



23.2.2021

---

## **Erläuterungen zu adaptiven Antennen und deren Beurteilung gemäss der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)**

---

### **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Einleitung: 5G und adaptive Antennen</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)</b> .....	<b>3</b>
2.1	Revision der NISV von 2019 bezüglich Mobilfunk.....	3
2.2	Grundsätzliches zur Prognose und Messung von Mobilfunkstrahlung.....	3
<b>3</b>	<b>5G</b> .....	<b>4</b>
3.1	Technische Informationen .....	4
3.2	Prognose und Messung von 5G .....	5
<b>4</b>	<b>Adaptive Antennen und Beamforming</b> .....	<b>5</b>
4.1	Bauweise adaptiv betriebbarer Antennen und Begriffsdefinitionen .....	5
4.2	Beamforming-Technologien.....	6
4.3	Anwendungen des Beamformings.....	7
4.4	Fazit .....	8
<b>5</b>	<b>Prognose und Messung der Strahlung adaptiver Antennen</b> .....	<b>8</b>
5.1	Grundsätzliches .....	8
5.2	Antennendiagramme konventioneller Antennen.....	8
5.3	Umhüllende Antennendiagramme adaptiver Antennen.....	10
5.4	Berücksichtigung umhüllender Antennendiagramme bei der Prognose der Strahlung adaptiver Antennen gemäss Vollzugsempfehlung zur NISV .....	12
5.5	Verwendung der Antennendiagramme adaptiver Antennen bei der Abnahmemessung ..	13
<b>6</b>	<b>Exposition durch adaptive Antennen</b> .....	<b>15</b>
6.1	Simulationsstudien und theoretische Betrachtungen .....	15
6.2	Messstudien .....	17
6.3	Messungen und Simulationen BAKOM .....	17
6.4	Fazit .....	20
<b>7</b>	<b>Korrekturfaktor und automatische Leistungsbegrenzung</b> .....	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Weiteres</b> .....	<b>22</b>
8.1	Berücksichtigung des TDD-Betriebs.....	22
8.2	Begleitung und Erfahrungssammlung der Vollzugsempfehlung.....	24
<b>9</b>	<b>Weitere Informationen</b> .....	<b>25</b>



## 1 Einleitung: 5G und adaptive Antennen

Bisherige in der Schweiz eingesetzte Mobilfunkantennen senden im Wesentlichen mit einer immer gleichen räumlichen Verteilung der Strahlung. Adaptive Antennen sind demgegenüber in der Lage, das Signal tendenziell in die Richtung der Nutzerin oder des Nutzers bzw. des Mobilfunkgerätes zu fokussieren und es in andere Richtungen zu reduzieren («Beamforming»). Solche Antennen werden zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen, insbesondere mit der 5. Generation des Mobilfunks (5G), sie können aber auch für bisherige Technologien (z. B. 4G) eingesetzt werden.

Der Einsatz adaptiv betriebener Antennen in der Schweiz ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- Anfang 2019 hat der Bund zusätzliche Frequenzen in den Bändern bei 700 Megahertz (MHz), 1400 MHz und 3500 MHz bis 3800 MHz (= 3.5 Gigahertz (GHz) bis 3.8 GHz) für den Mobilfunk freigegeben. Insbesondere im Frequenzband von 3.5 GHz bis 3.8 GHz werden adaptiv betriebene Antennen zum Einsatz gelangen. Zum einen haben solche Frequenzen funktechnisch gesehen schlechtere Ausbreitungseigenschaften als die bisher genutzten Frequenzen um 2 GHz und darunter, d. h. sie werden bei der Übertragung durch die Luft oder Gebäudehüllen stärker abgeschwächt bzw. gedämpft. Zum andern ist es aufgrund der kleinen Wellenlänge der Strahlung in diesem Frequenzbereich (ungefähr 8 cm) möglich, kleinere und komplexere Antennen zu bauen, mit welchen sich die Signale in die gewünschte Richtung bündeln lassen. Dadurch können die schlechteren Ausbreitungseigenschaften kompensiert werden.
- Die Standardisierungsgremien für Telekommunikation haben Ende 2018 den ersten vollständigen Normensatz für den 5G-Standard veröffentlicht. 5G weist im Vergleich zu den früheren Mobilfunkgenerationen eine flexiblere Signalstruktur auf und sieht auch explizit den Einsatz adaptiver Antennen vor. Im April 2019 sind in der Schweiz die ersten Mobilfunkantennen in Betrieb gegangen, welche 5G-Signale aussenden.

