



24. September 2020

# Testkonzession und Messungen adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1)

## Bericht

### Zusammenfassung

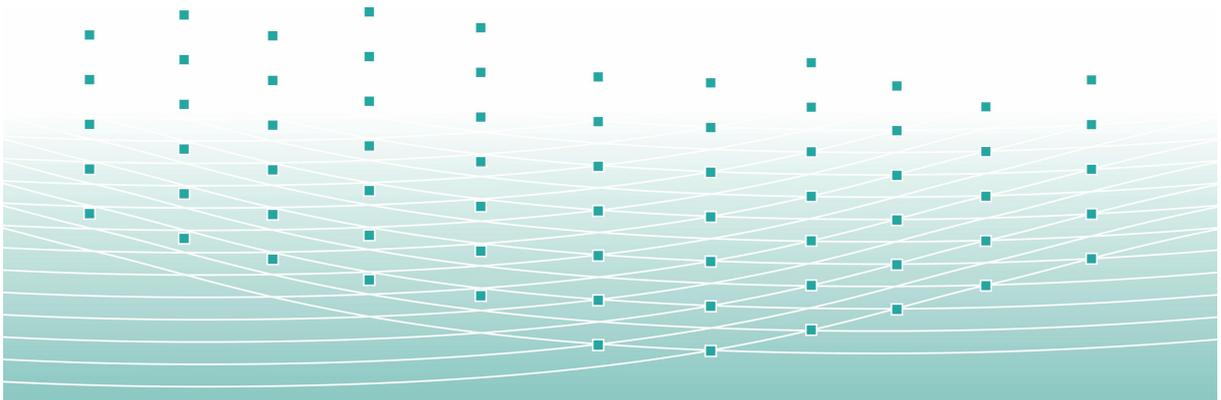
Das Mandat wurde im März freigegeben und mit der Zusammenstellung der technischen Grundlagen zur adaptiven Antennentechnik begonnen. Zur Vorbereitung der Messungen vor Ort wurde ein Messprogramm definiert und die notwendigen Messgeräte zusammengetragen.

Im Juni konnten die Messungen an zwei Basisstationen realisiert werden. Zur Validierung der Messungen wurden Simulationen durchgeführt und zusätzlich weitere Anwendungsfälle betrachtet, deren Realisierung mittels eines Messaufbaus zu aufwändig gewesen wäre.

Die Messungen und Simulationen zeigen, dass die Exposition um die adaptiven Antennen geringer und ausgeglichener ist als um die herkömmlichen Sektorantennen. Die adaptiven Antennen senden die Nutzdaten gezielt zum Endgerät, womit die Übertragungseffizienz seitwärts zunimmt und damit die Übertragungsdauer verringert wird. Gleichzeitig nimmt die Exposition direkt vor der Antenne ab, da nur noch Nutzdaten in diese Richtung gesendet werden.

Die Messungen bestätigen ebenfalls die Arbeitsweise der Power-Lock-Funktion als dynamische Regelung auf eine mittlere Sendeleistung.

Die heute angewendete Beurteilungsmethode betrachtet den Spitzenwert der Feldstärke, wie es bei der Exposition mit dem 2G-Mobilfunk (GSM) und seinen starren Senderichtungen angebracht war. Mit dem 5G-Mobilfunk liegt nun eine Aussendung vor, die dank der grossen Bandbreite und der gezielten Senderichtung aus sehr kurzen Datenpaketen besteht, auf welche anschliessend lange Sendepausen folgen. Somit liegt der heutige Beurteilungswert deutlich über der effektiven mittleren Feldstärke. Um der Charakteristik dieser neuen Funktechnologie gerecht zu werden, sollte die Beurteilung der Aussendung neu definiert werden.



## Inhalt

1	Ausgangslage Mandat.....	3
2	Technische Grundlagen .....	4
2.1	Theorie zum Beamforming.....	4
2.1.1	Beamforming-Antennen sind eine Weiterentwicklung der Funktechnologie.....	4
2.1.2	Beams können gleichzeitig in mehrere Richtungen gesendet werden .....	4
2.1.3	Einschaltdauer der Beams .....	6
2.1.4	Leistungsregelung der Beams .....	6
2.1.5	Die Form der Beams .....	7
2.1.6	Planung einer Mobilfunkzelle .....	13
2.2	Theorie zu einem Korrekturfaktor .....	14
2.3	Theorie zum Faktor DL/UL bei TDD .....	15
2.4	Beamforming-Antennen im bisherigen Mobilfunknetz .....	15
3	Messung der Exposition durch adaptive Antennen.....	16
3.1	Bisherige Messkampagnen in Europa .....	16
3.2	Messorte und Messdaten der BAKOM-Messungen .....	16
3.2.1	Standort KONI .....	17
3.2.2	Standort ZH654-2.....	19
3.3	Durchgeführte Messungen.....	21
3.4	Messungen KONI.....	22
3.4.1	Messung der Feldstärke.....	22
3.4.2	Messung des Spektrums.....	24
3.4.3	Messung der Power-Lock-Funktion .....	26
3.5	Messungen ZH654-2.....	27
3.5.1	Messung der Feldstärke.....	27
3.5.2	Messung des Spektrums.....	29
3.5.3	Messung der Power-Lock-Funktion .....	31
4	Simulation der Exposition durch adaptive Antennen .....	31
4.1	Simulation KONI.....	31
4.1.1	Aussendung mit 1 Beam in Richtung Messpunkt 1 .....	32
4.1.2	Aussendung mit 1 Beam in Richtung Messpunkt 2 .....	33
4.1.3	Aussendung mit 2 Beams in Richtung MP1 und MP2 .....	34
4.1.4	Aussendung mit 13 Beams (ein Beam alle 10°) .....	35
4.1.5	Aussendung mit herkömmlicher Sektorantenne .....	38
4.1.6	Aussendung der Signalisation.....	40
4.2	Simulation ZH654-2 .....	42
5	Analyse.....	43
5.1	Folgerungen .....	43
5.2	Korrekturfaktor für adaptive Antennen.....	44
5.2.1	Dämpfung der neuen Frequenzen .....	44
5.2.2	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des TDD-Verhältnisses.....	44
5.2.3	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Anzahl Beams .....	44
5.2.4	Radar in der NISV .....	46
5.3	Vorschlag des BAKOM .....	46
6	Weitere Arbeiten.....	46

## 1 Ausgangslage Mandat

Auf den 1. Februar 2000 wurde die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) in Kraft gesetzt. Sie regelt die Begrenzung der Emissionen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Zum damaligen Zeitpunkt waren für den Mobilfunk die zwei Frequenzbänder 900 MHz und 1'800 MHz im Einsatz. Mit den darauffolgenden Mess- und Vollzugsempfehlungen wurde der Vollzug des Mobilfunks mit der damaligen GSM-Technologie (2G) und ihren Sektorantennen (gegebenes festes Antennendiagramm für den Sektor) ermöglicht. Seither wurden die weiterentwickelten Mobilfunktechnologien UMTS (3G), LTE (4G) und 5G eingeführt und ebenfalls kamen die Frequenzbänder 700 MHz, 800 MHz, 1'400 MHz, 2'100 MHz, 2'600 MHz sowie 3'500 – 3'800 MHz neu dazu.

Im Jahre 2019 begannen die Schweizer Mobilfunkbetreiber ihre Basisstationen mit den neuen adaptiven Antennen mit dynamischen Abstrahleigenschaften (einer der grossen Vorteile der Weiterentwicklung des Mobilfunks) auszurüsten. Im gleichen Jahr wurde in der NISV für adaptive Antennen der massgebende Betriebszustand unter Berücksichtigung der Variabilität von deren Senderichtungen und Antennendiagramme festgelegt. Die «Mobilfunk- und WLL-Basisstationen Vollzugsempfehlung zur NISV» aus dem Jahre 2002 wurde laufend der Mobilfunktechnologie angepasst und mit Nachträgen ergänzt. Zurzeit ist eine detaillierte Vollzugshilfe zur Beurteilung der Beamforming-Antennen gemäss NISV noch ausstehend. Bis zur Publikation dieser detaillierten Vollzugshilfe hat das BAFU den Kantonen empfohlen, adaptive Antennen wie konventionelle Antennen zu beurteilen (Schreiben vom 14. April 2019 und 31. Januar 2020).

Das BAFU ist für die NISV und die Vollzugsempfehlungen zuständig. Innerhalb des Bundes wirken Experten von METAS und BAKOM aktiv an der Entwicklung von Methoden zur Berechnung und Messung der Exposition von Mobilfunkstationen mit. Das METAS hat im Auftrag des BAFU einen technischen Bericht mit dem Titel "Messverfahren für 5G-Basisstationen bis 6GHz" verfasst, der am 18.02.2020 veröffentlicht wurde.

In einer vom BAFU geleiteten Begleitgruppe zur Erarbeitung einer Vollzugshilfe für adaptive Antennen werden gegenwärtig einige theoretische, auf Statistik basierende Vorschläge diskutiert. Messungen des realen Betriebs einer im 3'500 – 3'800 MHz Frequenzband betriebenen adaptiven Antenne in der Schweiz bestehen noch nicht, würden jedoch wichtige Grundlagen zur Bewertung der Exposition liefern.

Dieses Mandat erfordert vertiefte Kenntnisse der Netztechnologie und des Netzbetriebs und fällt daher in den Kompetenzbereich der BAKOM-Experten.

Der begonnene Einsatz der 5G-Mobilfunktechnologie wird den Betrieb neuer Technologien, insbesondere den Einsatz adaptiver Antennen, ermöglichen. Während die heute verwendeten Antennen eine bestimmte und stabile Strahlung in alle Richtungen haben, ermöglichen adaptive Antennen, die Strahlung bezüglich den aktiven Benutzern auszurichten. Ein Beobachter, der sich z.B. in einem Ort mit empfindlicher Nutzung (OMEN) befindet, wird somit von der Strahlung mit zeitveränderlicher Abstrahlcharakteristik exponiert. Wenn der Strahl nicht in seine Richtung gelenkt wird, ist die Exposition gering, wenn er in seine Richtung gelenkt wird, ist sie höher. Das vorliegende Mandat sollte es ermöglichen, diese Exposition zu definieren.

Die aktuellen Vollzugsempfehlungen zur NISV sind für konventionelle Sektorantennen ausgelegt und für die Bewertung von adaptiven Antennen nicht geeignet. Für die Betreiber ist jedoch die volle Nutzung der Eigenschaften der adaptiven Antennen eine Voraussetzung für den zweckvollen Einsatz von 5G im 3,5 GHz-Band.

Ziel dieses Mandats ist es, eine Bewertung der Exposition durch adaptive Antennen aufzuzeigen, die mit den Bestimmungen der NISV im Einklang steht, die technologisch neutral ist und die Vorteile adaptiver Antennen vollumfänglich berücksichtigt. Um das Ziel zu erreichen, wird das Expertenteam seine Antwort auf eine Analyse der Betriebsarten adaptiver Antennen sowie auf eine Analyse der Exposition mit Computersimulationen und Feldmessungen stützen.

Der vorliegende Bericht des BAKOM enthält konkrete Vorschläge für eine Expositionsabschätzung und wird der vom BAFU geleiteten Arbeitsgruppe, die für die Überarbeitung der Umsetzungsempfehlungen des NISV zuständig ist, vorgelegt.

## 2 Technische Grundlagen

### 2.1 Theorie zum Beamforming

#### 2.1.1 Beamforming-Antennen sind eine Weiterentwicklung der Funktechnologie

Bei der Weiterentwicklung der Funkübertragung zum 5G-Standard sind die neuesten Möglichkeiten der Technik miteinbezogen worden. Gleichgeblieben sind die benutzten Frequenzbänder und es wird auch die gleiche Modulationstechnik verwendet. Neu hingegen werden die zu übertragenden Daten in kürzerer Zeit aufbereitet, da viel leistungsfähigere Computer zur Verfügung stehen. Ebenfalls gibt es neue Antennenmodule, die dank der leistungsfähigeren Aufbereitung der Sendesignale, ein richtungsabhängiges Versenden der Daten ermöglichen. Durch das gerichtete Aussenden von Nutzdaten ergibt sich der grosse Vorteil, dass in der restlichen Funkzelle diese Nutzdaten nicht oder nur vermindert empfangen werden können. Damit wird die restliche Funkzelle mit weniger unnützen Funksignalen «gestört» und es ergeben sich bessere Empfangs- und Sendebedingungen für die Endgeräte innerhalb der ganzen Funkzelle und auch in den benachbarten Funkzellen.

Betriebs man zwei gleiche Funkzellen einmal mit konventionellen Sektorantennen und einmal mit Beamforming-Antennen, so ergibt sich bei gleicher Datenübertragungsmenge die funktechnisch interessante Reduktion der Störsignale in der Funkzelle mit den Beamforming-Antennen. Damit ergibt sich, als Nebeneffekt, auch eine Reduzierung der mittleren Exposition der Personen in der Funkzelle.

Der Betrieb von adaptiven Antennen ist unabhängig von den Anforderungen und der Art der Endgeräte (IoT, URLLC, eMBB). Grundsätzlich sind die Bedürfnisse der Endgeräte immer eine Mischung aus:

- Grösse der Datenmenge;
- Notwendiger Antwortzyklus (Reaktionszeit).

Diese Parameter werden von der Sendeeinheit der Basisstation kontrolliert und die zu übermittelnden Daten werden entsprechend aufbereitet. Den Funksignalen selber ist nicht anzumerken, zu welcher Datenmenge sie gehören oder welche Antwortzyklen sie aufweisen.

#### 2.1.2 Beams können gleichzeitig in mehrere Richtungen gesendet werden

Theoretisch können Antennenarrays, die mit der sogenannten Digital-Beamforming-Technologie ausgerüstet sind, gleichzeitig eine beliebige Anzahl Beams in beliebigen Ausrichtungen erzeugen, da jedem Transmitterelement der Antenne eine eigene Amplituden- und Phaseninformation zugeteilt werden kann. Diese Beams könnten sogar den gleichen Resource-Block (also gleiche Frequenz und gleicher Zeitschlitz) belegen. Ein Hersteller gibt an, dass sie heute bereits das Digital-Beamforming in ihren 3.5 GHz Basisstationen betreiben und dabei 2 Broadcast-Beams und 16 Traffic-Beams einsetzen können. In Funkzellen, die mit reduzierter Leistung betrieben werden (z.B. infolge einer kleinen Zellgrösse oder einer NIS-Beschränkung), können nicht alle 16 Traffic-Beams eingesetzt werden, da sonst die Signalstärke zu klein wird.

Antennenarrays, die mit der sogenannten Analog-Beamforming-Technologie ausgerüstet sind, können gleichzeitig immer nur einen einzigen Beam aussenden. Die Phaseninformation zur Definition der Senderichtung wird hierbei linear auf alle Transmitterelemente der Antenne angewendet, womit n-Beams (n = Anzahl Transmitterelemente einer Antenne) erzeugt werden können. Für das 3.5 GHz-Band gibt es heute 64T/64R Antennen mit denen 64 verschiedene Beamformen erzeugt werden können.

In den Frequenzbändern unterhalb 6GHz wird die Hybrid-Beamforming-Technologie eingesetzt. Hier werden einige Transmitterelemente der Antenne zu einem «Funktionsblock» zusammengefasst und jeweils mit der Analog-Beamforming-Technologie betrieben. Dadurch ergeben sich Einschränkungen

in der Anzahl Beams und aus dieser Anzahl wird sogar nur eine beschränkte Auswahl (Codebooks) verwendet. Dadurch wird die Signalberechnung weniger rechenintensiv und damit werden die Sendeeinheiten als industrielles Produkt herstellbar und können kommerziell eingesetzt werden. Ein Hersteller gibt an, dass sie heute das Hybrid-Beamforming in ihren adaptiven Antennen einsetzen und dabei gleichzeitig 8 Beams erzeugen können, darunter kann sich 1 Broadcast-Beam (aus einer Auswahl aus 8 Szenarien) befinden. Ebenso können Traffic-Beams gleichzeitig, jedoch in verschiedene Senderrichtungen, die gleichen Resource-Blöcke (gleiche Zeit-/Frequenzblöcke) benutzen.

Kleinzellen und Mikrozellen sind technologisch weniger anspruchsvoll aufgebaut und können daher weniger Beams erzeugen oder werden sogar gänzlich ohne Beamforming betrieben.

Es ist zu bemerken, dass die Anzahl und auch Ausprägung der Beams von bestehenden Beamforming-Antennen also möglicherweise durch SW-Updates ändern können, jedoch bleiben die Beamformen immer innerhalb der physikalischen Grenzen des zur Antenne gehörenden umhüllenden Antennendiagramms.

### **Multiband-Antennen**

Theoretisch können Beamforming-Antennen gleichzeitig in mehreren Frequenzbändern senden. Die Aussendungsmerkmale sind stark von der Baugröße einer Beamforming-Antenne abhängig und die Baugröße ihrerseits ist von der Wellenlänge des verwendeten Frequenzbandes abhängig. Heute werden Beamforming-Antennen für das 3.5 – 3.8 GHz Frequenzband eingesetzt. In den vom Mobilfunk verwendeten Frequenzbändern unterhalb 3 GHz werden aktuell konventionelle Sektorantennen eingesetzt. Aus optischen Gründen kann eine Beamforming-Antenne (3.5 GHz) und eine Sektorantenne (unterhalb 3GHz) aufeinandergestellt und in ein Gehäuse verpackt werden.

### **SISO und MIMO**

Bei Funkverbindungen ohne Reflektionen, meist bei Sichtverbindung, wird die Basisstation den direkten Beam mit der besten Verbindungsqualität zum Endgerät wählen (SISO: Single Input, Single Output).

Bei Funkverbindungen mit genügend Reflektionen, oft keine Sichtverbindung, können gleichzeitig zwei oder mehrere alternative Verbindungspfade zum gleichen Endgerät betrieben werden, welche die Reflektion an umliegenden Strukturen wie Hausfassaden oder Geländeerhebungen ausnutzen (SU-MIMO: Single User – Multiple Input, Multiple Output).

Falls die Antenne der Basisstation aus sehr vielen Transmitterelementen besteht (man spricht von über hundert Elementen) und damit auch viele einzelne Beams erzeugen kann, so kann ein Endgerät über viele Verbindungspfade gleichzeitig angesteuert werden (massive MIMO: massive Multiple Input, Multiple Output).

Im täglichen Einsatz werden von einer Antenne der Basisstation mehrere Endgeräte über verschiedene Beams gleichzeitig angesteuert. Die einzelnen Verbindungen passen sich dabei der Struktur innerhalb der Funkzelle an und können sowohl direkte Verbindungen als auch Verbindungen über Reflektionen aufbauen (MU-MIMO: Multi User – Multiple Input, Multiple Output).

### **Die Sendeleistung einer Antenne wird auf die Beams aufgeteilt**

Die Beamforming-Antennen bestehen aus einer Anordnung von einzelnen Transmitterelementen, die jeweils mit einer maximalen Element-Sendeleistung abstrahlen können. Diese maximale Element-Sendeleistung ist durch die thermische Belastbarkeit vorgegeben. Werden alle Transmitterelemente so angesteuert, dass nur ein Beam entsteht, ergibt die Summe aller Element-Sendeleistungen die maximale Sendeleistung (und die maximale Sendeleistung multipliziert mit dem Antennengewinn ergibt die ERP).

Wenn diese Antenne zwei oder mehrere Beams aussendet, so werden diese Beams jeweils über eine bestimmte und möglicherweise unterschiedliche Anzahl Transmitterelemente ausgesendet. Somit wird

eine Beam-Sendeleistung aus der Summe der Sendeleistung der jeweils involvierten Anzahl Transmitterelementen gebildet.

Bei den allermeisten installierten Anlagen ist die Sendeleistung der Antenne durch die Bewilligung auf einen bestimmten Wert limitiert. Somit wird die bewilligte Sendeleistung auf die Transmitterelemente und damit auch auf die einzelnen Beams aufgeteilt.

Die umhüllenden Antennendiagramme werden, mit der maximalen Element-Sendeleistung auf allen Transmitterelementen und unter Berücksichtigung aller möglichen Senderichtungen, gemessen. Dabei werden jeweils alle Traffic-Beams und alle Broadcast-Beams in einem Diagramm zusammengefasst.

### 2.1.3 Einschaltdauer der Beams

Die Übertragung der Signalisierung erfolgt in vorgegebenen Resource-Blocks, die zeitlich und in definierten Unterfrequenzen (Subcarrier) festgelegt ist. Die sogenannten Broadcast-Beams, über welche die Signalisierung in die Funkzelle gesendet wird, sind daher regelmässig während kurzen Zeitabschnitten vorhanden.

Die Übertragung der Nutzdaten erfolgt «paketweise» in Resource-Blocks. Diese Resource-Blocks werden von der Sendeeinheit der Basisstation optimiert auf die verschiedenen Unterfrequenzen und Zeitabschnitte verteilt, je nach aktueller Situation des Datenvolumens, der Zellauslastung und der räumlichen Position des Endgerätes. Die sogenannten Traffic-Beams, über welche die Nutzdaten an die Endgeräte gesendet werden, sind nur vorhanden, wenn Nutzdaten versendet werden. Die Nutzdaten werden in einem Raster von Resource-Blöcken (Zeit-/Frequenzblöcke) an die Endgeräte gesendet, wobei die minimale Übertragungszeit der Dauer eines solchen Resource-Blocks von 1 ms entspricht.

