist klar ersichtlich, dass im Gebäudeinnern viel tiefere Werte als aussen gemessen werden.

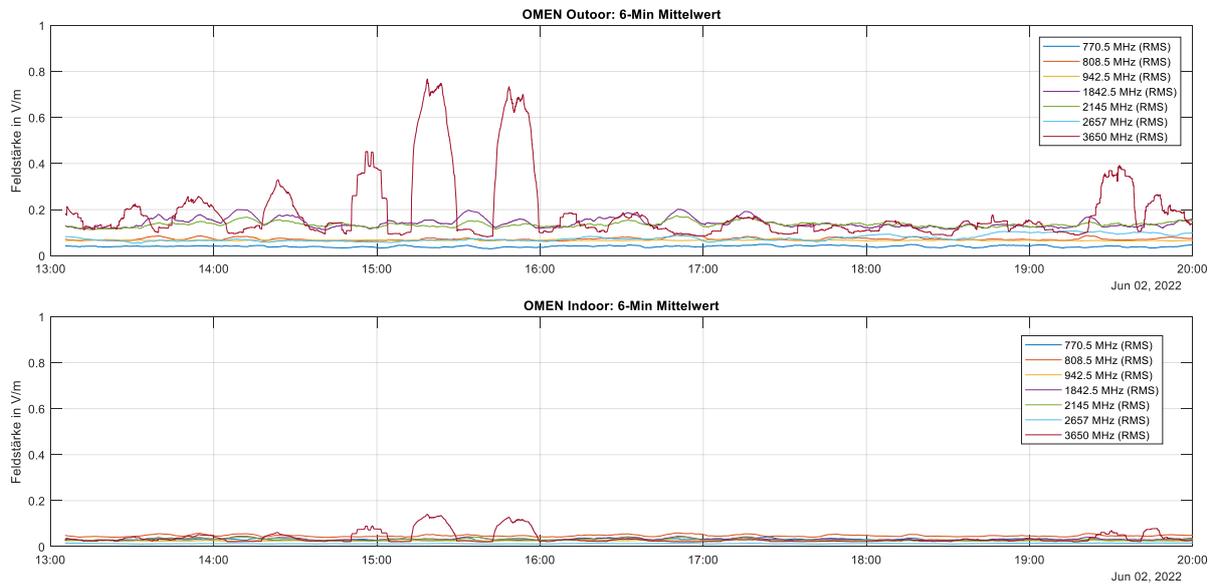


Abbildung 49: Zeitreihe der gemessenen Feldstärke während forciertem Traffic) am Standort 'OMEN'; Aussen (obere Grafik) und innen (untere Grafik). Dargestellt ist jeweils der Effektivwert gemittelt über 6 Minuten.

Tabelle 9 zeigt eine frequenzspezifische statistische Auswertung dieser Unterschiede. Ein Vergleich auf Ebene Einzelmessung ist nicht sinnvoll, da die beiden Messgeräte nicht perfekt synchronisiert sind. Deshalb wurden nur aggregierte Werte verglichen. Je nach ausgewerteter Grösse variieren die berechneten Dämpfungsfaktoren ein wenig. Es kann aber in jedem Fall deutlich und konsistent beobachtet werden, dass die Dämpfung bei höheren Trägerfrequenzen stark zunimmt. Im 3.5 GHz Band beträgt diese über 13 dB, was einer Reduktion der Leistungsdichte um 95% entspricht.

Band	Effektivwert, über der gesamten Messung gemittelt			Peak-Wert, 90% Perzentil			Maximum des über 6 Min gemittelten Effektivwerts		
	Aussen [V/m]	Innen [V/m]	Unterschied	Aussen [V/m]	Innen [V/m]	Unterschied	Aussen [V/m]	Innen [V/m]	Unterschied
11-0771M-dl	0.04	0.03	2.6 dB	0.42	0.35	1.5 dB	0.07	0.05	3.4 dB
12-0809M-dl	0.07	0.04	3.9 dB	0.56	0.33	4.6 dB	0.10	0.06	4.3 dB
15-0943M-dl	0.07	0.03	8.4 dB	0.43	0.18	7.5 dB	0.10	0.03	9.1 dB
18-1843M-dl	0.14	0.03	13.0 dB	0.85	0.19	13.1 dB	0.21	0.05	12.2 dB
21-2145M-dl	0.13	0.03	13.3 dB	0.69	0.19	11.4 dB	0.19	0.04	12.9 dB
25-2657M-dl	0.06	0.01	14.7 dB	0.40	0.05	18.6 dB	0.11	0.02	15.9 dB
36-3650M-	0.18	0.04	14.3 dB	4.42	0.96	13.2 dB	0.77	0.14	14.8 dB
Total bzw. Durchschnitt	0.29	0.08	11.0 dB	-	-	12.9 dB	-	-	12.3 dB

Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Werte Innen und Aussen am Standort 'OMEN'.

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Pilotmessungen konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Die Parallelmessungen mit einem ExpoM-RF und den hochauflösenden Messgeräten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und belegen insbesondere, dass auch die Peak Werte der sporadischen Aussendungen bei niedriger Aktivität (insbesondere bei 5G) vom ExpoM-RF zuverlässig erfasst werden.
- Die AGW sind an allen Standorten (OMEN) mit einer deutlichen Marge eingehalten.
- Bei der 5G Technologie treten in Vergleich zu 4G kurzzeitig um ein vielfaches höhere Feldstärkewerte auf. Andererseits sind die Werte bei der 5G-Technologie während den wenig aktiven Phasen tiefer, was im 6-Minuten Durchschnitt zu ähnlichen bis tieferen Werten als bei 4G führt.
- Momentan ist es schwierig vorauszusagen, inwiefern sich diese Muster bei stärkerer Nutzung (Verbreitung von 5G fähigen Endgeräten) des 5G Netzes verändern.
- Die Adaptivität der Senderichtung konnte mittels forciertem 'Download' gezeigt werden.
- Auf der Ebene des Netzwerks stellt diese Änderung im Mobilfunkstandard den grössten Unterschied hinsichtlich der Exposition dar.
- Um diesen Aspekt noch näher zu untersuchen wären eine dichtere Anordnung von Sensoren nötig. Damit könnten auch genauere Aussagen über die Effizienz des 5G-Netzes im Vergleich zu den vorherigen Mobilfunkstandards gemacht werden.
- Für die 5G-FR1 (3500 MHz) Technologie wurde aufgrund der höheren Trägerfrequenz eine deutlich höhere Gebäudedämpfung beobachtet.