Die Einführung adaptiver Antennen wurde somit mit den seit Anfang 2019 zusätzlich für den Mobilfunk eingesetzten Frequenzen im Bereich von 3.5 GHz bis 3.8 GHz und mit der seit Ende 2018 vollständig vorliegenden 5G-Normierung gefördert. Der 5G-Standard definiert jedoch nur, wie die digitalen Signale an die Antenne geliefert werden (d. h., wie sie auf die verschiedenen Antennenports einer adaptiven Antenne aufgeteilt werden). Die Funktionsweise der adaptiven Antennen ist hingegen nicht Teil der 5G-Standardisierung, sondern vom Hersteller abhängig (vgl. Abbildung 1).

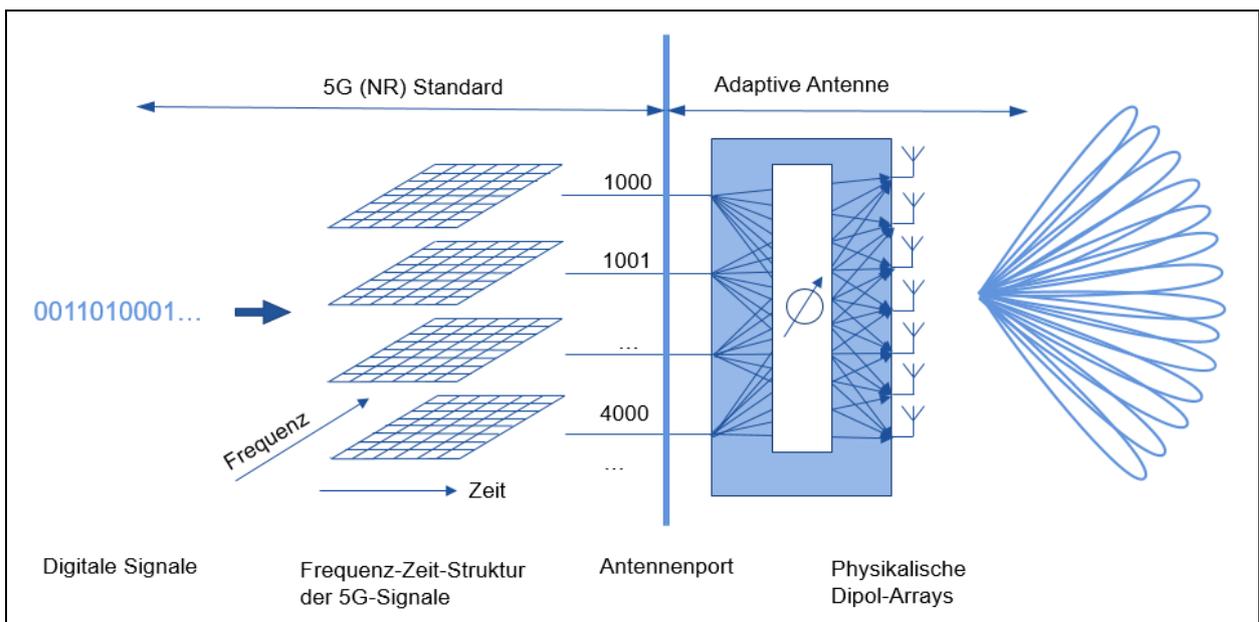


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von 5G und adaptiven Antennen. Der 5G-Standard definiert die Frequenz-Zeit-Struktur der Signale und wie sie an die verschiedenen Antennenports geliefert werden. Die Funktionsweise der adaptiven Antenne ist hingegen unabhängig von 5G (Quelle: METAS).