Zur Veranschaulichung sei hier ein praktisches Beispiel der Dauer eines Traffic-Beams bei Datenraten gemäss maximaler Zielvorgabe des 5G-Standards von 10 Gbit/s gegeben. Als Modellrechnung für schlechtere Empfangsbedingungen ist auch eine Datenrate von 1 Gbit/s aufgeführt:

- Das Datenvolumen eines 90 minütigen HD-Films beträgt ~8Gbyte.  
Dies ergibt eine Dauer des Traffic-Beams für den Download von 6.4s (bei 10 Gbit/s) respektive 64s (bei 1 Gbit/s).
- Das Datenvolumen einer bilderreichen Internetseite beträgt ~5Mbyte.  
Dies ergibt eine Dauer des Traffic-Beams für den Download von 4ms (bei 10 Gbit/s) respektive 40ms (bei 1 Gbit/s).

Zu den heutigen Mobilfunk-Abos mit Datenraten von 2 Gbit/s, 700 Mbit/s oder 100 Mbit/s ist zu erwähnen, dass die technische Funkübertragung mit der maximal möglichen Datenrate am jeweiligen Ort stattfindet. Hingegen erfolgt die Lieferung der Daten aufgestückelt im Rahmen der jeweiligen Vertragsbedingungen. Durch diese Aufstückelung des Traffic-Beams ergibt sich eine resultierende Download-Dauer für den HD-Film von 32s, 91s respektive 640s und eine resultierende Download-Dauer für die Internetseite von 0.02s, 0.057s respektive 0.4s

Wird ein HD-Film gestreamt, so benötigt dies eine theoretische Datenrate von  $8\text{Gbyte}/90\text{Min} = 64\text{Gbit}/90 \times 60\text{s} = 64'000\text{Mbit}/5400\text{s} = 12\text{Mbit/s}$ . Dies entspricht in etwa 1/200 der Datenrate eines 2 Gbit/s Mobilfunk-Abo und damit wird der Traffic-Beam alle 0.2s für eine Dauer von 1ms bei diesem Endgerät verweilen.

Die von den Betreibern angegebenen Datenraten beziehen sich auf die Nutzdaten der Endgeräte. Die Signalisierung erfolgt «parallel» dazu und benötigt, je nach Datenpaketgrösse und Anwendungsart zusätzlich etwa 5%-20% der Paketgrösse.

### 2.1.4 Leistungsregelung der Beams

Grundsätzlich können Systeme mit Digitalem-Beamforming, mit dem notwendigen Rechenaufwand, eine Leistungsregelung durchführen. Die aktuell eingesetzten Beamforming-Antennen verwenden noch keine dynamische Leistungsregelung um auf die ändernden Funkbedingungen eines Endgerätes zu reagieren. Damit sendet die Antenne immer mit der voreingestellten Sendeleistung (kleiner oder

gleich der bewilligten Sendeleistung), wobei sich diese auf die involvierten Transmitter-Elemente aufteilt.

Ebenfalls ist es heute nicht möglich, auf die jeweilige Ausgestaltung der Funkzelle einzugehen. So können beispielsweise die Bereiche mit nahegelegenen OMEN nicht mit weniger Beam-Leistung versorgt werden als die Bereiche in denen sich keine OMEN befinden.

Die aktuelle Weiterentwicklung geht jedoch in die Richtung der kontinuierlichen Leistungsregelung für Beams, da damit die Funkbedingung in der Zelle weiter verbessert werden kann. Ein Hersteller gibt an, dass sie ab Ende 2020 Systeme verwenden werden, welche die Sendeleistung in Richtung der einzelnen Endgeräte individuell einstellen und damit die Empfangsleistung beim Endgerät für eine optimale Datenübertragung anpassen können. Dazu werden die Transmitterelemente eines Beams mit individueller Sendeleistung angesteuert.

Dabei sei allerdings nochmals darauf hingewiesen, dass die Ausprägung der Beams immer innerhalb der physikalischen Grenzen des umhüllenden Antennendiagramms bleiben wird.

### **Exposition während des Beamformings**

Bei der Anwendung der Beamforming-Technologie ergeben sich für einen spezifischen Ort (z.B. einen OMEN) folgende Expositions-Situationen:

- 1) entweder sendet die Antenne nur die Broadcast-Beams aus, wovon mindestens einer den OMEN erreicht;
- 2) oder die Antenne sendet, zusätzlich zu den Broadcast-Beams, auch einen oder mehrere Traffic-Beams aus, wovon mindestens einer den OMEN erreicht.

Aus der ersten Situation ergibt sich das Expositions-Minimum. In diesen Momenten sind nur die Broadcast-Beams aktiv und es befindet sich kein aktiv kommunizierendes Endgerät in der Zelle. Diesen Zustand könnte man sich beispielsweise in der Nacht vorstellen.

Aus der zweiten Situation ergibt sich das Expositions-Maximum. Während diesen Momenten senden alle bestehenden (einer oder mehrere) Traffic-Beams die gesamte Sendeleistung in Richtung des betrachteten OMEN wobei dabei die gesamte System-Datenrate übertragen wird. Dazu müssen allerdings mehrere Endgeräte aktiv sein, da einzelne Endgeräte über deutlich kleinere Abo-Datenraten verfügen und diese Endgeräte selber auch «Funkpausen» einlegen um die angesammelte Datenmenge zu verarbeiten.

#### **2.1.5 Die Form der Beams**

Die Ausformung der Beams ist auf dem Antennendiagramm ersichtlich. Aus all den technisch möglichen Diagrammen benutzen die Systemhersteller ein Set von Antennendiagrammen (Codebook), das sie beim Betrieb einsetzen. Die heute eingesetzten Antennen haben mehr als tausend einzelne Antennendiagramme.

Die nachfolgenden Diagramme stellen verschiedene Arten von Einzel-Beams dar, die von einer Antenne erzeugt werden können.

### Macro-Beam

Dieser Beam wird genutzt, wenn die Antenne die ganze Funkzelle ausleuchten will, z.B. für die Signalisierung. Das Antennendiagramm der Abbildung 1 zeigt einen weiten horizontalen Öffnungswinkel (blaue Linie) und einen recht weiten vertikalen Öffnungswinkel (rote Linie), also ähnlich zu einer konventionellen Sektorantenne. Der Macro-Beam hat einen mittleren Gain (~15-18 dBi).

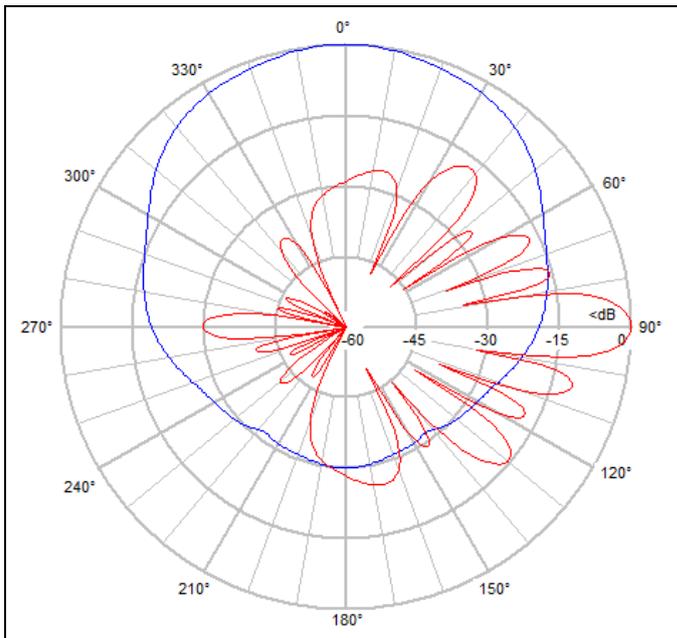


Abbildung 1: Beispiel eines Macro-Beams

### Traffic-Beam

Dieser Beam wird zur Übertragung der spezifischen Nutzerdaten genutzt. Das Antennendiagramm der Abbildung 2 zeigt einen engen horizontalen als auch engen vertikalen Öffnungswinkel. Der Traffic-Beam hat einen hohen Gain (~20-25 dBi).

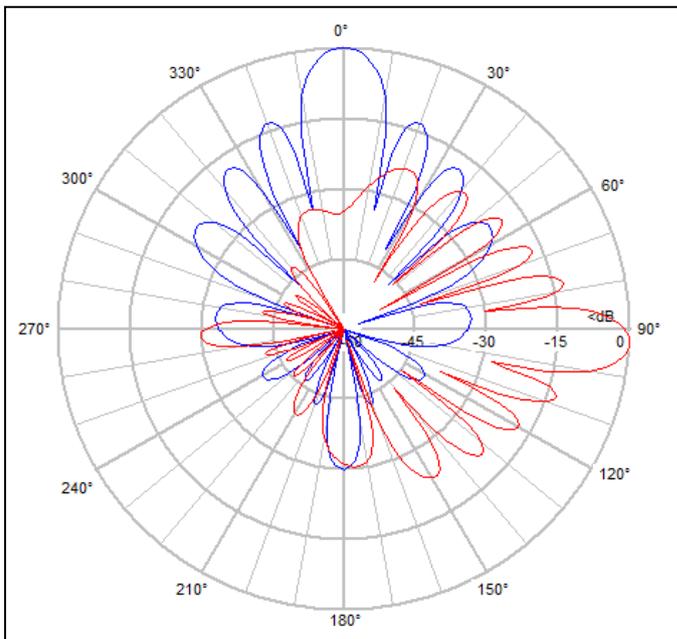


Abbildung 2: Beispiel eines Traffic-Beams

### Highrise-Beam

Dieser Beam kann genutzt werden, wenn die Antenne ein Hochhaus versorgen soll. Aktuell wird diese Beam-Art in der Schweiz nicht eingesetzt. Das Antennendiagramm der Abbildung 3 zeigt einen kleineren horizontalen und einen weiteren vertikalen Öffnungswinkel mit einem mittleren Gain (~15-18 dBi).

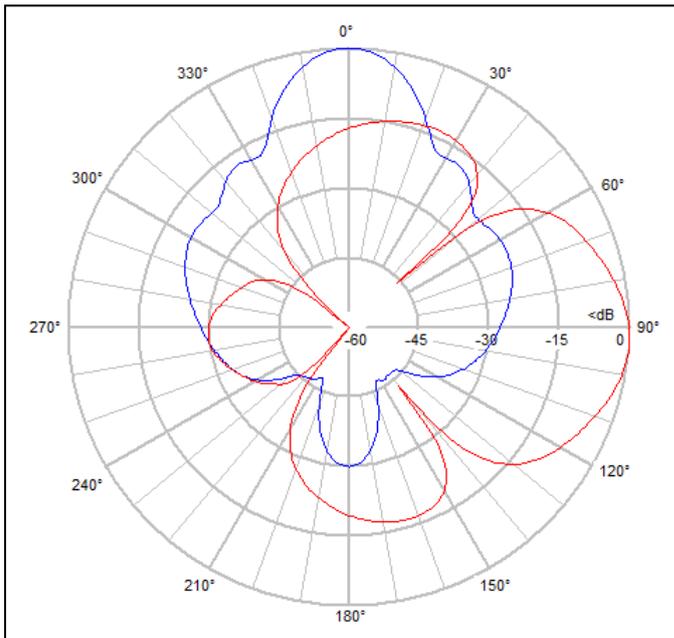


Abbildung 3: Beispiel eines Highrise-Beams

### Hotspot-Beam

Dieser Beam wird eingesetzt wenn die Antenne als Hotspot genutzt werden soll. Das Antennendiagramm der Abbildung 4 zeigt weite horizontale und vertikale Öffnungswinkel mit einem kleinen Gain (~10-15 dBi).

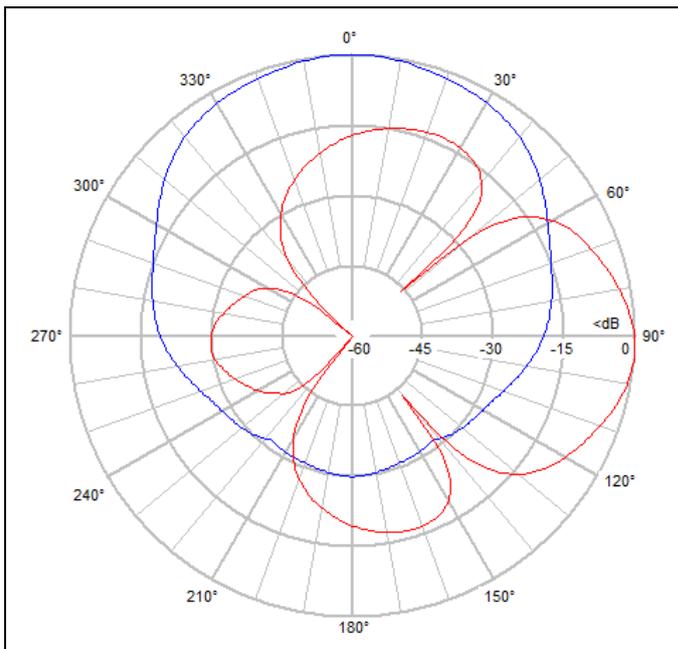


Abbildung 4: Beispiel eines Hotspot-Beams

### Die Form der einzelnen Beams

Alle diese Beams können mit verschiedenen Abstrahlungsrichtungen erzeugt werden. Die nachfolgenden Figuren zeigen verschiedene Abstrahlungsrichtungen mit ihren Ausprägungen. Das Antennendiagramm der Abbildung 5 zeigt einen Beam der fast genau rechtwinklig von der Antenne abgestrahlt wird, mit  $0^\circ$  Azimut (blaue Linie, horizontales Diagramm,  $0^\circ$ ) und mit  $4^\circ$  Tilt (rote Linie, vertikales Diagramm,  $94^\circ$  entspricht  $4^\circ$  Tilt abwärts). Die Hauptkeulen heben sich deutlich von den Nebenkeulen ab:

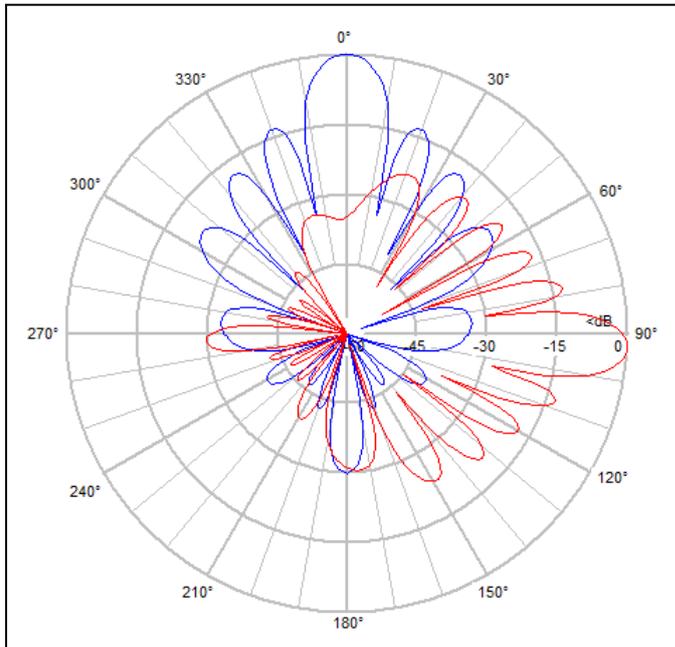


Abbildung 5: Beispiel eines Traffic-Beams

Sobald die Abstrahlrichtung von der  $0^\circ$ -Achse abweicht, werden die Nebenkeulen grösser. Als Extremfall zeigt das Antennendiagramm der Abbildung 6 einen Beam, der in horizontaler Ausprägung genau nach vorne abgestrahlt wird (blaue Linie,  $0^\circ$ ), jedoch mit einem  $22^\circ$  Abwärts-Tilt (rote Linie,  $112^\circ$ ). Hier zeigt sich nun auch eine Nebenkeule mit  $15^\circ$ -Aufwärts-Tilt (rote Linie,  $75^\circ$ ):

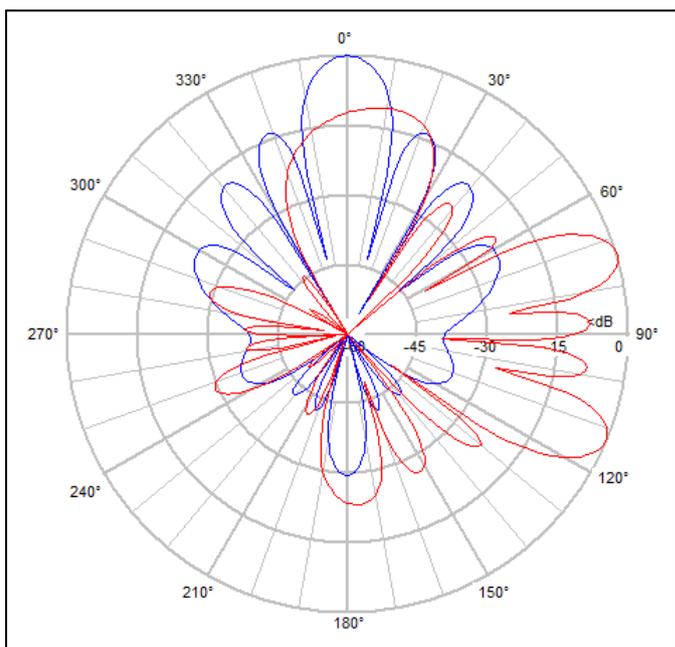


Abbildung 6: Beispiel eines Traffic-Beams

Das Antennendiagramm der Abbildung 7 zeigt einen Beam, der horizontal mit maximaler 57°-Auslenkung nach rechts abgestrahlt wird (blaue Linie, 57°) und dies mit einem 2°-Abwärts-Tilt (rote Linie, 92°). Hier zeigt sich die grösste Nebenkeule (blaue Linie, -73° resp. 287°):

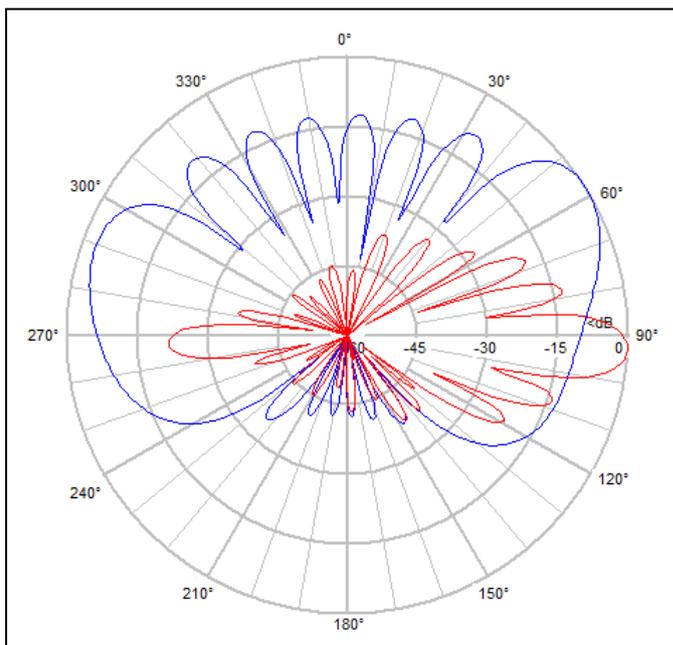


Abbildung 7: Beispiel eines Traffic-Beams

Starke Nebenkeulen sind aus Radiotechnischer-Sicht nicht wünschenswert, da sie die Signale in Richtungen senden, in welchen diese nicht erforderlich sind.

### Umhüllendes Antennendiagramm

Zur Planung einer Funkzelle ist es nicht wichtig genau zu wissen, welcher einzelne Beam in welche Richtung geht, denn dies wird während des Betriebs von der Basisstation laufend optimal eingestellt. Jedoch ist es für den Planer wichtig zu wissen, welches Gebiet überhaupt erreicht werden kann. Dazu erstellen die Hersteller oder die Betreiber ein sogenannt umhüllendes Antennendiagramm, für welches sie die Antennendiagramme der einzelnen Beams übereinanderlegen und die Maximalwerte all dieser Kurven zu einem neuen umhüllenden Antennendiagramm zusammenfassen. Der Planer verwendet nun das umhüllende Antennendiagramm der Broadcast-Beams und der Traffic-Beams um die Funkzelle zu planen.

Da das umhüllende Antennendiagramm den maximal möglichen Gewinn in alle Richtungen angibt, wird dieses auch zur Berechnung der Exposition verwendet.

Die Abbildung 8 zeigt ein umhüllendes Broadcast-Antennendiagramm. Im horizontalen Diagramm (blaue Linie) sind die Konturen von einzelnen Beams ersichtlich. Das vertikale Diagramm (rote Linie) ist das umhüllende Antennendiagramm der gleichen Beams wobei es ersichtlich ist, dass alle eine fast waagrechte Hauptkeule ( $91^\circ$ ) haben.