## 2 Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)

### 2.1 Revision der NISV von 2019 bezüglich Mobilfunk

Die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) ist für Mobilfunk technologie-neutral und gilt unabhängig davon, ob es sich bei der Mobilfunktechnologie um 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) oder 5G (New Radio) handelt. Aufgrund der Anfang 2019 neu dem Mobilfunk zugewiesenen Frequenzen um 1400 MHz und im Hinblick auf den sich abzeichnenden Einsatz von adaptiv betriebenen Antennen war trotzdem eine Anpassung der NISV notwendig. Diese erfolgte am 17. April 2019:

- Für den Frequenzbereich von 900 MHz bis 1800 MHz war in Anhang 1 Ziffer 64 NISV kein Anlagegrenzwert definiert. Diesen hat der Bundesrat – kongruent zum bisherigen Vorsorgeniveau – auf 5 Volt pro Meter (V/m) festgelegt.
- Für adaptive Antennen hat der Bundesrat den Grundsatz verankert, dass die Variabilität ihrer Sende-richtungen und Antennendiagramme bei der Festlegung des massgebenden Betriebszustands, in welchem die Anlagegrenzwerte nach Anhang 1 Ziffer 64 NISV einzuhalten sind, zu berücksichtigen sind.

Am 23.2.2021 hat das BAFU einen Nachtrag zur Vollzugshilfe zur NISV für adaptive Antennen publiziert, der beschreibt, wie deren Variabilität der Antennendiagramme bei der Beurteilung gemäss NISV Rechnung getragen werden kann. Nachfolgend finden sich Hintergrundinformationen zu dieser Vollzugsempfehlung sowie zu grundsätzlichen Aspekten von 5G und adaptiven Antennen.

### 2.2 Grundsätzliches zur Prognose und Messung von Mobilfunkstrahlung

Für die Bewilligung und Kontrolle von Mobilfunkanlagen und der Einhaltung der Grenzwerte der NISV sind die Kantone und Gemeinden zuständig. Je nach Kanton können die Verfahren etwas anders ablaufen, die Grundsätze sind jedoch überall dieselben:

- **Rechnerische Prognose:** Werden neue Mobilfunkanlagen erstellt oder bestehende ausgebaut, wird im Voraus die zu erwartende Strahlung in der Umgebung der Anlage berechnet und damit geprüft, ob die Grenzwerte der NISV eingehalten sind. Diese Berechnungen erfolgen basierend auf Betriebsparametern der Anlage wie den Sende-richtungen und Sendeleistungen. Diese Angaben sowie die Berechnungsergebnisse sind im sog. Standortdatenblatt dokumentiert und werden von den Behörden überprüft.
- **Abnahmemessung nach Inbetriebnahme:** Zeigen die Berechnungen, dass der Anlagegrenzwert der NISV an Orten mit empfindlicher Nutzung (wie Wohnungen, Schulen, Spitäler, ständigen Arbeitsplätze oder Kinderspielflächen) zu mehr als 80 % ausgeschöpft ist, verfügen die Behörden in der Regel eine Abnahmemessung nach Inbetriebnahme der neuen oder umgebauten Anlage. Damit wird die Einhaltung der Anlagegrenzwerte nicht nur auf dem Papier, sondern in der realen Umgebung überprüft.
- **Überprüfung im Betrieb:** Da gewisse Parameter, die einen Einfluss auf die Strahlung in der Umgebung einer Anlage haben (wie z. B. die Sendeleistungen), durch Fernsteuerung eingestellt und verändert werden können, haben die Betreiber auf ihren Netzzentralen ein Qualitätssicherungssystem implementiert. Dabei handelt es sich um Datenbanken, in denen für jede einzelne Anlage für jede betriebene Frequenz und jeden betriebenen Funkdienst die eingestellten Werte für die Sende-richtung und die maximale Sendeleistung erfasst und täglich mit den bewilligten Parametern verglichen werden. Abweichungen vom bewilligten Betrieb müssen innert 24 Stunden behoben werden, sofern dies durch Fernsteuerung möglich ist, andernfalls innerhalb einer Arbeitswoche. Gewisse Betriebsparameter und Bewilligungsdaten (gemäss Standortdatenblatt) aller Anlagen sind auch in einer Datenbank des Bundesamts für Kommunikation (BAKOM) enthalten und können dort von den Behörden kontrolliert werden.

Dieses Bewilligungs- und Kontrollprozedere ist hier stark verkürzt und nur soweit beschrieben, wie es im Hinblick auf die nachfolgenden Erläuterungen nötig ist. Ausführliche Informationen zur Bewilligung und Kontrolle von Mobilfunkanlagen finden sich in Kapitel 7.2 des [Berichts der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung](#) vom 18. November 2019.

### 3 5G

#### 3.1 Technische Informationen

5G baut auf dem vorhandenen 4G-Standard (LTE) auf. Das 5G-Signal ist im Frequenz-Zeit-Raum ähnlich strukturiert wie das 4G-Signal und auch mit der gleichen **Modulation** versehen, nämlich mit dem **Orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren** («Orthogonal Frequency-Division Multiplexing» OFDM).

5G kann daher zusammen mit 4G betrieben werden. Bei dieser **«Non Standalone»-Betriebsart** wird die Signalisierung (d. h. die Versorgung einer Funkzelle mit Informationen zur Identifizierung dieser Zelle) über ein bereits bestehendes 4G-Netz gewährleistet. Die Nutzdaten jedoch werden mit dem 5G-Standard im selben Frequenzband wie 4G abgestrahlt (sog. Verkehrskanäle). 5G kann auch unabhängig von 4G betrieben werden. Bei der **«Standalone»-Betriebsart** werden sowohl Signalisierung als auch Nutzdaten über 5G ausgesendet. Die volle Effizienz von 5G wird erst so erreicht.

5G weist damit wie die bisherigen Mobilfunktechnologien Signalisierungs- und Verkehrskanäle auf. Anders als bei den bisherigen Mobilfunkgenerationen, wo Signalisierungs- und Verkehrskanäle stets mit demselben **Antennendiagramm** abgestrahlt wurden, können bei 5G die Signalisierungs- und Verkehrskanäle mit unterschiedlichen Diagrammen ausgesendet werden (Weiteres dazu in Kap. 5.3).

In der internationalen Normierung sind für 5G zwei **Frequenzbereiche** vorgesehen: einen für Frequenzen unterhalb 6 GHz (FR1: 450 MHz bis 6000 MHz) und einen für Frequenzen oberhalb 6 GHz (FR2: 24.25 GHz bis 52.6 GHz). Bei Letzterem spricht man auch von «Millimeterwellen». In der Schweiz gelangt 5G zwischen 700 MHz und 3800 MHz (= 3.8 GHz) zum Einsatz (vgl. Abbildung 2). Für den Mobilfunk sind Millimeterwellen in der Schweiz derzeit noch nicht vorgesehen. Über eine Nutzung dieser Frequenzbänder müsste der Bundesrat im Rahmen der Genehmigung des Nationalen Frequenzzuweisungsplans (NaFZ) entscheiden.