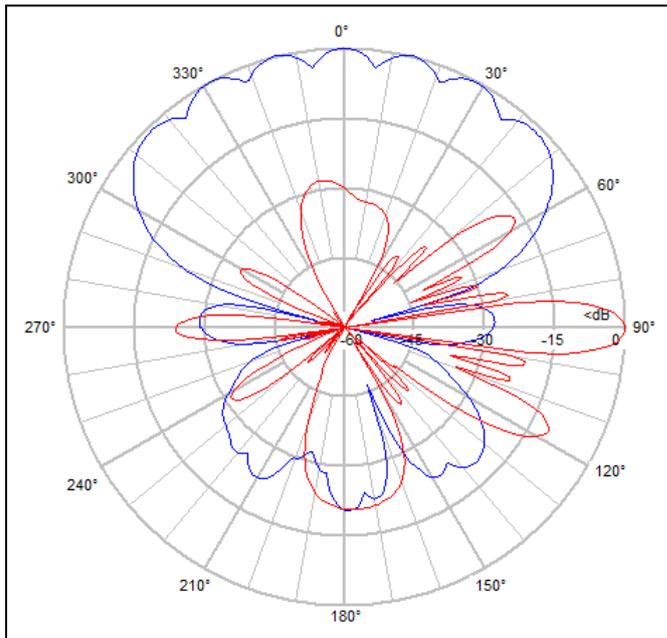


Abbildung 8: Beispiel eines umhüllenden Broadcast-Antennendiagramms

### Reziprokes Beamforming

Mit der Weiterentwicklung der Computertechnologie erhalten die Mobilfunksysteme mehr Rechenleistung. Damit sind Mobilfunksysteme bereits heute in der Lage das Reziproke-Beamforming anzuwenden. Dabei wird das System nicht mehr einen Beam aus einer Liste (Codebook) auswählen, sondern es berechnet sich laufend die beste Beamform bezüglich der Umstände in der Funkzelle und der aktuellen Position der aktiven Endgeräte. Unter Berücksichtigung der aktuellen Situation von Reflektionen, Abschattungen und der Position von anderen Endgeräten, berechnet das System also eine Beamform, die die bestmögliche Übertragung zum Ziel-Endgerät ergibt. Zum einen wird dabei der Beam möglichst in Richtung des Endgerätes, evtl. über Reflektionen, gesteuert. Zum andern werden andere Endgeräte möglichst ausgespart, indem in deren Richtungen jeweils eine Nullstelle im Antennendiagramm erstellt wird.

Damit nehmen die konkret angewendeten Beamformen fast beliebige Konturen an, jedoch bleiben sie immer innerhalb des umhüllenden Antennendiagramms.

Abbildung 9 zeigt ein umhüllendes Traffic-Antennendiagramm. Im horizontalen Diagramm (blaue Linie) ist nur ein breiter Beam ersichtlich. Da es hier keine Codebook-Beams gibt, können diese auch keine «Wellenlinie» wie in Abbildung 8 abzeichnen. Das vertikale Diagramm (rote Linie) zeigt, dass es sich um das umhüllende Antennendiagramm der Beams mit einer fast waagrechten Hauptkeule (91°) handelt.

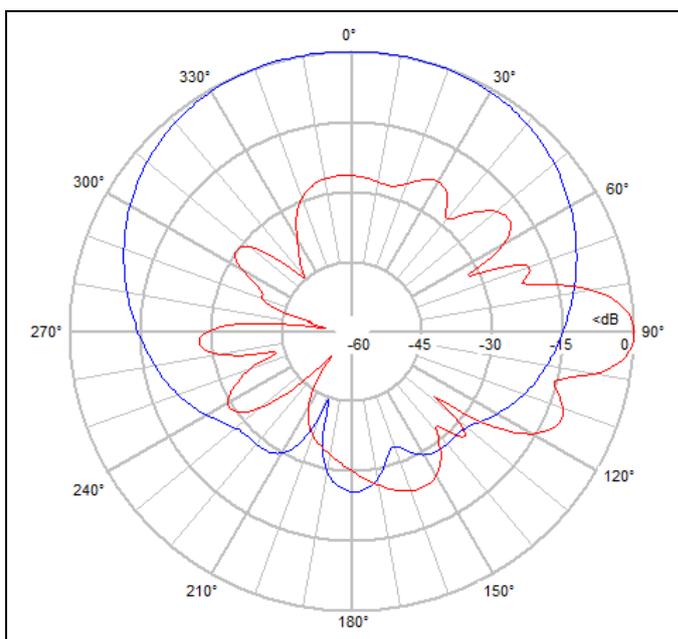


Abbildung 9: Beispiel eines umhüllenden Traffic-Antennendiagramms

### 2.1.6 Planung einer Mobilfunkzelle

Die Planung einer Mobilfunkzelle mit ihren Sektoren wird oft durch die Anzahl und Verteilung der Nutzer, die erforderliche Fernmeldeverkehrskapazität sowie die Topologie und Topographie bestimmt. Sie erfolgt rein nach funktechnischen Aspekten unter der Bedingung, dass die NIS-Vorgaben den Betrieb dieser Zellgrösse erlauben und der Standort überhaupt benutzbar ist (Zustimmung des Standorteigentümer).

Ist der Standort einmal definiert, wird die bestmögliche Antenne gewählt. Die Gewährleistung des Handover erfolgt mit dem umhüllenden Antennendiagramm der Broadcast-Beams. Die NIS-Vorgaben werden durch das umhüllende Antennendiagramm der Traffic-Beams definiert.

Die genaue Position der einzelnen Nutzenden mit den zugehörigen Beams sind planerisch nicht bedeutsam, da die Anlage diese gemäss den aktuellen Send- und Empfangsbedingungen laufend optimal auswählt.

Wichtig für die Planung ist die Beurteilung der Exposition. Gemäss NISV wird das Expositions-Maximum als Beurteilungswert verwendet. Dabei darf die maximale Sendeleistung höchstens so eingestellt sein, dass die Exposition, bei 100%-Auslastung der Systemdatenrate in einer Senderichtung, an den OMEN den AGW nicht überschreitet. Diese Beurteilungsart ist aus der Anwendung von statischen Antennendiagrammen, wie sie bisher eingesetzt werden, entstanden. Da bei adaptiven Antennen der Betriebszustand der 100%-Auslastung in eine Senderichtung sehr selten auftritt, liegt die wahre Exposition allermeistens klar unterhalb des AGW.

Eine Problematik ergibt sich in der Praxis bei der Einplanung einer adaptiven Antenne ins bestehende Netz, falls die bisherige Sendeleistung durch den AGW limitiert war. In diesem Fall wurde die bisherige Sendeleistung durch das Antennendiagramm der Sektorantenne definiert und neu wird sie durch das Antennendiagramm des Traffic-Beams (grösserer Gewinn) definiert. In der Folge wird die Abdeckung des Broadcast-Beams (kleinerer Gewinn) kleiner als bei der bisherigen Sektorantenne und damit wird die flächendeckende, nahtlose Einplanung der adaptiven Antenne ins bestehende Netz nicht durchführbar.

## 2.2 Theorie zu einem Korrekturfaktor

Für die Bewertung der Exposition wird bisher, gemäss NISV, das Expositions-Maximum als Beurteilungswert verwendet. Dieser Beurteilungswert ist aus der Anwendung von statischen Antennendiagrammen entstanden, bei denen es noch keine Variabilität der Senderichtung gab. Damals, bei 2G (GSM), war es auch ziemlich wahrscheinlich, dass über eine längere Zeit mit voller Sendeleistung gesendet wurde. Seither hat sich der Mobilfunk grundlegend verändert und es werden neue Funktechnologien mit adaptiven Antennen angewendet. Adaptive Antennen senden die Nutzerdaten gerichtet nur noch in einen Teil der Funkzelle und damit wird es in der restlichen Funkzelle ruhiger. Der Beurteilungswert wird diesem Umstand nicht gerecht und liegt damit wesentlich über der wahren Exposition. Hier könnte eine korrigierte Beurteilung in Betracht gezogen werden, welche die wahre Exposition näher am Vorsorgewert zulässt und gleichwohl jederzeit die vorsorgliche Emissionsbegrenzung einhält. Um die Beurteilung zu korrigieren, könnte ein Korrekturfaktor  $k$  eingeführt werden. Dieser Korrekturfaktor könnte z.B. aufgrund von statistischen Überlegungen, technischen Herleitungen oder Feldstärkemessungen vor Ort hergeleitet werden.

Da die Datenübertragung zu den Endgeräten allermeist nur kurzzeitig stattfindet, so könnte die Exposition in Richtung des Endgerätes während den Übertragungsblöcken des Traffic-Beams einen leicht höheren Peak-Wert aufweisen. Da in den Zeiten ohne Datenübertragung die Exposition deutlich kleiner ist, ist der Vorsorgewert im Mittel eingehalten. Dies würde für die Datenübertragung einen grösseren SINR (Signal-Rausch-Abstand) erlauben, wodurch diese mit einer besseren Modulationsart und damit in einem kürzeren Zeitraum erfolgen kann und die Dauer der Exposition beim Endgerät und vor allem auch in diesem Zellbereich kürzer wird. Ein Betrieb, der kurzzeitig höhere Peak-Werte zulässt, entspricht der Art und Weise der Übertragung von Datenpaketen.

So beruhen beispielsweise die ICNIRP-Ganzkörperrestriktionen, von welchen sich die Grenzwerte der NISV ableiten, auf einem 30 Min. Mittelwert (vor ICNIRP 2020 war es noch ein 6 Min. Mittelwert).

ICNIRP verwendet diesen Mittelwert, da Studien zeigen, dass sich die Temperatur im Gewebe bei einer solchen Expositionssituation typischerweise nach 30 Minuten erhöht.

In der NISV sind heute bereits verschiedene Arten von Mittelungen vorhanden, so zum Beispiel für Radaranwendungen und Installationen der Bahn.

### Der Leistungsbegrenzungs-Mechanismus

Die Mobilfunkindustrie schlägt einen Leistungsbegrenzungs-Mechanismus vor, der in der Basisstation eingebaut ist und die Sendeleistung kontinuierlich überwacht. Dabei wird die aktuelle Sendeleistung laufend auf eine definierte Mittelungsdauer hochgerechnet. In Moment wo die bewilligte Sendeleistung als Mittelwert überschritten würde, reduziert dieser Leistungsbegrenzungs-Mechanismus die Sendeleistung, damit der Vorsorgewert immer eingehalten ist.

Zusammen mit dem Einsatz eines solchen Leistungsbegrenzungs-Mechanismus müsste der Wert des Korrekturfaktors wohlüberlegt sein. Wird dieser zu klein gewählt, so kann das Beamforming nicht ausgeführt werden. Wird der Korrekturfaktor zu gross gewählt, schaltet die Leistungsreduktion sehr oft ein und in der nachfolgenden Kompensationsphase mit reduzierter Leistung ist das Beamforming dann auch nicht mehr möglich. Je nach Standort und Nutzergruppe in einer Funkzelle könnte der betrieblich optimale Korrekturfaktor möglicherweise variieren. Die Definition des Korrekturfaktors als Maximalwert könnte hier helfen, auch die noch kommende Praxiserfahrung zu berücksichtigen.

Mit dem Leistungsbegrenzungs-Mechanismus würde gemäss NISV «bei adaptiven Antennen die Variabilität der Senderichtungen und der Antennendiagramme berücksichtigt» und die Beamforming-Antennen könnten mit ihren Vorteilen und Charakteristiken eingesetzt werden.

Neben den technischen Eigenschaften müssen wohl auch die administrativen Aspekte der Bewilligungsverfahren einbezogen werden.

## 2.3 Theorie zum Faktor DL/UL bei TDD

Funksysteme, die mit TDD betrieben werden, nutzen für den DL und den UL denselben Frequenzteilbereich. Insbesondere die Internetnutzung mit viel Datendownload verlangt im Mobilfunknetz nach einer asymmetrischen Lastverteilung zu Gunsten des DL. Andere Anwendungen können sehr abweichende Konfigurationen bedingen wie z.B. IoT, B2B oder eMBB.

Die von der Basisstation gesendeten Resource-Blöcke (Zeit-/Frequenzblöcke) sind in Slots und diese wiederum in Symbole unterteilt. Diese Symbole können als DL- oder UL-Symbol definiert werden. Damit kann die Lastverteilung DL/UL berücksichtigt werden und eine entsprechend asymmetrische DL/UL-Einstellung vorgenommen werden.

Bezüglich der gegenseitigen Störbeeinflussung ist es unbedingt notwendig, dass im TDD-Betrieb alle Endgeräte im selben Moment Daten empfangen und auch senden. Ansonsten stört ein sendendes Endgerät mit grosser Wahrscheinlichkeit ein benachbartes empfangendes Endgerät. Dies gilt für Endgeräte die im selben Frequenzband arbeiten oder in benachbarten Frequenzbändern oder gar in unterschiedlichen Betreibernetzen.

Daher ist es notwendig, dass alle Netze und insbesondere auch benachbarte Funkbänder mit einer synchronen DL/UL-Belegung betrieben werden. Das BAKOM erteilt diesbezüglich keine Vorgaben und daher haben sich die Betreiber auf ein gemeinsames und synchrones DL/UL-Verhältnis geeinigt. Sie haben sich auf ein TDD-Pattern von 4:1 geeinigt (mit der Subframe Struktur DDDSU und dem Slot Format D=0, U=1, S=32 gemäss ETSI TS 138213). Das ergibt eine Sendedauer der Basisstationen von etwa 8 ms innerhalb eines 10 ms-Radioframes.

Auf CEPT-Ebene wird zurzeit eine ECC-Empfehlung zur Synchronisation von TDD Netzen (3600 MHz) für die vereinfachte Koordination an den Landesgrenzen erarbeitet. Das könnte zukünftig zu einem leicht abweichendem DL/UL-Verhältnis führen.

Es sei bemerkt, dass TDD in der Schweiz vor der Einführung von 5G noch nie wirklich eingesetzt wurde.

## 2.4 Beamforming-Antennen im bisherigen Mobilfunknetz

Im Zuge der Modernisierung von bestehenden Sendestandorten und deren Ausbau auf die 5G-Technologie, wird auch die entsprechend neue Antennentechnologie installiert. Aus Sicht der Ökonomie ist es sinnvoll die bestehende Infrastruktur zu nutzen, wenn dies sowohl technisch und als auch administrativ möglich ist.

Für den Betrieb der bestehenden 3G- und 4G-Netze werden keine Beamforming-Antennen eingesetzt. Diese älteren Technologien unterstützen, im Gegensatz zu 5G, das Beamforming nicht oder nur in geringerem Rahmen.

Für 4G-Systeme sind im Standard zwar schon 8x8 Antennen-Systeme für den DL beschrieben, jedoch wären die Beamforming-Antennen für die bisher benutzten Frequenzbänder unterhalb 3 GHz relativ gross und hätten infolge der NIS-Beurteilung die oben erläuterte Problematik der kleineren Zellgrösse im bestehenden Mobilfunknetz.

### **3 Messung der Exposition durch adaptive Antennen**

#### **3.1 Bisherige Messkampagnen in Europa**

In Frankreich hat die Agence nationale des fréquences (ANFR) Breitbandmessungen durchgeführt und dabei die Situation der Feldstärken vor der Inbetriebnahme einer 5G-Beamforming Antenne mit derjenigen nach der Inbetriebnahme, in den Betriebszuständen « nur Signalisation» und «mit Traffic-Beam», verglichen: « Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 2 intermédiaire : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G. Juillet 2019 ».

In Deutschland hat Vodafone (Sept/Oct 2019, Düsseldorf) Breitbandmessungen bezüglich der Leistungsaufteilung bei zwei Beams und der PowerLock-Funktionalität durchgeführt.

#### **3.2 Messorte und Messdaten der BAKOM-Messungen**

Zur Beurteilung der Exposition wurden Basisstationen der drei Schweizer Mobilfunkbetreiber gesucht, wo bereits Beamforming Antennen in Betrieb sind und auf denen die 3.5 GHz Funkbänder ordentlich bewilligt und eingeschaltet sind. Ausgewählt wurden:

- die Basisstation KONI in Liebefeld (Swisscom) auf dem Campus von BAG, BLW, BLV und Agroscope, Messungen am 11. und 19.6.20;
- und die Basisstation ZH654-2 in Reinach AG (Sunrise) bei einem Fussballplatz, Messungen am 15.6.20.

Beide Stationen haben in der Senderichtung ein gut zugängliches und freies Gelände mit direkter Sichtverbindung zur Antenne. Bei diesen zwei Standorten können die Beamforming Antennen ohne spezielle Bewilligung betrieben werden.

Der dritte Anbieter (Salt) hatte zum Zeitpunkt der geplanten Messungen noch keine Basisstation mit bewilligtem 3.5 GHz Frequenzband in Betrieb.

### 3.2.1 Standort KONI

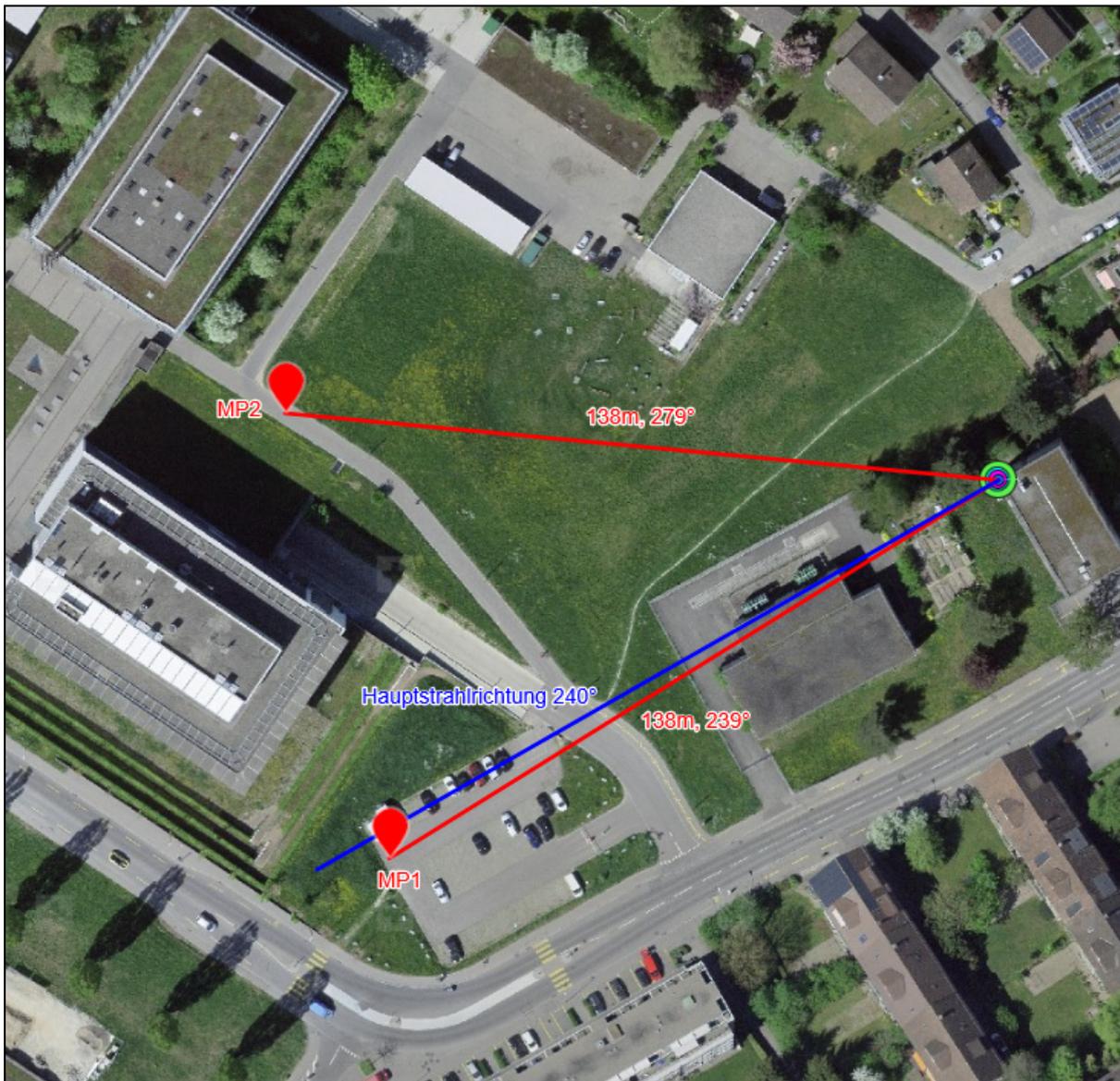


Photo 1: Satellitenbild des Standortes

Antenne Basisstation: 2'598'961, 1'197'602, 565.65 m ü.M. + 25.6 m (gemäss Betriebsdaten), bewilligte Sendeleistung = 200 Werp.