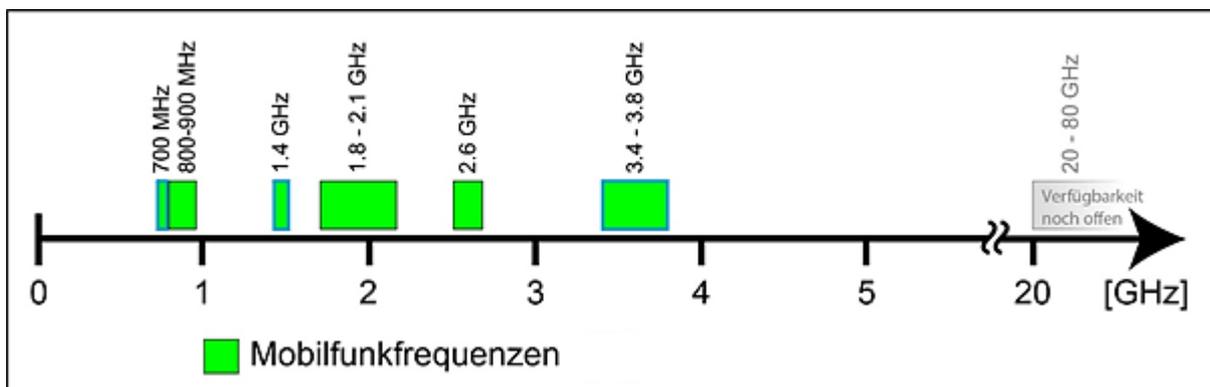


Abbildung 2: 5G kann in der Schweiz auf allen für den Mobilfunkbereich zugelassenen Frequenzen von 700 MHz bis 3.8 GHz zum Einsatz kommen. Erste adaptive Antennen werden im Bereich von 3.4 GHz bis 3.8 GHz eingesetzt (Quelle: Arbeitsgruppe NIS des Cercl'Air).

In den Frequenzbändern von 700 MHz bis 2.6 GHz werden in der Schweiz derzeit die Signale von der Basisstation zum Mobilgerät (Downlink) auf einer anderen Frequenz (bzw. in einem separaten benachbarten Frequenzband) gesendet als die Signale vom Endgerät zur Antenne (Uplink). Dies wird als **Frequenzduplex** («**Frequency Division Duplexing**» FDD) bezeichnet.

Bei 3.4 GHz bis 3.8 GHz und teilweise bei 2.6 GHz erfolgen Downlink und Uplink auf der gleichen Frequenz, aber zu unterschiedlichen Zeiten, was entsprechend **Zeitduplex** («**Time Division Duplexing**» TDD) heisst. Die Zeitfenster für den Downlink und den Uplink sind klar definiert, das Verhältnis Downlink zu Uplink beträgt derzeit 4:1 bzw. 80:20. Die Basisstation sendet damit während eines Downlink-Uplink-Zyklus höchstens 80 % der Zeit, 20 % der Zeit ist für die Übertragung vom Mobilgerät zur Basisstation reserviert. TDD kommt zum Einsatz, wenn deutlich mehr Daten im Downlink als im Uplink zu übermitteln sind. Zudem haben Downlink und Uplink dieselben Ausbreitungseigenschaften.

Ob FDD oder TDD eingesetzt wird, ist nicht von der Mobilfunkgeneration abhängig, sondern dies ist in den Konzessionen für die jeweiligen Frequenzen festgelegt. Entsprechend gelangt auch bei 5G zwischen 700 MHz und 2.6 GHz FDD und zum Teil bei 2.6 GHz sowie zwischen 3.4 GHz bis 3.8 GHz TDD zu Anwendung.

### 3.2 Prognose und Messung von 5G

Die in der NISV festgelegten Immissions- und Anlagegrenzwerte variieren je nach Frequenz der Strahlung, sie sind jedoch nicht von der Mobilfunktechnologie abhängig und gelten damit unabhängig davon, ob es sich um 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) oder 5G (New Radio) handelt. Die **rechnerische Prognose** der Strahlung im Rahmen des Bewilligungsverfahrens erfolgt technologieunabhängig. Sie ist daher auch für 5G anwendbar.