MP1: 239° SW, 138m Entfernung (gemessen zum Antennenmodul), 565.65 m ü.M. + 1.5m Höhe der Messantenne

MP2: 279° W, 138m Entfernung (gemessen zum Antennenmodul), 565.65 m ü.M. + 1.5m Höhe der Messantenne



Photo 2: Setup Messpunkt 1



Photo 3: Setup Messpunkt 2

### 3.2.2 Standort ZH654-2

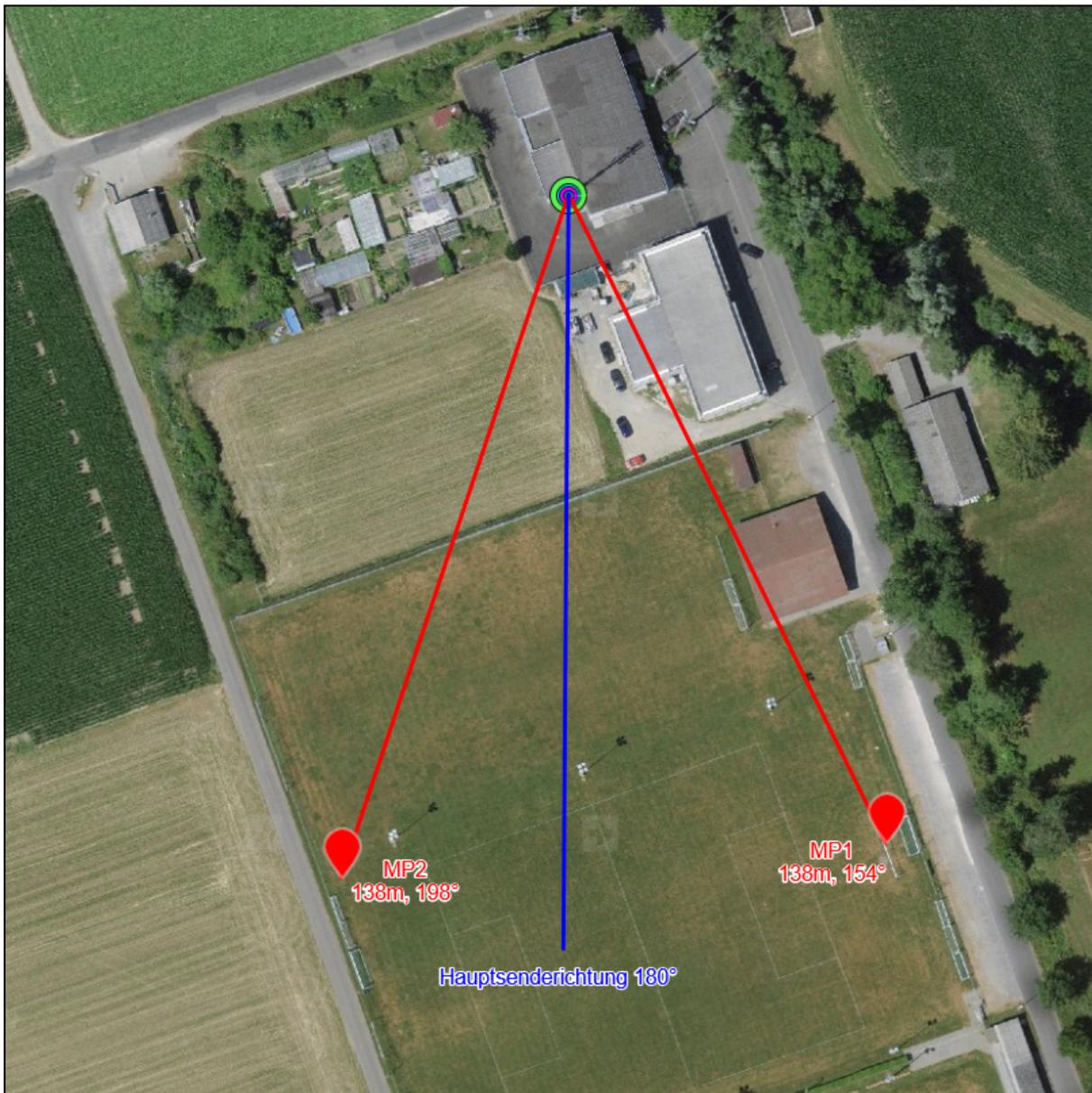


Photo 4: Satellitenbild des Standortes

Antenne Basisstation: 2'655'418, 1'234'634, 516 m ü.M. + 21.7 m (gemäss Betriebsdaten), bewilligte Sendeleistung = 200 Werp.

MP1: 138° SO, 138m Entfernung (gemessen zum Antennenmodul), 516 m ü.M. + 1.5m Höhe der Messantenne

MP2: 198° SW, 138m Entfernung (gemessen zum Antennenmodul), 516 m ü.M. + 1.5m Höhe der Messantenne



Photo 5: Setup Messpunkt 1



Photo 6: Messpunkt 2

### **3.3 Durchgeführte Messungen**

Zur Veranschaulichung des Verhaltens der adaptiven Antennen wird die Feldstärke an gewählten Messpunkten betrachtet. Es werden jeweils zwei Messpunkte ausgewählt die in gleichem Abstand zur Basisstation liegen und  $40^\circ$  Winkelunterschied haben. Die Messpunkte sind gut zugänglich und sollen möglichst wenig Reflexionen ausgesetzt sein.

Die Feldstärke wird mit einer Breitbandmessung (Messgerät SRM3006) sowie einer Spektrumsmessung (Messgerät Gauss TDEMI X6) aufgezeichnet. Zwei Endgeräte werden so in der Funkzelle betrieben, bewegt und positioniert, dass die Basisstation entweder keinen, einen oder zwei Datenströme aussendet. Die Endgeräte sind so konfiguriert, dass sie dauernd Daten herunterladen und dabei von der Basisstation mit einer möglichst grossen Datenrate versorgt werden. Die Messungen werden aus Gründen der praktischen Durchführung auf zwei Endgeräte und damit auf zwei Datenströme beschränkt.

### 3.4 Messungen KONI

#### 3.4.1 Messung der Feldstärke

Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte in der Übersicht. Folgende Werte sind daraus berechnet:

- Umrechnung des RMS-Messwertes von dB $\mu$ V/m auf V/m.
- Umrechnung des RMS-Messwertes in V/m (Messbandbreite von 32 MHz) auf die gesamte Kanal-Bandbreite von 100 MHz. Hier ist die Kanal-Bandbreite zur Berechnung eingesetzt und nicht die effektiv ausgestrahlte Signal-Bandbreite von 98.28 MHz (273 Ressource Blocks \* je 12 Subcarrier \* 30 kHz = 98.28 MHz)
- Umrechnung der Feldstärke (im Abstand 138m) auf die Sendeleistung ERP.
- Aufaddieren der ERP's an beiden Messpunkten.

Fall	Messfile	BB = 32MHz	Umrechnung MP1		
		RMS [dBuV/m]	RMS [V/m] BB=32MHz	RMS [V/m] BB=100MHz	ERP1 @138m
1) Kein Traffic-Beam: nur Signalisation, kein UE aktiv.	MP1_1E2 G-0002_00298_Screenshot	83.84	0.016	0.028	0.3
2) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP2, beide UE befinden sich beim MP2.	MP1_3A G-0002_00301_Screenshot	92.19	0.041	0.072	2.0
3) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1, beide UE befinden sich beim MP1.	MP1_3A6 G-0002_00305_Screenshot	102.88	0.139	0.246	23.5
4) Dual-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1 und ein Traffic-Beam auf MP2, dabei befindet sich das eine UE beim MP1 und das andere UE beim MP2.	MP1_4A2 G-0002_00306_Screenshot	100.14	0.102	0.180	12.5

Tabelle 1: Messwerte und Umrechnungen Messpunkt 1

Fall	Messfile:	BB = 32MHz	Umrechnung MP2			ERP2 @138m	ERP tot @138m
		RMS [dBuV/m]	RMS [V/m] BB=32MHz	RMS [V/m] BB=100MHz			
1) Kein Traffic-Beam: nur Signalisation, kein UE aktiv.	K-0101_00201_Screenshot	83.85	0.016	0.028	0.3	0.6	
2) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP2, beide UE befinden sich beim MP2.	K-0101_00202_Screenshot	101.09	0.113	0.200	15.5	17.5	
3) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1, beide UE befinden sich beim MP1.	K-0101_00206_Screenshot	91.96	0.040	0.070	1.9	25.4	
4) Dual-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1 und ein Traffic-Beam auf MP2, dabei befindet sich das eine UE beim MP1 und das andere UE beim MP2.	K-0101_00207_Screenshot	98.98	0.089	0.157	9.6	22.1	

Tabelle 2: Messwerte und Umrechnungen Messpunkt 2

Die Berechnungen wurden folgendermassen durchgeführt:

$$RMS \left[ \frac{V}{m} \right] = 10^{-6} \cdot 10^{\frac{RMS[dBuV/m]}{20}} \quad RMS_{100MHz} \left[ \frac{V}{m} \right] = \sqrt{\frac{P_{32MHz} \cdot 100MHz}{32 MHz} \cdot 377\Omega} \quad \text{mit } P_{32MHz} = \frac{RMS_{32MHz}^2}{377\Omega}$$

$$ERP = \frac{(138m \cdot RMS_{100MHz})^2}{49.2} \quad ERP_{tot} = ERP_{MP1} + ERP_{MP2}$$

## Beobachtungen

Es fällt auf, dass relativ tiefe Feldstärken gemessen werden. Dazu gibt es verschiedene Phänomene die diese Einzelmessungen beeinflussen können:

- Die Reflexionen am Gelände, den Gebäuden und den Fahrzeugen da die Messungen mit einer Isotropen Antenne durchgeführt wurden.
- Die Freifeldausbreitung der 3.5 GHz hat eine grössere Dämpfung als in der Berechnung angenommen.
- Es wurde wohl versucht möglichst eine konstante und kontinuierliche Aussendung zu erreichen indem konstante Datenstreams vorhanden waren und sich auch keine anderen Teilnehmer in der Zelle befanden.
- Auch wenn die absoluten Signalstärken recht tief sind, werden die Verhältnisse als korrekt betrachtet.

## Ergebnisse

- a) Ohne Traffic wird an beiden Messpunkten eine Exposition von 0.03 V/m gemessen, dies entspricht 0.3Werp.
- b) Im Single-Beam wird eine Exposition von 0.246 V/m resp. 0.200 V/m gemessen, dies entspricht ~20Werp.
- c) Ausserhalb des Single-Beam wird eine Exposition von 0.07 V/m gemessen, dies entspricht ~2Werp.
- d) Im Dual-Beam wird eine Exposition von 0.180 V/m resp. 0.157 V/m gemessen, dies entspricht ~10Werp.

## Folgerungen

- 1) Die gesamte Sendeleistung wird auf die beiden Beams aufgeteilt. Wird nur ein Beam gesendet, ergibt dies aufgrund der gemessenen Feldstärke im Abstand von 138m ungefähr 20Werp. Werden zwei Beams gesendet, ergeben sich aufgrund der gemessenen Feldstärke im Abstand von 138m jeweils ungefähr 10Werp.
- 2) Ausserhalb des Beams wird das Signal um ~10dB reduziert gemessen. Die Differenz zwischen der gemessenen Feldstärke «im Beam» und der Feldstärke «nicht im Beam» ist am Messpunkt 1 10.69dB (102.88 – 92.19 dBµV/m) und am Messpunkt 2 9.13dB (101.09 – 91.96 dBµV/m);
- 3) Die Exposition durch die Signalisation liegt ~20dB unterhalb der Exposition im Single-Beam. Die Differenz zwischen der gemessenen Feldstärke im Beam und der Feldstärke nur mit der Signalisation ist am Messpunkt 1 19.04dB (102.88 – 83.84 dBµV/m) und am Messpunkt 2 17.24dB (101.09 – 83.85 dBµV/m);

### 3.4.2 Messung des Spektrums

#### Fall 1 :

Die Endgeräte sind im Idle-Mode aktiv und daher sendet die Basisstation mit dem Broadcast-Beam die Signalisationssignale aus (Broadcast-Information mit Access- und Handover-Angaben), jedoch keine Traffic-Daten.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1. Die SSB-Signale überragen das restliche Spektrum des Funkbandes. Über die ganze Bandbreite werden Referenzsignale (z.B. Sounding-Reference) ausgesendet, die das ganze Frequenzband vom Grundrauschen abheben.

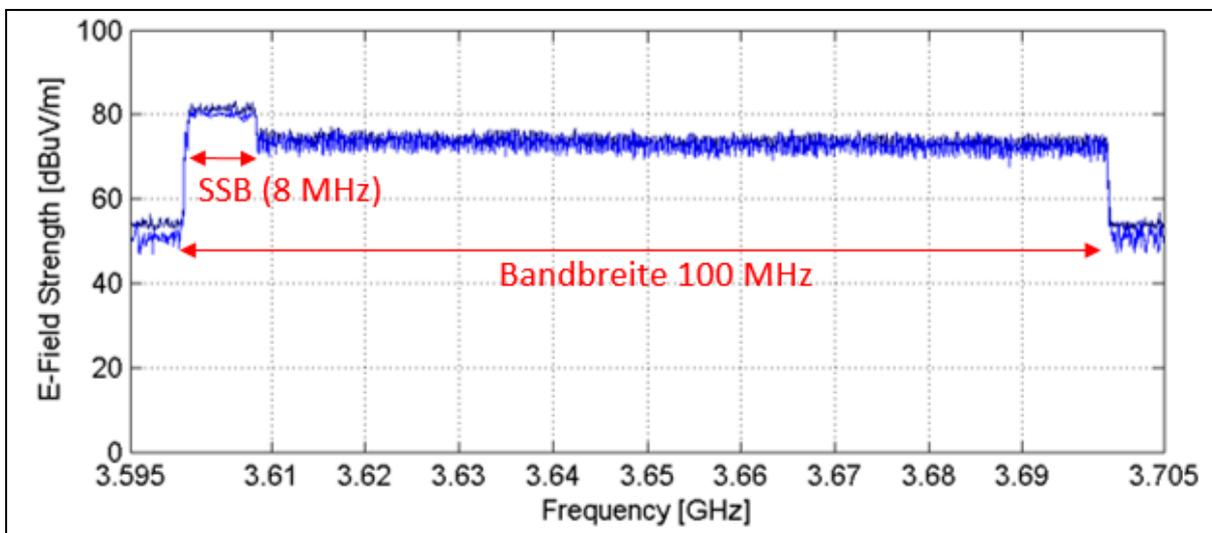


Abbildung 10: KONI MP1, das Spektrum der Signalisation

#### Fall 2 :

Beide Endgeräte befinden sich beim MP2 und führen einen Datendownload durch. Damit sendet die Basisstation einen Traffic-Beam in Richtung des MP2.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1, wo die Nebenaussendung des Traffic-Beams auf den MP2 sichtbar ist. Die Signalstärke der Daten liegt knapp über derjenigen der Signalisation, womit die SSB-Signale nicht sichtbar sind.

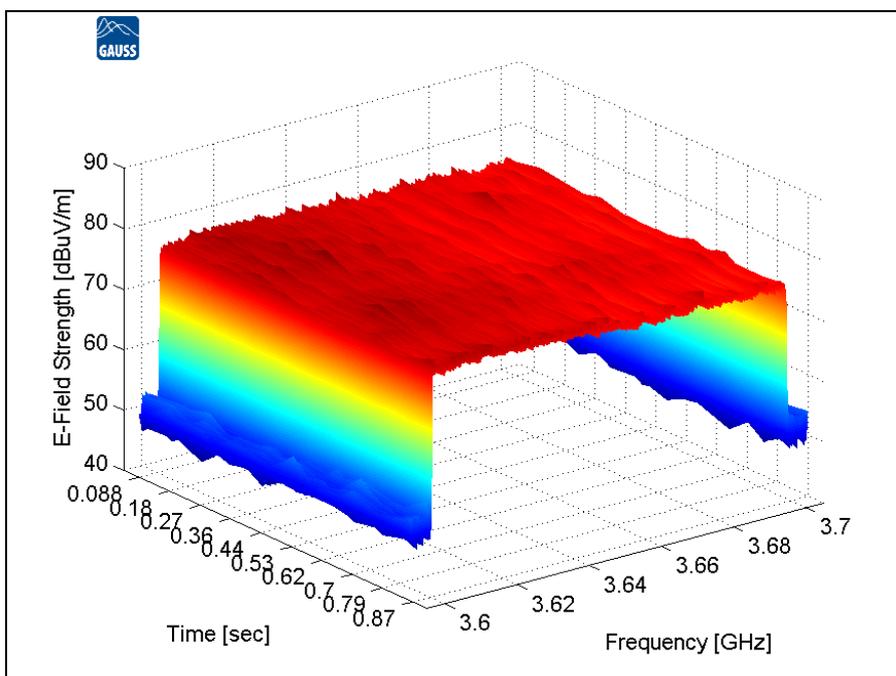


Abbildung 11: KONI MP1, das Spektrum ausserhalb des Traffic-Beams

**Fall 3:**

Beide Endgeräte befinden sich beim MP1 und führen einen Datendownload durch. Damit sendet die Basisstation einen Traffic-Beam in Richtung des MP1.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1, wo der Traffic-Beam mit maximaler Amplitude sichtbar ist. Die SSB-Signale sind nicht sichtbar.

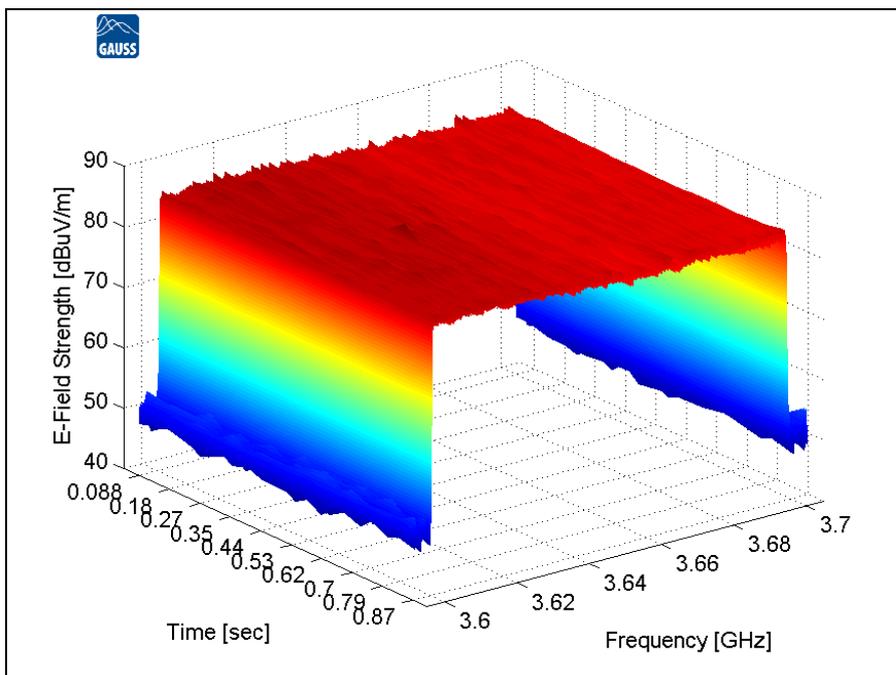


Abbildung 12: KONI MP1, das Spektrum innerhalb des Single-Traffic-Beam

**Fall 4:**

Das erste Endgerät befindet sich beim MP1 und das Zweite befindet sich beim MP2. Beide Endgeräte führen einen Datendownload durch. Damit sendet die Basisstation je einen Traffic-Beam in Richtung des MP1 und des MP2.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1, wo der Traffic-Beam natürlich gut sichtbar ist. Die SSB-Signale sind nicht sichtbar.

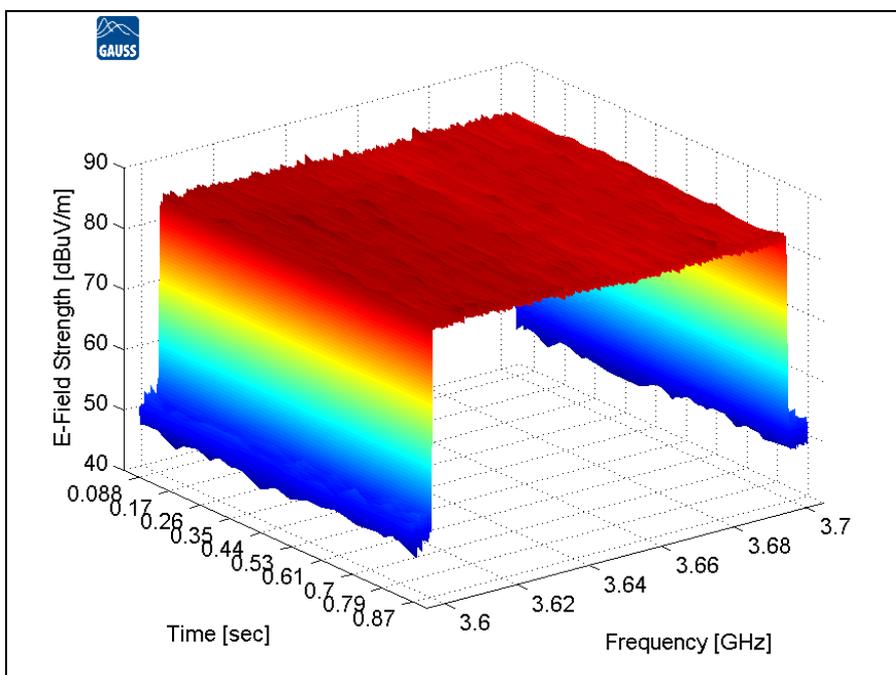


Abbildung 13: KONI MP1, das Spektrum innerhalb eines der beiden Traffic-Beams

### 3.4.3 Messung der Power-Lock-Funktion

Die Power-Lock-Funktion gewährleistet, dass ein Mittelwert (z.B. der Anlagegrenzwert) eingehalten wird. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Feldstärkemessung über die Zeit.

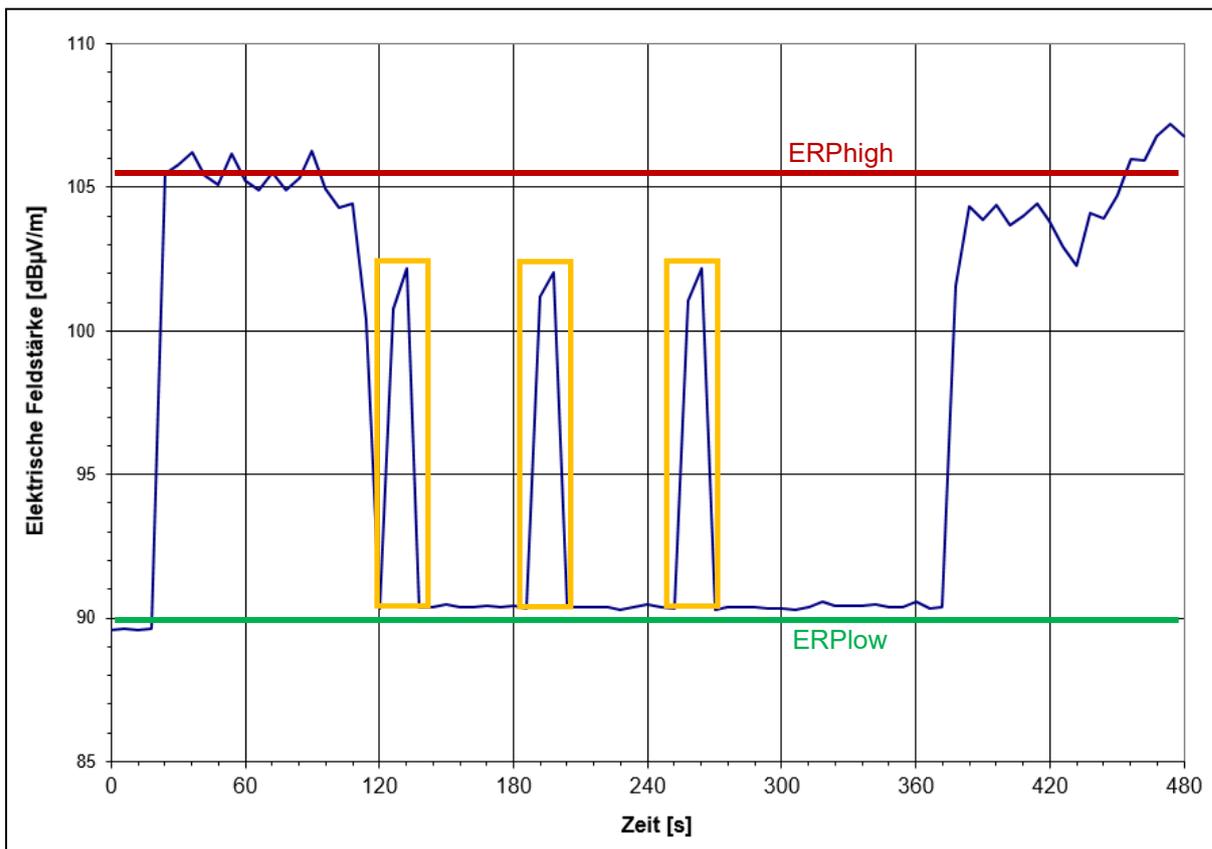


Abbildung 14: KONI MP1, Gemessene Power-Lock-Funktion

Zu Beginn des Zyklus (bei 18 s) sendet die Basisstation mit der bewilligten Sendeleistung (200Werp) und es ergibt sich die gemessene Exposition ERPhigh von ca. 105dBµV/m (~0.2V/m mit BB=32MHz). Nach ca. 90 Sekunden reduziert die Basisstation die Sendeleistung auf 20% (vorgängig eingestellter Wert, 14dB) und es wird eine Exposition ERPlow von ca. 90dBµV/m gemessen. Nach Ablauf der Mittelungsdauer von 360 Sekunden sendet die Basisstation wieder mit der bewilligten Sendeleistung.

Bei der Inbetriebnahme der Power-Lock-Funktion haben sich Anlaufschwierigkeiten ergeben, da dies der erste Betriebsversuch auf einer Antenne in der Schweiz war. Die gelb markierten Peaks während der Zeitspanne der reduzierten Sendeleistung sind nicht erklärbar und wären bei der korrekten Funktion nicht zulässig. Weitergehende Messungen sind daher für eine genauere Abklärung notwendig.

Es fällt auch hier auf, dass relativ tiefe Feldstärken gemessen werden. Es gelten die gleichen Überlegungen zur Feldstärkemessung, wie sie unter Kapitel 3.4.1 aufgeführt sind.

Mit diesen Messergebnissen lässt sich die Power-Lock-Funktion zwar noch nicht abschliessend beurteilen, doch bestätigen sie das Funktionieren der Power-Lock-Funktion.

### 3.5 Messungen ZH654-2

#### 3.5.1 Messung der Feldstärke

Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte in der Übersicht. Die Berechnung der Umrechnungswerte erfolgt gemäss Kapitel 3.4.1.

Fall	BB = 32MHz		Umrechnung MP1		
	Messfile	RMS [dBuV/m]	RMS [V/m] BB=32MHz	RMS [V/m] BB=100MHz	ERP1 @138m
1) Kein Traffic-Beam: nur Signalisation, kein UE aktiv.	MP1 1E G- 0002_00309_Screenshot	89.39	0.029	0.052	1.1
2) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1, beide UE befinden sich beim MP1.	MP1 2E1 G- 0002_00311_Screenshot	111.88	0.393	0.694	186.5
3) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP2, beide UE befinden sich beim MP2.	MP1 3E G- 0002_00313_Screenshot	95.07	0.057	0.100	3.9

Tabelle 3: Messwerte und Umrechnungen Messpunkt 1

Fall	BB = 32MHz		Umrechnung MP2		ERP2 @138m	ERP tot @138m
	Messfile:	RMS [dBuV/m]	RMS [V/m] BB=32MHz	RMS [V/m] BB=100MHz		
1) Kein Traffic-Beam: nur Signalisation, kein UE aktiv.	MP2 1E G- 0002_00321_Screenshot	88.98	0.028	0.050	1.0	2.0
2) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP1, beide UE befinden sich beim MP1.	MP2 2E1 G- 0002_00324_Screenshot	91.03	0.036	0.063	1.5	188.0
3) Single-Beam: ein Traffic-Beam auf MP2, beide UE befinden sich beim MP2.	MP2 3E G- 0002_00326_Screenshot	109.93	0.314	0.555	119.0	122.9

Tabelle 4: Messwerte und Umrechnungen Messpunkt 2

Bei der Messung mit zwei Traffic-Beams zu je einem Endgerät ergaben sich Konnektivitätsprobleme die keinen korrekten Betriebszustand ermöglichten. Für diese Anlage ist die Messung der Leistungsaufteilung noch ausstehend.

#### Beobachtungen

Es fällt auf, dass bei diesen Messungen die Feldstärken eher kleiner gemessen werden als die Berechnung ergibt. Dazu gibt es verschiedene Phänomene, die diese Einzelmessungen beeinflussen können:

- Die Reflexionen am Gelände beeinflussen die gemessene Feldstärke da die Messungen mit einer Isotropen Antenne durchgeführt wurden.
- Die Freifeldausbreitung der 3.5 GHz hat eine grössere Dämpfung als in der Berechnung angenommen.
- Es wurde wohl versucht möglichst eine konstante und kontinuierliche Aussendung zu erreichen indem konstante Datenstreams vorhanden waren und sich auch keine anderen Teilnehmer in der Zelle befanden.

## Ergebnisse

- a) Ohne Traffic wird an beiden Messpunkten eine Exposition von 0.05 V/m gemessen, dies entspricht 1.0 Werp.
- b) Im Single-Beam wird eine Exposition von 0.69 V/m resp. 0.56 V/m gemessen, dies entspricht 186.5 Werp resp. 119 Werp.
- c) Ausserhalb des Single-Beam wird eine Exposition von 0.10 V/m resp. 0.06 V/m gemessen, dies entspricht 3.9 Werp resp. 1.5 Werp.

## Folgerungen

- 1) Wird nur ein Beam gesendet, ergibt dies aufgrund der gemessenen Feldstärke im Abstand von 138m 186.5 Werp resp. 119 Werp.
- 2) Ausserhalb des Beams wird das Signal um ~17dB reduziert gemessen. Die Differenz zwischen der gemessenen Feldstärke «im Beam» und der Feldstärke «nicht im Beam» ist am Messpunkt 1 16.81dB (111.88 – 95.07 dB $\mu$ V/m) und am Messpunkt 2 18.90dB (109.93 – 91.03 dB $\mu$ V/m);
- 3) Die Exposition durch die Signalisation liegt ~20dB unterhalb der Exposition im Single-Beam. Die Differenz zwischen der gemessenen Feldstärke im Beam und der Feldstärke nur mit der Signalisation beträgt am Messpunkt 1 22.49dB (111.88 – 89.39 dB $\mu$ V/m) und am Messpunkt 2 20.95dB (109.93 – 88.98 dB $\mu$ V/m);

### 3.5.2 Messung des Spektrums

Am Messpunkt 1 wird das Spektrum aufgezeichnet.

#### Fall 1 :

Die Endgeräte sind nicht aktiv (im Flugmodus) und daher sendet die Basisstation mit dem Broadcast-Beam die Signalisationssignale aus (Broadcast-Information mit Access- und Handover-Angaben), jedoch keine Traffic-Daten.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1. Die SSB-Signale überragen das restliche Spektrum des Funkbandes. Es werden keine weiteren Referenzsignale (z.B. Sounding-Reference) ausgesendet und damit ist im restlichen Frequenzband nur das Grundrauschen sichtbar.

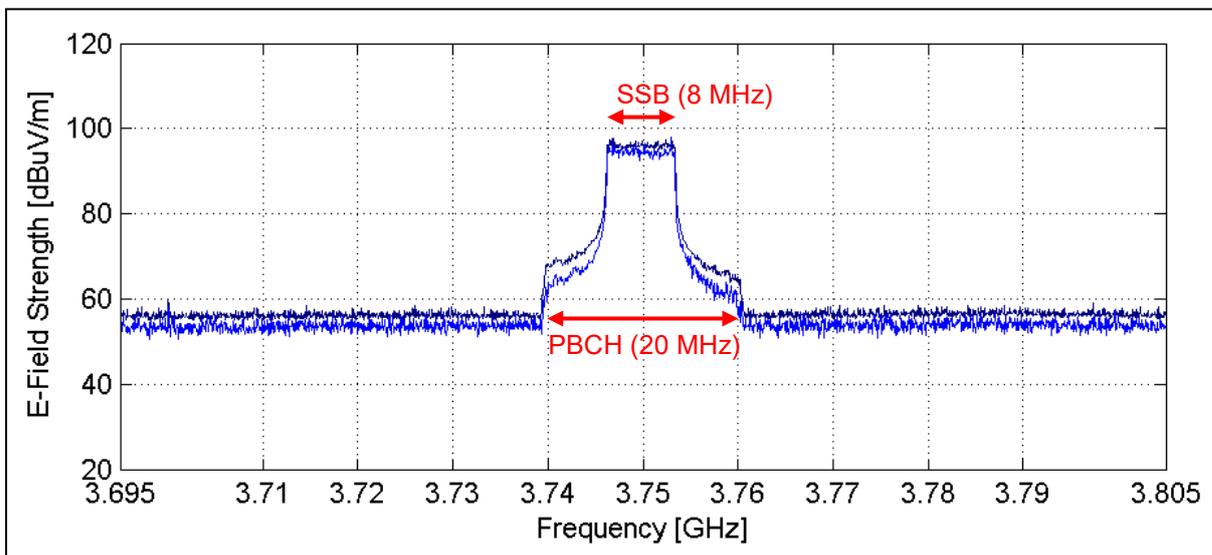


Abbildung 15: ZH654-2 MP1, das Spektrum der Signalisation (ohne aktive Endgeräte in der Zelle)

Sobald ein Endgerät bei der Zelle eingeloggt ist, sendet die Basisstation Referenz-Symbole die als «erhöhtes Rauschen» im ganzen Kanal sichtbar werden:

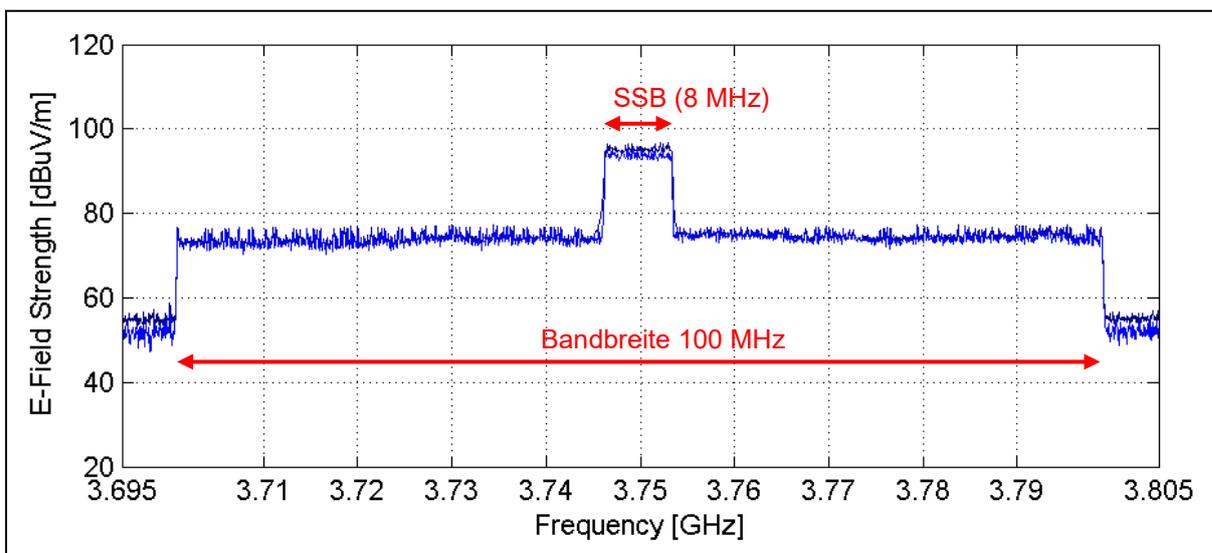


Abbildung 16: ZH654-2 MP1, das Spektrum der Signalisation (aktive Endgeräte in der Zelle)

**Fall 2 :**

Das Endgerät befindet sich beim MP1 und führt einen Datendownload durch. Damit sendet die Basisstation einen Traffic-Beam in Richtung des MP1.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1, wo der Traffic-Beam mit maximaler Amplitude sichtbar ist. Die SSB-Signale sind nicht sichtbar.

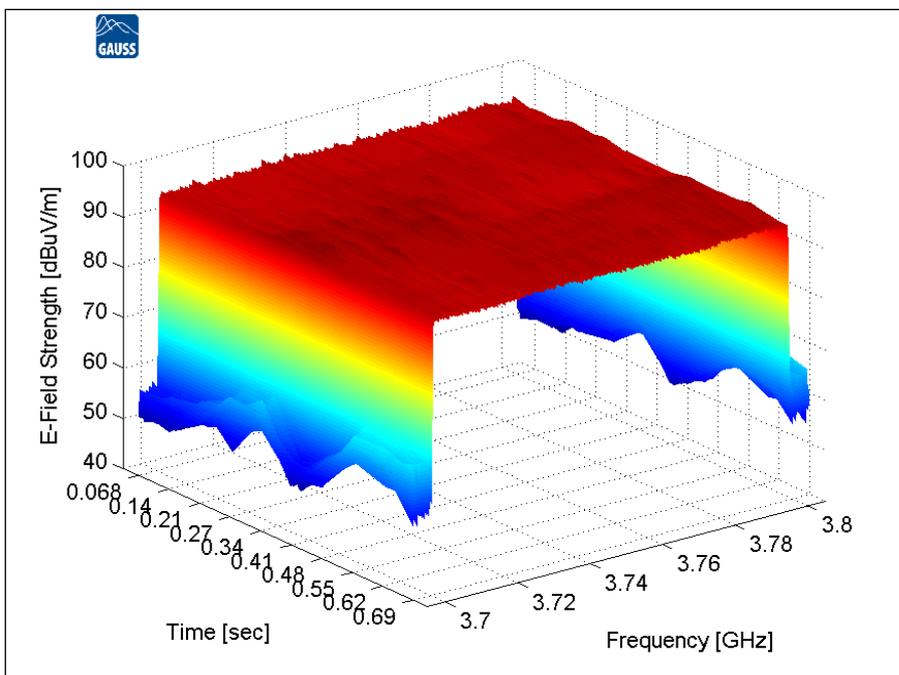


Abbildung 17: Innerhalb Traffic-Beam, ZH654-2 MP1

**Fall 3 :**

Das Endgerät befindet sich beim MP2 und führt einen Datendownload durch. Damit sendet die Basisstation einen Traffic-Beam in Richtung des MP2.

Die folgende Abbildung zeigt das Spektrum am MP1, wo die Nebenaussendung des Traffic-Beams auf den MP2 sichtbar ist. Die Signalstärke der Daten liegt unter derjenigen der Signalisation, womit die SSB-Signale sichtbar sind.

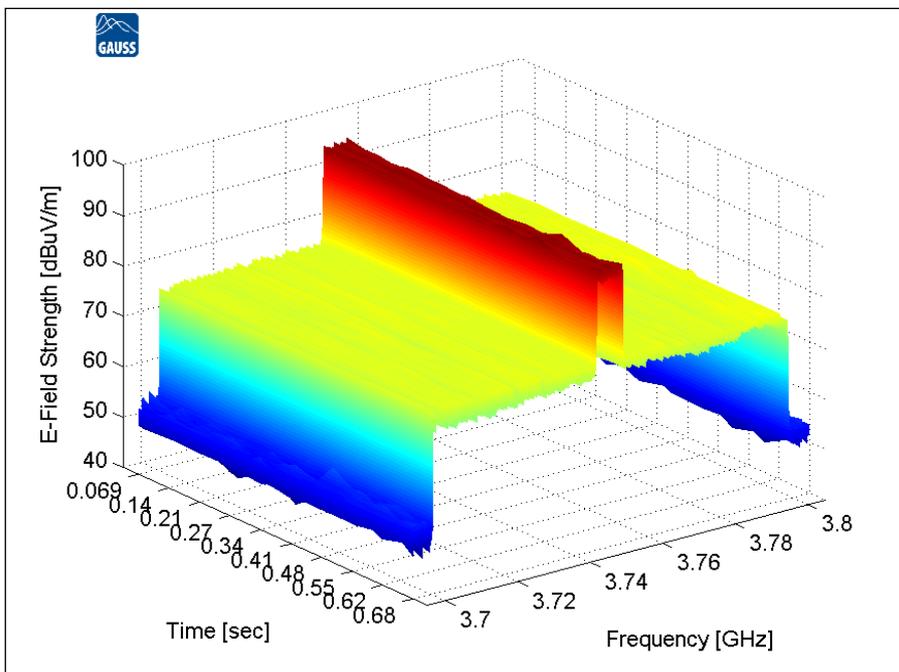


Abbildung 18: ZH654-2 MP1, das Spektrum ausserhalb des Traffic-Beams

### 3.5.3 Messung der Power-Lock-Funktion

Anlässlich dieser Messung wird die Power-Lock-Funktion zum ersten Mal in der Schweiz eingeschaltet. Bei der Messung mit zwei Traffic-Beams zu je einem Endgerät ergeben sich jedoch Konnektivitätsprobleme die keinen korrekten Betriebszustand ermöglichten. Für diese Anlage ist die Messung der Power-Lock-Funktion noch ausstehend.

## 4 Simulation der Exposition durch adaptive Antennen

Für beide Standorte werden Simulationen der Exposition durchgeführt, um damit einen Plausibilitätstest bezüglich der Antennen- und Ausbreitungs-Theorie zu erhalten. Beide Messorte werden inklusive Antennen der Basisstation im Simulationstool MithraREM nachgebildet.

Ziel der Simulation soll es sein, die Messergebnisse der beiden vor Ort Messungen zu Überprüfen und in der Folge weitere Szenarien zu erstellen und damit die Verteilung des elektromagnetischen Feldes vor einer adaptiven Antenne aufzuzeigen.