Die eingesetzte Mobilfunktechnologie spielt erst für die **Abnahmemessungen** nach Inbetriebnahme eine Rolle, da je nach Mobilfunkstandard eine andere Signalform verwendet wird. Im technischen Bericht [«Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz»](#) vom 18. Februar 2020 hat das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) beschrieben, wie die 5G-Signale definiert sind und welche Signalkomponenten zu messen sind. Weitere Informationen dazu finden sich auch im Kapitel 2.1 der [«Erläuterungen zur Messmethode für adaptive Antennen»](#) des BAFU vom 30. Juni 2020.

## 4 Adaptive Antennen und Beamforming

### 4.1 Bauweise adaptiv betriebbarer Antennen und Begriffsdefinitionen

Eine adaptiv betriebbare Antenne besteht aus einer Anordnung von (kreuzpolarisierten) Elementarantennen resp. Antennenelementen in Spalten und Zeilen, was auch als Antennen-Array bezeichnet wird (vgl. Abbildung 3):

- Durch das Zusammenschalten mehrerer Antennenelemente kann eine Richtwirkung der ausgesendeten Strahlung, ein sog. Beam, erzeugt werden. Dabei gilt vereinfacht: Je grösser die Anzahl Antennenelemente, desto grösser die mögliche Richtwirkung, d. h. desto schmaler der ausgesendete Beam und höher der Antennengewinn.
- Werden die einzelnen oder zusammenschalteten Antennenelemente unterschiedlich angesteuert (z. B. über Phasenverschiebungen), kann die Hauptsenderichtung des Beams horizontal und vertikal bewegt werden.

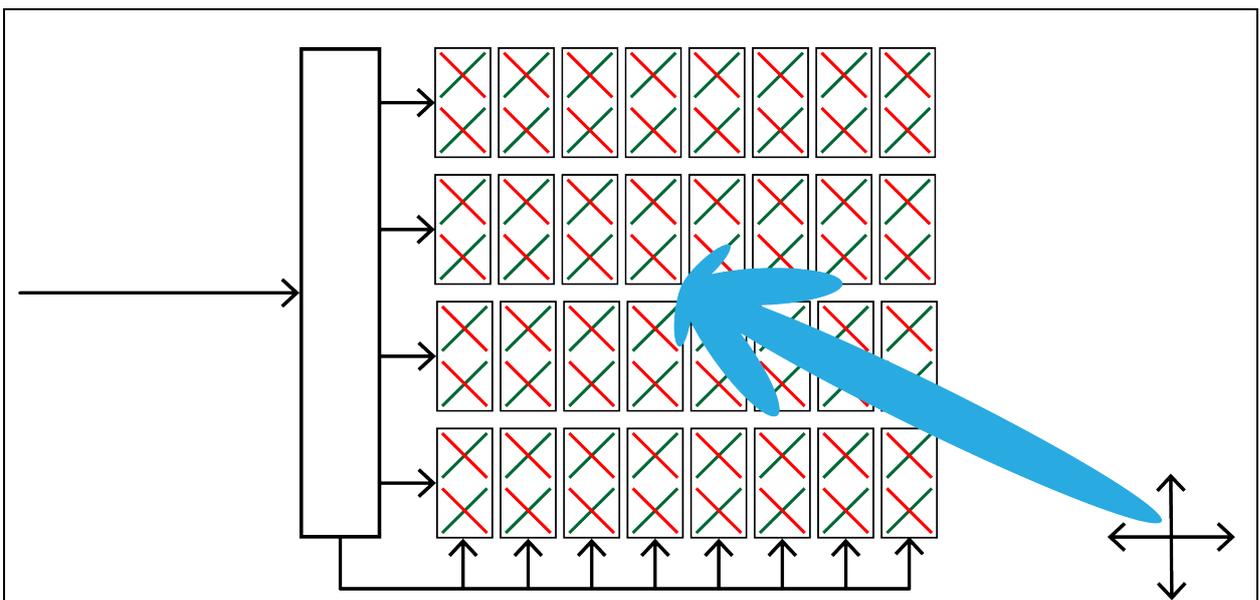


Abbildung 3: Prinzip-Skizze einer adaptiv betriebbaren Antennen mit 64 Antennenelementen bestehend aus Kreuzdipolen (in rot und grün eingezeichnet). Im Beispiel sind je zwei Antennenelemente zu einem Sub-Array zusammengeschaltet. Die Antenne besteht somit aus  $4 \times 8 = 32$  Sub-Arrays.