### 4.1 Simulation KONI

Ausgangslage:

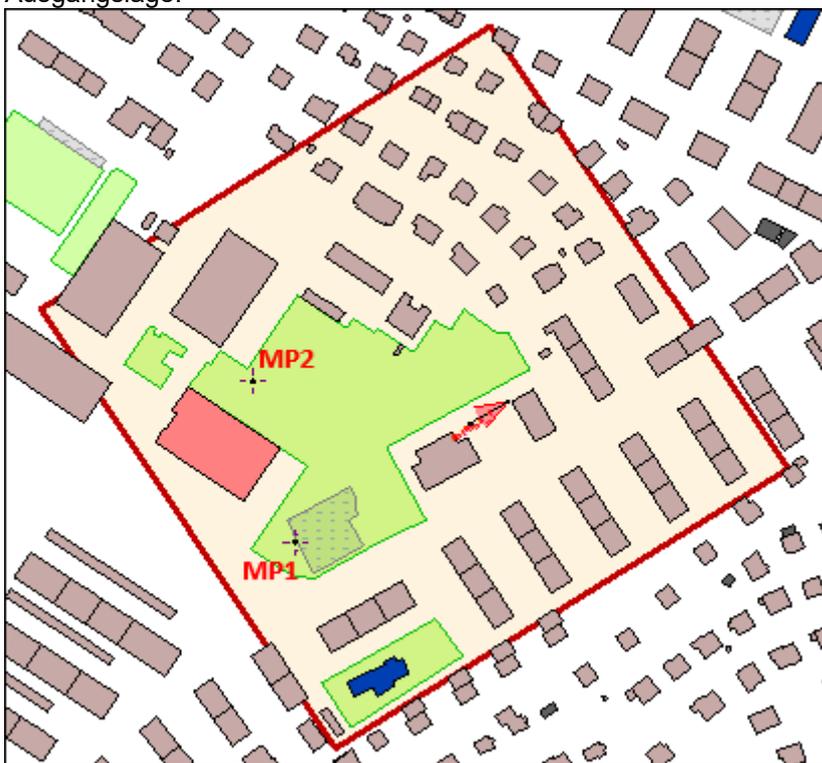


Abbildung 19: Ausgangslage KONI

Parameter der Simulation:

Sendeleistung:	- 1 Beam: 200 Werp - 2 Beams: je 100 Werp, Total 200 Werp - 13 Beams: je 15.4 Werp, Total 200 Werp
Frequenzband:	3599. 98 MHz bis 3699. 98 MHz
Antennenpanel Azimut:	240° mechanisch
Antennenpanel Elevation:	0° mechanisch
Messhöhe:	1.5m über Boden
Höhenmodell:	Open Streetview
Antennendiagramme:	- in Richtung MP1: Das Maximum der beiden nächstgelegenen Beams der Antenne AIR6488.

- in Richtung MP2: Das Maximum der beiden nächstgelegenen Beams der Antenne AIR6488.
- in Richtung der 13 Punkte: Diagramme der Antenne AIR6488 mit den jeweils besten Ausrichtungen zu den Punkten.
- Broadcast-Beam der Antenne AIR6488 mit 3° Tilt.
- Sektorantenne 80010715 mit der höchsten Frequenz und 3° Tilt.

#### 4.1.1 Aussendung mit 1 Beam in Richtung Messpunkt 1

Die folgende Abbildung zeigt die Aussendung mit einem Beam in Richtung MP1:

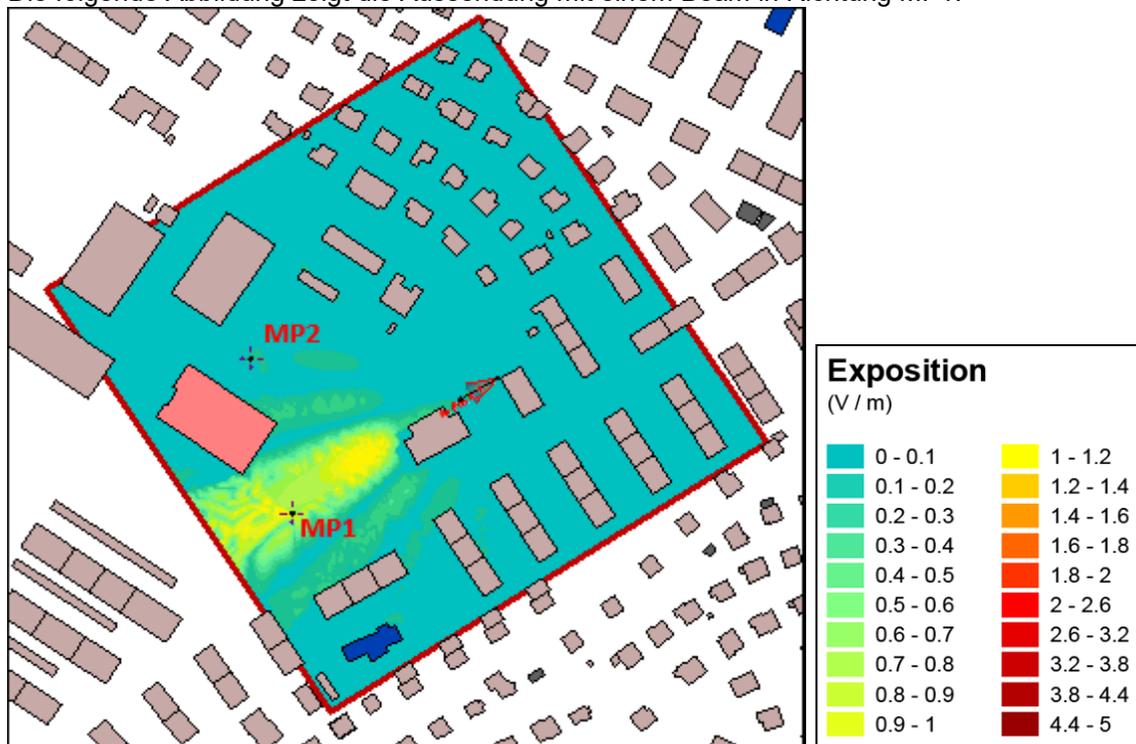


Abbildung 20: Feldverteilung AAS mit 1 Beam auf den Messpunkt 1

Resultierende Feldstärke	V/m	dBµV/m
MP1	0.63	115.99
MP2	0.11	100.83

Die Feldstärke innerhalb des Beams beim MP1 ist etwa 6-mal grösser als diejenige ausserhalb des Beams beim MP2.

Die folgende Vergrößerung um den MP1 verdeutlicht eine ziemlich inhomogene Feldverteilung. Zur Veranschaulichung ist der blaue Pfeil eingezeichnet, dessen Spitze sich 1.8m neben dem MP1 befindet. Direkt am MP1 beträgt die Feldstärke 0.63 V/m, wogegen die Feldstärke bei der blauen Pfeilspitze in der Feldfarbe Gelb ist und damit 1 - 1.2 V/m beträgt. Bei der Pfeilspitze ist die Feldstärke etwa 10-mal grösser als diejenige ausserhalb des Beams beim MP2.

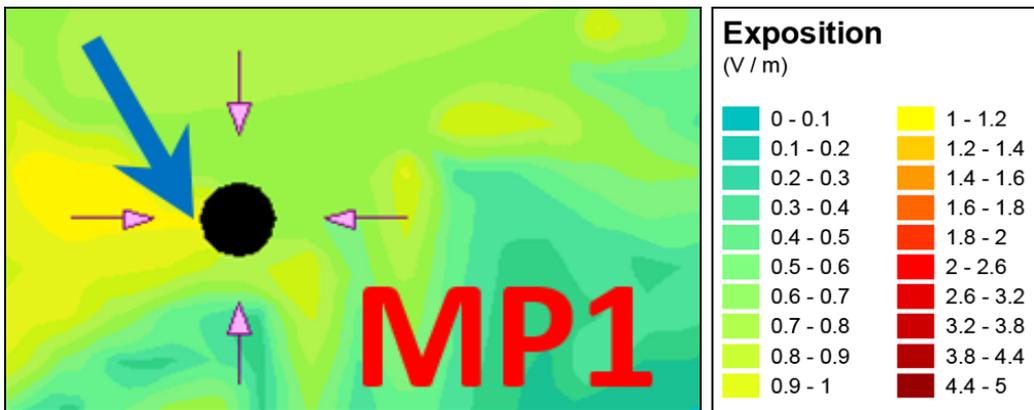


Abbildung 21: Zoom der Feldverteilung AAS mit 1 Beam auf den Messpunkt 1

Dieses Phänomen der inhomogenen Felder ist bereits aus früheren Feldmessungen des Mobilfunks bekannt. Reflektionen an Gebäuden und Geländeunebenheiten haben einen Einfluss auf die Feldverteilung. Dies ist ein Hinweis, dass dieses Phänomen wohl auch bei den Messungen vorhanden ist und somit gibt dies eine Erklärung zu den Abweichungen zwischen dem Messergebnis und dem berechneten Wert (mittels Sendeleistung und Distanz zur Antenne).

#### 4.1.2 Aussendung mit 1 Beam in Richtung Messpunkt 2

Die folgende Abbildung zeigt die Aussendung mit einem Beam in Richtung MP2:

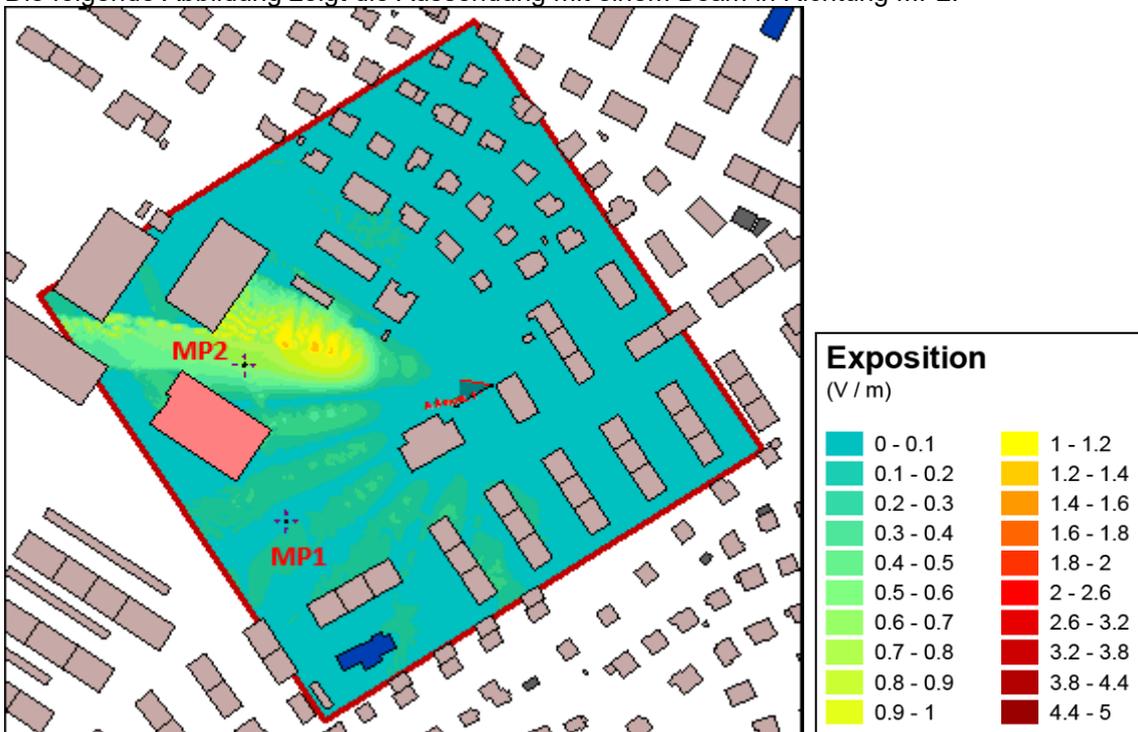


Abbildung 22: Feldverteilung AAS mit 1 Beam auf den Messpunkt 2

Resultierende Feldstärke	V/m	dBµV/m
MP1	0.03	89.54
MP2	0.57	115.11

Die Feldstärke innerhalb des Beams beim MP2 ist etwa 19-mal grösser als diejenige ausserhalb des Beams beim MP1.

Hier fällt auf, dass sich der MP1 bei diesem Antennendiagramm in Richtung einer Nullstelle befindet. Innerhalb des Beams beim MP2 ist die Feldstärke 19-mal grösser als diejenige ausserhalb des Beams beim MP1.

### 4.1.3 Aussendung mit 2 Beams in Richtung MP1 und MP2

Die folgende Abbildung zeigt die Aussendung mit einem Beam in Richtung MP1 sowie einem Beam in Richtung MP2:

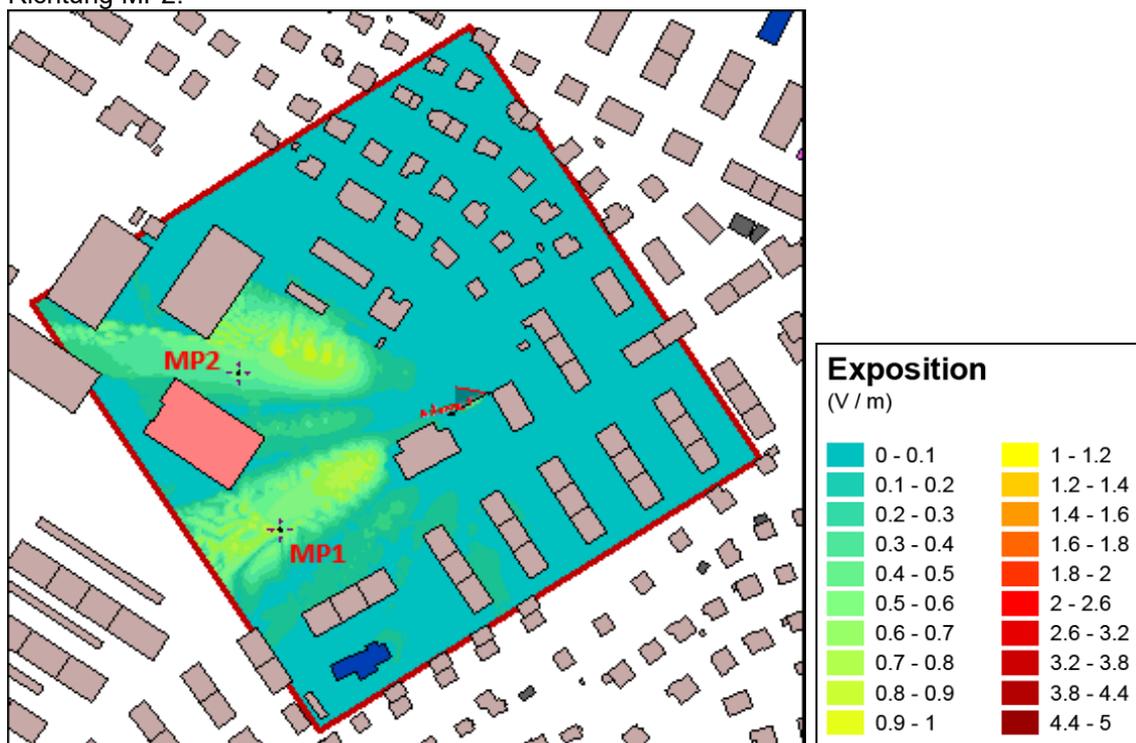


Abbildung 23: Feldverteilung AAS mit 2 Beams auf den Messpunkten 1 und 2

Resultierende Feldstärke	V/m	$\text{dB}\mu\text{V/m}$
MP1	0.45	113.06
MP2	0.41	112.25

Die Feldstärke innerhalb des Beams ist bei beiden Messpunkten in etwa gleich gross.

#### 4.1.4 Aussendung mit 13 Beams (ein Beam alle 10°)

Die folgende Abbildung zeigt die Aussendung mit 13 Beams mit jeweils 10° horizontaler Abweichung:

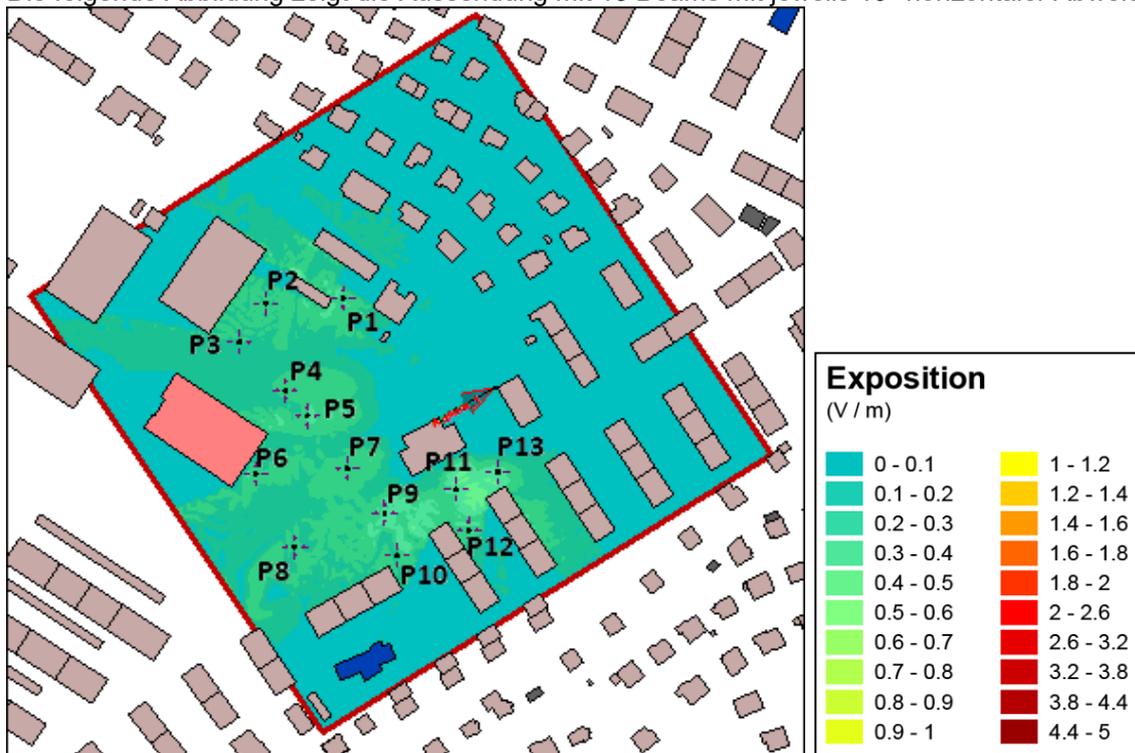


Abbildung 24: Feldverteilung AAS mit 13 Beams

In dieser Simulation ist die Sendeleistung gleichmässig (Werp / 13) auf die 13 Beams in Richtung der Endgeräte aufgeteilt. Die Punkte wurden in der jeweiligen Senderichtung in verschiedenen Distanzen gewählt und sie liegen meistens auf einem Weg oder einem Platz (gemäss Satellitenbild). Für die Simulation sind die Beams mit den am nächsten gelegenen Beam-Zentren zu den Punkten ausgewählt. Die Feldstärke an den jeweiligen Punkten ist in der Tabelle 5 aufgeführt.

Punkt	Koord.-X	Koord.-Y	Koord.-Z	Height [m]	Resultierende Feldstärke [V/m]
P1	2598879.3	1197650.6	563.90	1.5	0.20
P2	2598837.5	1197647.8	565.60	1.5	0.15
P3	2598823.3	1197626.9	565.00	1.5	0.17
P4	2598848.1	1197600.6	565.80	1.5	0.21
P5	2598859.9	1197586.7	566.07	1.5	0.29
P6	2598832.1	1197555.3	568.87	1.5	0.20
P7	2598881.6	1197558.1	566.51	1.5	0.28
P8	2598853.3	1197515.6	569.87	1.5	0.16
P9	2598901.7	1197533.9	569.02	1.5	0.37
P10	2598908.4	1197510.9	571.61	1.5	0.12
P11	2598940.4	1197546.8	568.72	1.5	0.34
P12	2598947.1	1197524.6	572.10	1.5	0.28
P13	2598962.8	1197556.0	567.54	1.5	0.36

Tabelle 5: Feldstärken AAS an den 13 Punkten

Die Feldstärken an den 13 Punkten liegen zwischen 0.12 – 0.37 V/m. Alle Werte sind demnach in der gleichen Grössenordnung und die Abweichungen begründen sich durch die jeweilige Distanz, die Abweichung vom Beam-Zentrum sowie den Reflektionen an den Gebäuden und dem Boden.

In der Abbildung 25 sind die Feldstärken an den 13 Punkten graphisch dargestellt.

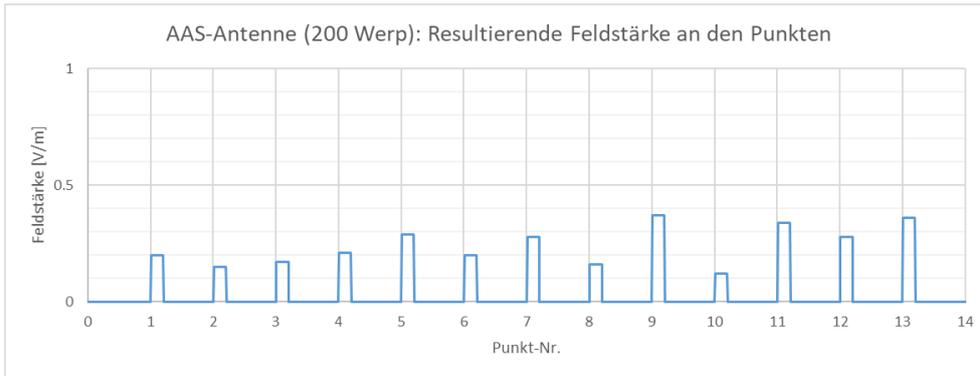


Abbildung 25: Feldverteilung AAS mit 13 Beams

Die jeweilige Feldstärke an den einzelnen Punkten setzt sich aus den Anteilen aller 13 Beams zusammen. Dabei hat jeweils derjenige Beam, welcher direkt auf den Punkt gerichtet ist, den grössten Anteil an der resultierenden Feldstärke. In der Abbildung 26 sind die jeweiligen Anteile aller Beams auf den Punkt 7 aufgezeigt.

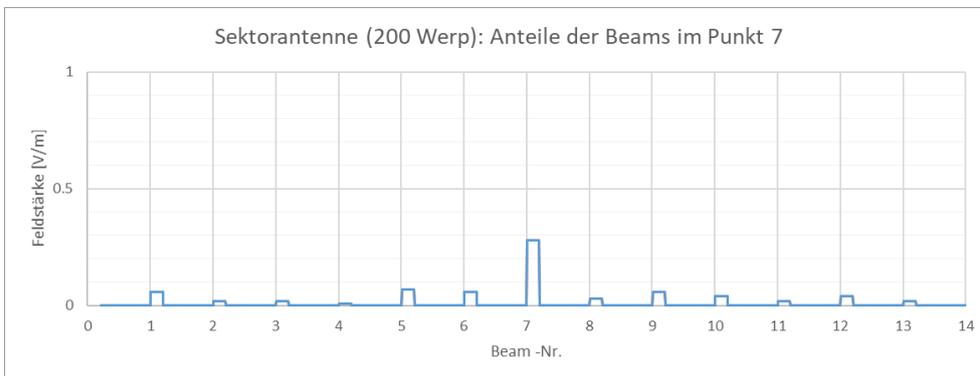


Abbildung 26: Feldstärke-Anteile der 13 Beams im Punkt 7

Dabei ist ersichtlich, dass die Feldstärke am Punkt 7 fast nur vom Beam 7 (in seiner Richtung) stammt und die anderen Beams nur wenig Einfluss haben. Als zweite Kontrolle sind in der Abbildung 27 die Anteile der Beams am Punkt 13, welcher die grösste Winkelabweichung von der Antennenachse hat, abgebildet.

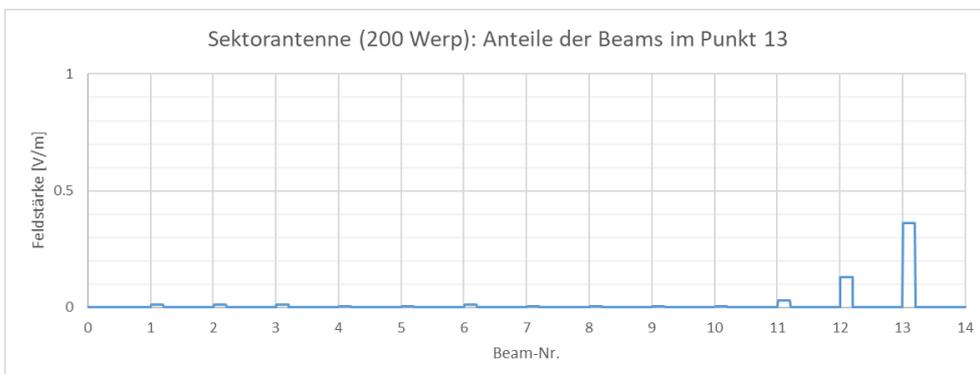


Abbildung 27: Feldstärke-Anteile der 13 Beams im Punkt 13

Der Hauptanteil der Feldstärke wird jeweils klar durch den spezifischen Beam in diese Richtung beigetragen, da dieser ja für die Datenübertragung in diese Richtung benötigt wird. Von den anderen Beams werden nur sehr kleine Anteile beigetragen.

Interessant ist die Untersuchung, in welchem Masse sich die einzelnen Beams an allen anderen Punkten auswirken, respektive wie stark gedämpft sie an diesen Punkten noch wahrnehmbar sind. Die Tabelle 6 zeigt die Dämpfung jedes Beams in Richtung aller anderen Punkte. Als Lesebeispiel ist grün eingezeichnet, dass der Beam B7 im Punkt P3 um -22.92 dB (dies entspricht einem Feldstärke-Faktor von 14.0) gedämpft ist.

auf	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	Mittlere Dämpfung des Beams
B1		-5.19	-26.02	-10.46	-13.98	-26.02	-10.46	-20.00	-26.02	-20.00	-10.46	-10.46	-26.02	-17.09
B2	-6.62		-2.69	-9.54	-13.98	-11.48	-17.50	-31.48	-13.98	-13.98	-31.48	-7.96	-23.52	-15.35
B3	-24.61	-5.52		-9.05	-10.63	-24.61	-18.59	-15.07	-18.59	-32.57	-32.57	-24.61	-24.61	-20.08
B4	-16.90	-26.44	-8.38		-2.92	-14.40	-26.44	-26.44	-12.46	-26.44	-26.44	-14.40	-34.40	-19.68
B5	-29.25	-29.25	-15.27	-8.42		-13.68	-12.35	-29.25	-19.71	-29.25	-29.25	-19.71	-37.21	-22.71
B6	-33.98	-20.00	-20.00	-16.48	-12.04		-10.46	-13.98	-20.00	-26.02	-33.98	-26.02	-26.02	-21.58
B7	-28.94	-28.94	-22.92	-36.90	-13.38	-14.96		-14.96	-10.88	-36.90	-22.92	-22.92	-36.90	-24.30
B8	-24.08	-32.04	-18.06	-24.08	-18.06	-12.04	-14.54		-3.25	-14.54	-32.04	-14.54	-32.04	-19.94
B9	-31.36	-31.36	-31.36	-21.82	-39.32	-25.34	-15.80	-25.34		-17.38	-21.82	-17.38	-39.32	-26.47
B10	-21.58	-21.58	-21.58	-15.56	-12.04	-21.58	-9.54	-12.04	-1.58		1.34	-9.54	-29.54	-14.57
B11	-38.59	-30.63	-38.59	-30.63	-38.59	-30.63	-24.61	-38.59	-30.63	-21.09		-21.09	-21.09	-30.40
B12	-19.40	-28.94	-36.90	-28.94	-19.40	-36.90	-16.90	-36.90	-19.40	-28.94	-0.32		-6.66	-23.30
B13	-39.08	-31.13	-39.08	-31.13	-39.08	-31.13	-25.11	-39.08	-39.08	-25.11	-25.11	-21.58		-32.14
														-22.12
Dämpfung max: -39.32 Dämpfung min: 1.34														Mittlere Dämpfung aller Beams

Tabelle 6: Dämpfung der einzelnen Beams in Richtung der anderen Punkte

In der Tabelle ist also ersichtlich, wie stark die Beams an den «anderen Punkten» gedämpft werden. Die Ausnahme bildet der Beam B10 der am Punkt 11 stärker vorhanden ist als am Punkt P10, auf welchen er eigentlich gerichtet ist. Die Simulation berechnet einen um 1.34 dB (Faktor 1.17) stärkere Feldstärke des Beams B10 am Punkt P11. Der Grund für diese grössere Signalstärke im P11 liegt an der Anordnung der beiden Punkte zueinander sowie den benachbarten Gebäuden welche Reflektionen erzeugen und damit die Feldstärke am Punkt P11 beeinflussen. In der Realität würde möglicherweise die Basisstation den Punkt P11 mit dem Beam B10 ansteuern.

Eine qualitative Aussage, wie stark ein Beam an den «anderen Punkten» gedämpft wird, kann mit dem Mittelwert der Dämpfungen aller Punkte zu jedem Beam gemacht werden. Diese sind als «Mittlere Dämpfung des Beams» in der Tabelle aufgeführt. Wird die Mittelung über alle Beams und alle Punkte gemacht, so ergibt sich eine mittlere Dämpfung von -22.12 dB (Faktor 12.8). Das Nutzsignal, welches ein Endgerät erreicht, wird also an allen anderen Punkten mit einer 12.8-mal kleineren Feldstärke empfangen.

#### 4.1.5 Aussendung mit herkömmlicher Sektorantenne

Die folgende Abbildung zeigt als Vergleich die Aussendung mit einer herkömmlichen Sektorantenne:

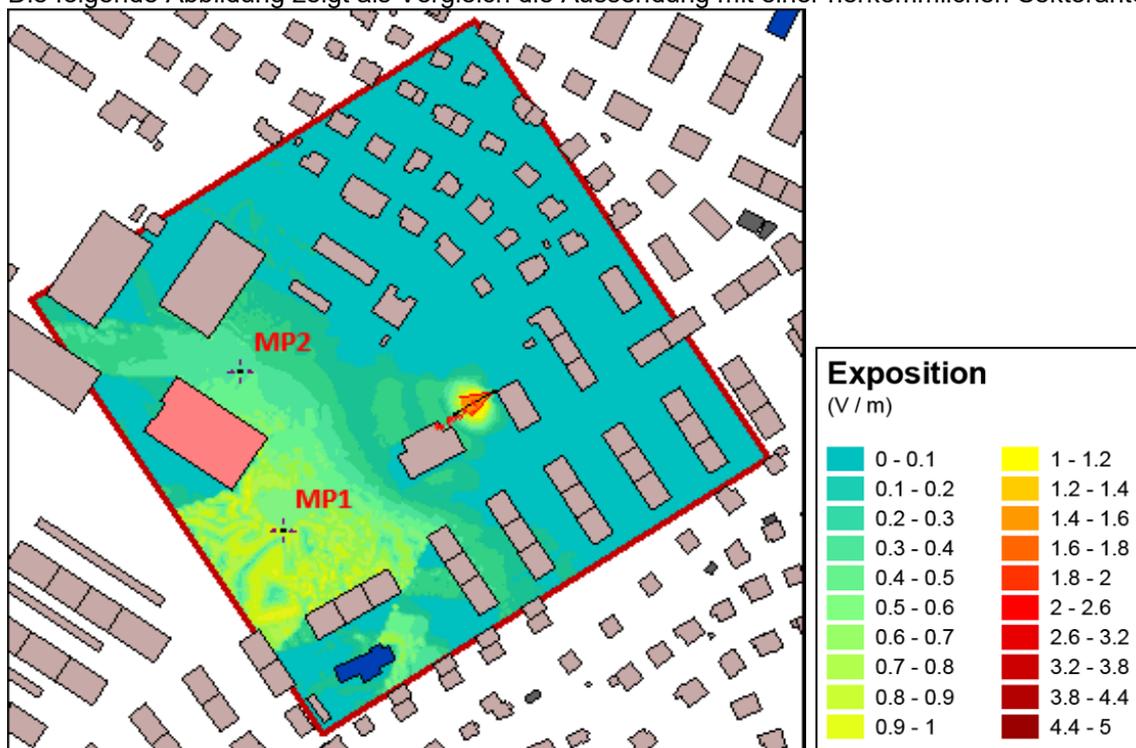


Abbildung 28: Feldverteilung herkömmliche Sektorantenne

Resultierende Feldstärke	V/m	dBµV/m
MP1	0.57	115.11
MP2	0.40	112.04

An diesem Bild wird deutlich klar, dass der grösste Teil der Sendeleistung in der Antennenachse abgestrahlt wird, unabhängig von der Position der Endgeräte, für welche die Funkübertragung bestimmt ist.

Die Feldstärke im MP1 ist 1.5-mal grösser als diejenige im MP2 und dies unabhängig davon, ob die Nutzdaten für den MP1 oder den MP2 bestimmt sind. Zum Vergleich sei hier der Verweis zu den adaptiven Antennen (Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) gemacht, wo das Feldstärkeverhältnis «im Beam / neben dem Beam» den Faktor 10 oder 19 beträgt.

Die folgende Abbildung mit Feldverteilung um die 13 Punkte ist identisch mit der Abbildung 28:

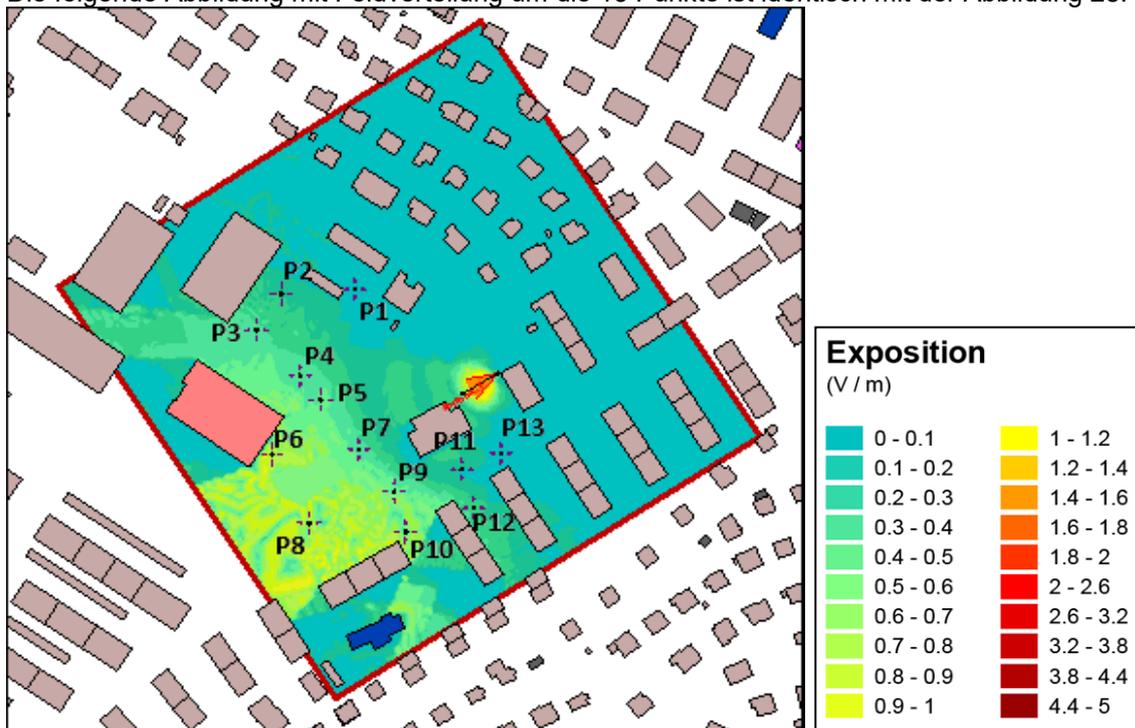


Abbildung 29: Feldverteilung herkömmliche Sektorantenne

Diese zeigt auf, dass bei einer herkömmlichen Sektorantenne die Feldverteilung unabhängig der Anzahl Endgeräte ist. Die Sendeleistung wird, gemäss dem festen Antennendiagramm, immer gleich ausgesendet. Die Abbildung 30 stellt die Feldstärken an den 13 Punkten dar.

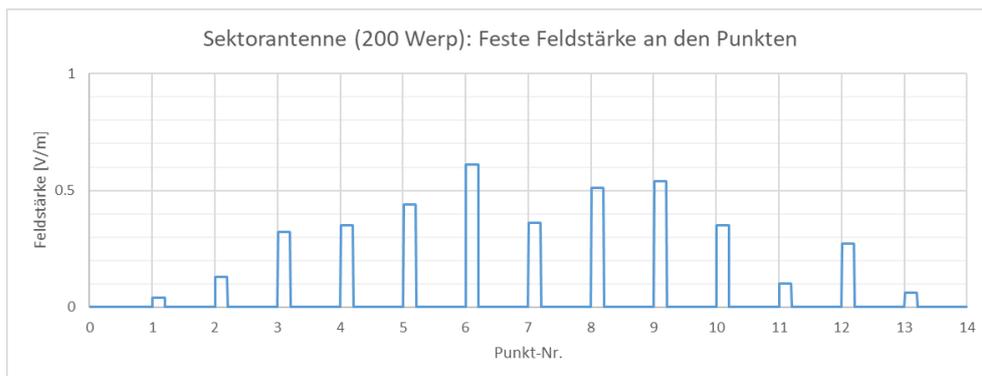


Abbildung 30: Feldverteilung an den 13 Punkten vor der Sektorantenne

Die Feldstärkewerte an den jeweiligen Punkten sind in der Tabelle 7 aufgeführt:

Punkt	Resultierende Feldstärke [V/m]		Verhältnis Herkömmlich / Adaptiv
	Herkömmliche Sektorantenne	Adaptive Antenne	
P1	0.04	0.20	0.20
P2	0.13	0.15	0.87
P3	0.32	0.17	1.88
P4	0.35	0.21	1.67
P5	0.44	0.29	1.52
P6	0.61	0.20	3.05
P7	0.36	0.28	1.29
P8	0.51	0.16	3.19
P9	0.54	0.37	1.46
P10	0.35	0.12	2.92
P11	0.10	0.34	0.29
P12	0.27	0.28	0.96
P13	0.06	0.36	0.17

Tabelle 7: Feldstärken an den 13 Punkten

Die Feldstärken an den 13 Punkten sind bei der herkömmlichen Sektorantenne zwischen 0.04 – 0.61 V/m. Zum Vergleich sind in der mittleren Spalte die Feldstärken an den 13 Punkten vor der adaptiven Antenne (gemäss Tabelle 5: 0.12 – 0.37 V/m) aufgeführt. Die letzte Spalte gibt das Verhältnis der Feldstärken vor der herkömmlichen Sektorantenne und der adaptiven Antenne an. Dieses Verhältnis gibt Auskunft zur Signalstärke des Nutzsignals respektive zum Vorhandensein von «fehl gerichteten» Signalen. Dieser Vergleich zeigt deutlich, dass

- vor der adaptiven Antenne die Feldstärken an den Punkten ausgeglichener sind;
- seitlich zur adaptiven Antenne die minimalen Nutzsignal-Feldstärken bis zu einem Faktor 6 grösser sind (P1, P2, P11-P13), womit die Funkverbindung eine bessere Qualität hat und die Daten effizienter übertragen werden können;
- direkt vor der adaptiven Antenne die maximalen Feldstärken kleiner sind, da in Richtung der Antennenachse (P3-P10) nur die dorthin vorgesehenen Nutzdaten gesendet werden, womit sich die Exposition vor der Antenne um bis über einem Faktor 3 verkleinert.

#### 4.1.6 Aussendung der Signalisation

Bei den adaptiven Antennen wird die Signalisation durch sogenannte Broadcast-Beams ausgesendet (vgl. Kapitel 2.1.5). Daher soll hier auch der Vergleich der Feldstärken durch die Aussendung der Signalisation betrachtet werden. Dies entspricht der Expositionssituation in einer Zelle, in welcher sich keine aktiven Endgeräte befinden.

Da die Signalisations-Signale nur einen sehr kleinen Anteil der Resource-Elemente verwenden, ergeben sich nur kleine Sendeleistungen, die wiederum nur kleine Feldstärken entstehen lassen. Im wahren Betrieb werden z.B. 8 SSB-Blöcke mit einer Bandbreite von 3.81 MHz in einem 100 MHz breiten Funkband gesendet. Die SSB-Blöcke dauern 8-mal 140us (4 OFDM-Symbole à 35.714 u) und werden alle 10 ms wiederholt. Damit belegen die SSB-Blöcke  $(8 \times 140 \mu s \div 10 \text{ms}) \times (3.81 \text{MHz} \div 100 \text{MHz}) = 0.4\%$  der Resource-Elemente. Die SSB-Blöcke werden, im Vergleich zu den Daten, mit dem schwächeren Broadcast-Beam ausgesendet. Für eine korrekte Abschätzung müssten ebenfalls die Referenz-Symbole einbezogen werden, die bei eingeschalteten Endgeräten auch gesendet werden.

Zur Vereinfachung wird hier die komplizierte Bestimmung des Sendeleistungsanteils der Signalisations-Signale weggelassen und es wird eine Signalisierungs-Sendeleistung von 50Werp angenommen. Mit dieser Annahme lassen sich Simulationen aussagekräftig mit der gleichen Farbskala erstellen, welche die relativen Unterschiede zwischen den Antennen aussagekräftig aufzeigen.

Die folgende Abbildung stellt die adaptive Antenne dar, mit der Sendeleistung von 50Werp im Broadcast-Beam, sowie die 13 bereits bekannten Punkte.

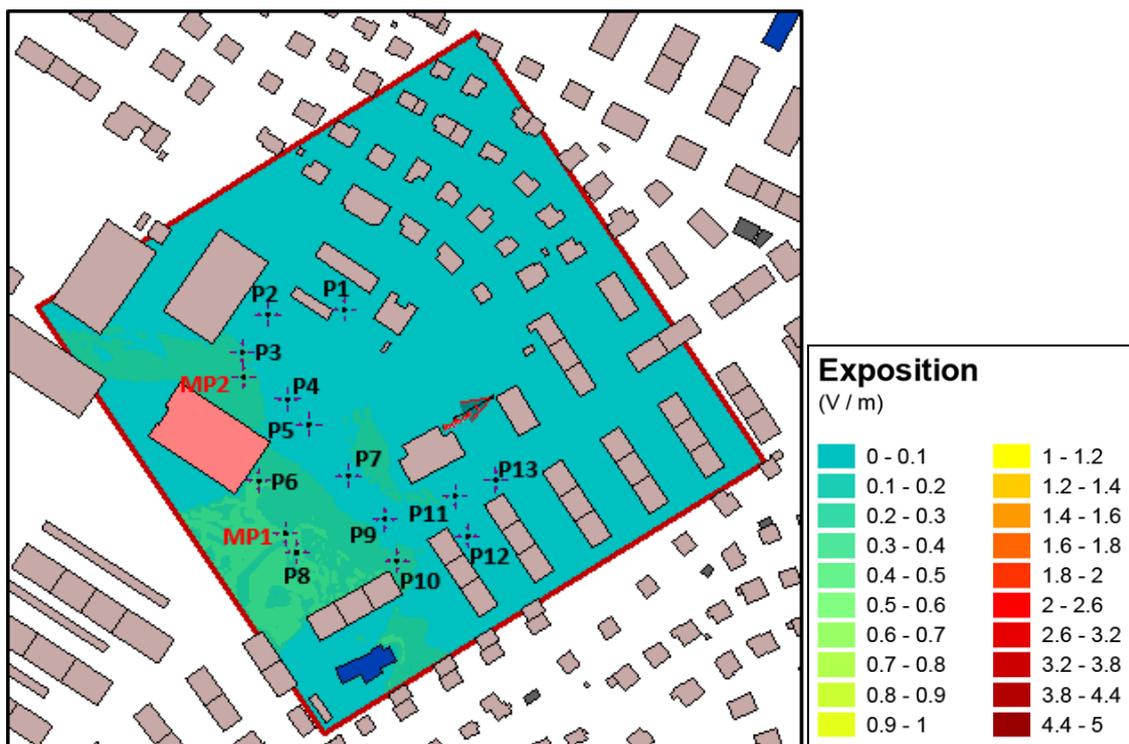


Abbildung 31: Adaptive Antenne mit 50Werp im Broadcast-Beam

Die folgende Abbildung stellt die herkömmliche Sektorantenne dar, mit der Sendeleistung von 50Werp im Hauptbeam, sowie die 13 bereits bekannten Punkte.

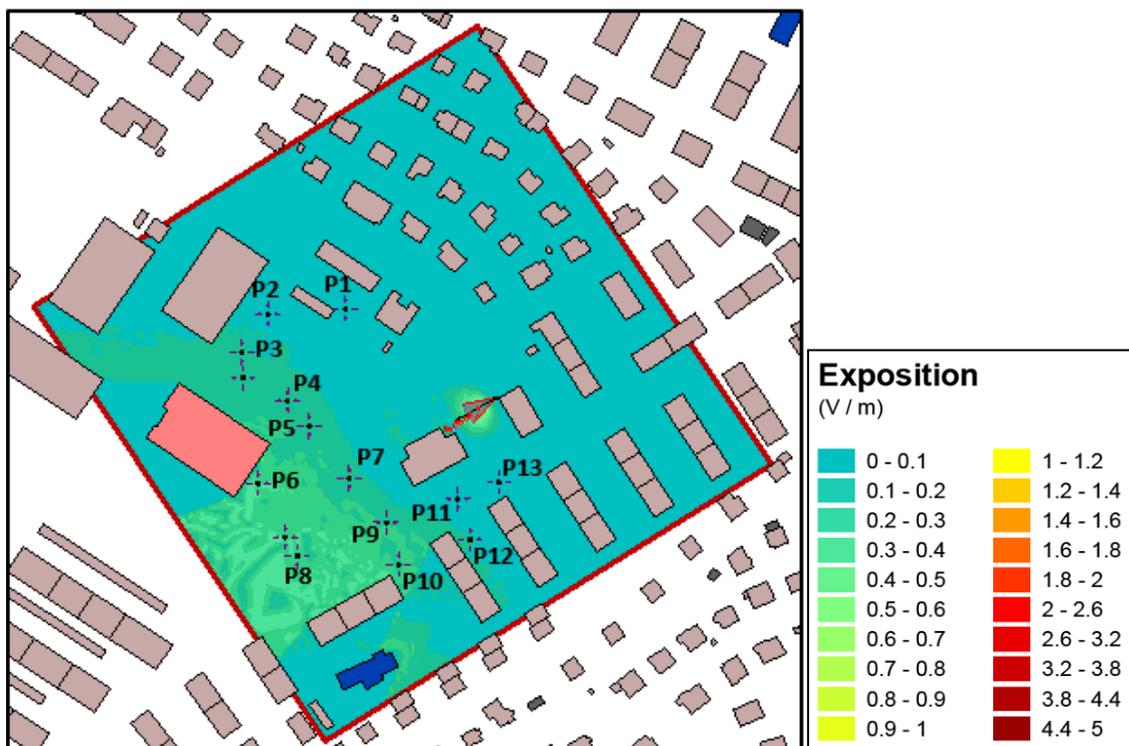


Abbildung 32: Herkömmliche Sektorantenne mit 50Werp

Die Tabelle 8 listet die berechneten Feldstärken, für beide Antennentypen, an den 13 Punkten auf.

Punkt	Feldstärke E (V/m)		Verhältnis der Feldstärken Adaptiv / Herkömmlich
	Adaptive Antenne	Herkömmliche Sektorantenne	
P1	0.01	0.02	2.00
P2	0.04	0.05	1.25
P3	0.09	0.13	1.44
P4	0.05	0.14	2.80
P5	0.03	0.17	5.67
P6	0.17	0.24	1.41
P7	0.06	0.14	2.33
P8	0.16	0.20	1.25
P9	0.04	0.21	5.25
P10	0.09	0.14	1.56
P11	0.09	0.04	0.44
P12	0.03	0.10	3.33
P13	0.01	0.02	2.00
		Minimum	0.44
		Maximum	5.67
		Mittelwert	3.06

Tabelle 8: Feldstärken der Signalisation (50Werp), beide Antennen

In der hintersten Spalte ist das Verhältnis der Feldstärken vor den beiden Antennen ausgerechnet. Ausser im Punkt P11 sind die Feldstärken vor der herkömmlichen Antenne grösser, es lässt sich jedoch kein klares Verteilmuster erkennen, da sich die Punkte in unterschiedlichen Distanzen zur Antenne befinden. Generell resultieren vor der adaptiven Antenne tiefere Feldstärken, was sich aufgrund des Antennendiagramms (weniger Gewinn) erklären lässt. Der hier ermittelte Bereich des Feldstärkeverhältnisses liegt zwischen 0.44 – 5.67 mit dem Verhältnis 3 (genau 3.06) in der Mitte dieses Bereiches.

Die durch die Signalisations-Signale erzeugte Feldstärke einer adaptiven Antenne ist, gemäss dieser Simulation, also etwa um den Faktor 3 tiefer als bei der herkömmlichen Sektorantenne.

## 4.2 Simulation ZH654-2

Im Zeitpunkt der Messung verwendet die Basisstation keine Codebook-Definierten Traffic-Beams sondern arbeitet mit dem Reziproken Beamforming basierend auf der realtime Auswertung der Sounding Reference Symbols (SRS). Dadurch können Simulationen unter Verwendung von diskreten Codebook-Beamformen nicht direkt mit den Messresultaten verglichen werden.

## 5 Analyse

### 5.1 Folgerungen

Aus den vorgenommenen Messungen und Simulationen können damit folgende Aussagen gemacht werden.

#### Messungen

- Die Messungen zeigen, dass die gesamte Sendeleistung auf die aktuell vorhandenen Beams aufgeteilt wird. Bei mehreren gleichzeitigen Beams haben diese also weniger Sendeleistung zur Verfügung.
- Der Vergleich der Feldstärke innerhalb und ausserhalb eines Beams zeigen eine um den Faktor 3 – 7 (10 – 17 dB) tiefere Feldstärke ausserhalb des Beams.
- Die Feldstärke verursacht durch die Signalisation ist 10-mal (20dB) tiefer als die Feldstärke verursacht durch einen einzelnen Beam.
- Die Messergebnisse bestätigen das Funktionieren der Power-Lock-Funktion.

#### Simulation

Die folgenden Simulationen werden durch die Messergebnisse bestätigt:

- Die Simulation ist so realisiert, dass die Sendeleistung zu gleichen Teilen auf die aktuellen Beams aufgeteilt ist.
- Der Vergleich der Feldstärke innerhalb und ausserhalb des Beams zeigen eine 6 – 19-mal tiefere Feldstärke ausserhalb des Beams.

Die folgenden Simulationen erläutern die Funktionalität der adaptiven Antennen:

- Die Feldstärke vor der Antenne ist gleichmässiger verteilt und hängt direkt von der Position der Endgeräte ab.  
Bei der Simulation von 13 Beams liegen die Feldstärken an den 13 Punkten zwischen 0.12 – 0.37 V/m. Alle Werte sind ausgeglichen in der gleichen Grössenordnung. Bei der herkömmlichen Sektorantenne sind die Feldstärken an den gleichen Punkten zwischen 0.04 – 0.61 V/m, wobei sie in seitlicher Ausrichtung kleiner als bei der adaptiven Antenne sind und in frontaler Ausrichtung grösser sind.
- Die adaptiven Antennen haben den Vorteil, dass die Datensignale in seitlicher Ausrichtung besser abgestrahlt werden. Der Vergleich mit den herkömmlichen Sektorantennen zeigt bis zu einem Faktor 6 mehr Signalstärke, womit die Daten viel effizienter und in kürzerer Zeit übertragen werden.
- In frontaler Ausrichtung ist die Feldstärke bei den adaptiven Antennen bis zu einem Faktor 3 kleiner, da die Daten für Endgeräte in seitlicher Ausrichtung jeweils gerichtet ausgesendet werden. Damit wird bei den adaptiven Antennen deutlich weniger «nutzlose» Sendeleistung in frontaler Richtung abgestrahlt.
- Der Hauptanteil der Feldstärke an einem Punkt in der Funkzelle besteht bei adaptiven Antennen jeweils klar durch den spezifischen Beam, der in diese Richtung abgestrahlt wird und aus Nutzdaten besteht. Von den anderen Beams werden nur sehr kleine Anteile beigetragen. Das Nutzsignal, welches ein Endgerät erreicht, wird an allen anderen Punkten mit einer durchschnittlich 12.8-mal kleineren Feldstärke empfangen.
- Die durch die Signalisations-Signale erzeugte Feldstärke einer adaptiven Antenne ist in etwa um den Faktor 3 tiefer als bei der herkömmlichen Sektorantenne.

## 5.2 Korrekturfaktor für adaptive Antennen

Die im Rahmen dieses Projektes erfolgten Messungen und ausgeführten Simulationen beschreiben die Feldverteilung um die adaptiven Antennen. Zum effizienten Einsatz der adaptiven Antennen muss ein Korrekturfaktor eingesetzt werden, um die Variabilität der Senderichtungen und der Antennendiagramme zu berücksichtigen. Dieser kann mittels verschiedenen Überlegungen abgeleitet werden, wobei Ansätze in der statistischen Verteilung der Beams (bei der Verwendung von Codebook-Beams), in den Ausbreitungseigenschaften (Antennendiagramme) der neuen Antennen oder auch in einer möglichen Mittelung des Beurteilungswertes zu finden sind.

### 5.2.1 Dämpfung der neuen Frequenzen

Bei der Betrachtung der Ausbreitungseigenschaften fällt auf, dass im aktuellen Beurteilungsmodell die Freiraumausbreitung und die Gebäudedämpfung mit einer Methode berechnet wird, welche die frequenzabhängigen Ausbreitungseigenschaften in der Luft nicht berücksichtigt. Für die damals, bei der Einführung der NISV, benutzten Frequenzbänder von 900 MHz und 1'800 MHz fallen die Dämpfungseigenschaften in der Luft noch nicht so ins Gewicht, doch bei den seit 2019 eingesetzten Frequenzbänder von 3.5 – 3.8 GHz ergeben sich schon grössere Abweichungen in der Berechnung. Ebenfalls ist die Gebäudedämpfung (in Mauern und Fenster) frequenzunabhängig und wird bisher mit folgenden Konstanten angewendet:

Material	Gebäudedämpfung in dB	Abschwächungsfaktor $\delta_n$
Eisenbeton	15	32
Metallfassade	15	32
Backstein	5	3.2
Holz	0	1
Ziegeldach	0	1
Glas (z.B. Fenster)	0	1

Tabelle 9: Aktuelle Gebäudedämpfung gemäss NISV

Als Vergleich sei hier auf die Betrachtungen der ANFR (Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 2 intermédiaire: premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G. Juillet 2019) hingewiesen, die die Absorption der Fenster mit 2 dB annehmen.

### 5.2.2 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des TDD-Verhältnisses

Wie im Kapitel 2.3 erläutert, muss für die Feldstärkemessung eines TDD-Signales das DL/UL-Verhältnis berücksichtigt werden, da ja ausschliesslich die Exposition durch die Anlage erfasst werden soll. Wie beschrieben ist dieses Verhältnis bei 4:1, womit der DL während 80% der Zeit stattfindet, was einem Korrekturfaktor von 1dB entspricht.

### 5.2.3 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Anzahl Beams

Eine der beiden Anlagen, bei denen Messungen durchgeführt sind, verwendet eine konkrete Anzahl Codebook-Basierter Beams. Daraus liesse sich eine statistische Verteilung ableiten, bei dem angenommen wird, dass durch den realistischen Betrieb der Anlage eine mittlere Exposition eingehalten ist und es dabei möglich ist, dass die Feldstärke kurzfristig leicht erhöht sein kann.

Die andere Anlage benutzt bereits das Reziproke Beamforming, welches in naher Zukunft von allen Anlagen angewendet wird. Dabei werden die Beams fortlaufend neu berechnet, damit die Funkeigenschaften optimal auf die örtlichen Gegebenheiten zugeschnitten sind (Reflektionen, Anzahl und Position der Endgeräte, Senderichtung und Nullstellen, etc.). Damit gibt es zum vornherein keine konkrete Anzahl Beams mehr und die Herleitung einer statistischen Verteilung wird schwierig.

Hier kann nun die Power-Lock-Funktion helfen, welche die Sendeleistung auf ein Mittel beschränkt und gleichzeitig, wie bei der statistischen Verteilung, Peak-Werte zulässt um eine technologiegerechte Datenkommunikation zu ermöglichen.

Im Folgenden sind hier einige Ansätze zur Bestimmung des Wertes des Korrekturfaktors aufgeführt.

### **Ansatz «Vier Traffic-Beams»**

Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass vier gleichzeitige Traffic-Beams, wovon jeder in eine andere Richtung gesendet wird, an einem OMEN eine Feldstärke mit dem Betrag des AGW (5 V/m) erzeugen. Würde die Anlage mit nur einem Traffic-Beam senden, so hätte dieser Beam die vierfache Sendeleistung (+6dB) zur Verfügung und würde am OMEN die doppelte Feldstärke erwirken, also 10 V/m. Der Korrekturfaktor ist hier also 6dB.

Als Zahlenbeispiel für die Anwendung dieses Ansatzes zusammen mit der Power-Lock-Funktion könnte die Sendeleistung ERPhigh des einen Beams am OMEN eine Feldstärke von 10 V/m ergeben und die Sendeleistung ERPlow eine Feldstärke von 4.5 V/m. Um über eine 6 Minuten Zeitspanne einen mittleren Wert von 5 V/m einzuhalten ergibt sich hierbei eine High/Low-Zeit von 33s/327s oder in Prozent ausgedrückt 9%/91%.

Die Wahl der ERPlow-Feldstärke ist ein Zahlenbeispiel und müsste hier und in den folgenden Ansätzen mit Kenngrößen der Netzplanung sowie Erfahrungswerten abgeglichen werden.

### **Ansatz «Zehn Traffic-Beams»**

Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass zehn gleichzeitige Traffic-Beams, wovon jeder in eine andere Richtung gesendet wird, an einem OMEN eine Feldstärke mit dem Betrag des AGW (5 V/m) erzeugen. Würde die Anlage mit nur einem Traffic-Beam senden, so hätte dieser Beam die zehnfache Sendeleistung (+10dB) zur Verfügung und würde am OMEN die dreifache Feldstärke erwirken, also 15 V/m. Der Korrekturfaktor ist hier also 10dB.

Als Zahlenbeispiel für die Anwendung dieses Ansatzes zusammen mit der Power-Lock-Funktion könnte die Sendeleistung ERPhigh des einen Beams am OMEN eine Feldstärke von 15 V/m ergeben und die Sendeleistung ERPlow eine Feldstärke von 4.5 V/m. Um über eine 6 Minuten Zeitspanne einen mittleren Wert von 5 V/m einzuhalten ergibt sich hierbei eine High/Low-Zeit von 17s/343s oder in Prozent ausgedrückt 5%/95%.

### **Ansatz «AGW als AVG-Wert und IGW als Peak-Wert»**

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass bei mittlerer Auslastung einer Mobilfunkanlage an einem OMEN die Feldstärke im Betrag des AGW, also 5 V/m, erzeugt wird. Bei voller Sendeleistung dürfte die Anlage am OMEN eine maximale Feldstärke im Betrag des IGW, also 50 V/m, erzeugen. Diese zehnfache Feldstärkenerhöhung ergibt einen Korrekturfaktor von 20dB.

Als Zahlenbeispiel für die Anwendung dieses Ansatzes zusammen mit der Power-Lock-Funktion könnte die Sendeleistung ERPhigh am OMEN eine Feldstärke von 50 V/m (IGW) ergeben und die Sendeleistung ERPlow eine Feldstärke von 4.5 V/m. Um über eine 6 Minuten Zeitspanne einen mittleren Wert von 5 V/m einzuhalten ergibt sich hierbei eine High/Low-Zeit von 4s/356s oder in Prozent ausgedrückt 1%/99%.

Dieser Ansatz ist unabhängig von der Antennencharakteristik und beruht nur auf den bekannten Größen der NISV. Es müsste auch kein neuer Wert eingeführt und begründet werden.

### Ansatz «Dämpfung der Beams in den jeweils anderen Punkten»

Im Kapitel 4.1.4 wird mittels Simulation der Betrag der Dämpfung eines Beams in den jeweils anderen Punkten ermittelt. Über alle Beams und Punkte gemittelt wird ein Beam durchschnittlich um 22.12dB (Feldstärke-Faktor 12.8) gedämpft.

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Feldstärke an einem OMEN im Betrag des AGW, also 5 V/m, durch «alle anderen Beams» erzeugt wird. Bei einem einzigen Beam in Richtung des OMEN würde damit eine maximale Feldstärke im Betrag  $5 \text{ V/m} \times 12.8 = 64 \text{ V/m}$ , erzeugen. Der Korrekturfaktor ist hier 22.12dB.

Als Zahlenbeispiel für die Anwendung dieses Ansatzes zusammen mit der Power-Lock-Funktion könnte die Sendeleistung ERPhigh am OMEN eine Feldstärke von 64 V/m ergeben und die Sendeleistung ERPlow eine Feldstärke von 4.5 V/m. Um über eine 6 Minuten Zeitspanne einen mittleren Wert von 5 V/m einzuhalten ergibt sich hierbei eine High/Low-Zeit von 3s/357s oder in Prozent ausgedrückt 0.8%/99.2%.

### Ansatz «ANFR»

Zum Vergleich sind hier die Betrachtungen der ANFR erwähnt, die folgende Korrekturfaktoren aufweisen:

- Zeitliche Variation Sektorantenne ANFR: 4dB
- Statistische Verteilung Beamforming-Antenne ANFR: 13.5dB
- TDD UL/DL (ANFR: 1.25dB = 0.75)
- Absorption in Fenster (ANFR: 2dB für neue Frequenzbänder)

Daraus Berechnen sie die folgenden voraussichtlichen Feldstärken:

- 4G Voraussichtliche Feldstärke =  $P_{IN} \times \text{Gain}_{ANT} - \text{ZeitVar} - \text{Absorb}_{FENSTER}$   
=  $P_{IN} \times 18\text{dBi} - 4\text{dB} - 2\text{dB} = P_{IN} \times 18\text{dBi} - 6\text{dB}$
- 5G Voraussichtliche Feldstärke =  $P_{IN} \times \text{Gain}_{ANT} - \text{StatVert} - \text{Absorb}_{FENSTER} - \text{TDD}$   
=  $P_{IN} \times 24\text{dBi} - 13.5\text{dB} - 2\text{dB} - 1.25\text{dB} = P_{IN} \times 24\text{dBi} - 16.75\text{dB}$

Für die 5G-Mobilfunktechnologie mit den adaptiven Antennen rechnet die ANFR mit einer Erhöhung der maximalen voraussichtlichen Feldstärke um 16.75dB und es wird kein Power-Lock eingesetzt. In unserer Betrachtungsweise entspricht dies einem Korrekturfaktor von 6.9 (16.75dB).

### 5.2.4 Radar in der NISV

Zur Information ist hier der Hinweis zum Radar, der sehr kurze Impulse aussendet und dann während einem vergleichsweise längeren Zeitraum keine Aussendung hat. Die Mobilfunktechnologie wird sicher nie ein solch extremes Zyklusverhältnis haben, doch hat sie sich auch vom klassischen Rundfunk, mit einer konstanten Trägerfrequenz und der Rundstrahlcharakteristik, entfernt. Die heutige Mobilfunktechnologie sendet im normalen Betrieb eher kurze Datenpakete in diskrete Richtungen aus und hat anschliessend eher längere Sendepausen.

In der NISV wird der Anlagegrenzwert des Radars als 5.5 V/m-Mittelwert während eines vollständigen Abtastzyklus betrachtet, wobei die Exposition während des Impulses auf 1'950 V/m begrenzt ist (für Radare über 2 GHz).

### 5.3 Vorschlag des BAKOM

Die Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften der neuen Frequenzbänder sowie der TDD-Eigenschaften sind angebracht und entsprechen der heutigen Situation. Der Ansatz «AGW als AVG-Wert und IGW als Peak-Wert» baut auf bestehenden Begriffen auf und könnte als Plafond-Wert zusammen mit der Power-Lock-Funktion eingesetzt werden.

## 6 Weitere Arbeiten

Zur vollständigen Erfassung der zweiten Anlage mit dem reziproken Beamforming sowie der Ergänzung der Kenntnisse zur Power-Lock-Funktion sollen die Messungen vor Ort komplettiert werden.