Im Zusammenhang mit dem Nachtrag zur Vollzugshilfe zur NISV für adaptive Antennen werden folgende Begriffe verwendet:

Unter **adaptiven Antennen** im Sinne der NISV werden Sendeantennen oder Antennensysteme verstanden, die ihre Senderichtung und/oder ihr Antennendiagramm automatisch in kurzen zeitlichen Abständen ohne Veränderung der Montagerichtung anpassen.

Bei heutzutage gebräuchlichen Mobilfunkantennen besteht ein **Antennenelement** aus zwei kreuzpolarisierten Dipolen; in Abbildung 3 ist der grüne Dipol +45° polarisiert und der rote -45° polarisiert. Die ausgesendeten Signale weisen also zwei verschiedene Polarisationssebenen auf.

Antennenelemente, die physisch fest zusammengeschaltet sind, werden als **Sub-Array** bezeichnet. Sind beispielsweise bei einer Antenne, die aus 96 Antennenelementen (= 192 Dipole) besteht, jeweils 3 Antennenelemente fest zusammengeschaltet, weist die Antenne 32 Sub-Arrays auf, sind 6 Antennenelemente miteinander verbunden, verfügt die Antenne über 16 Sub-Arrays. Oder eine Antenne, die aus 64 Antennenelementen (= 128 Dipole) besteht, verfügt über 32 Sub-Arrays, wenn jeweils 2 Antennenelemente fest miteinander verbunden sind, und über 16 Sub-Arrays, wenn 4 Antennenelemente physisch zusammengeschaltet sind.

Im vorliegenden Beispiel wird jede Polarisation eines Sub-Arrays durch einen separaten **Sendepfad** bedient – bzw. umgekehrt ausgedrückt: Ein Sendepfad bedient immer alle miteinander verbundenen Dipole gleicher Polarisation eines Sub-Arrays. Bei Antennen mit kreuzpolarisierten Dipolen wird ein Sub-Array somit über 2 Sendepfade bedient.

Jeder Sendepfad wird durch eine separate Endstufe (sog. Transmitter resp. TX-Element) angesteuert. Ein Sendepfad entspricht normalerweise auch gerade einem Empfangspfad (Receiver resp. RX), wobei die Signale beim Empfang in die umgekehrte Richtung fließen. Eine sog. 64T/64R-Antenne verfügt somit über 64 Sendepfade bzw. 32 Sub-Arrays und eine 32T/32R-Antenne über 32 Sendepfade bzw. 16 Sub-Arrays (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zahlenbeispiele zum Zusammenhang der Anzahl Dipole, Antennenelemente, Sub-Arrays und Sendepfade bei Antennen mit kreuzpolarisierten Dipolen

Anzahl Dipole	Anzahl Antennenelemente	Anzahl physisch miteinander verbundene Antennenelemente	Anzahl Sub-Arrays	Anzahl Sendepfade	Endstufen (Sendepfad x Empfangspfad)
192	96	3	32	64	64×64 bzw. 64T/64R
192	96	6	16	32	32×32 bzw. 32T/32R
128	64	2	32	64	64×64 bzw. 64T/64R
128	64	4	16	32	32×32 bzw. 32T/32R

Wie viele Beams eine adaptive Antenne erzeugen kann, hängt von der Anzahl separat ansteuerbarer Antenneneinheiten ab. Im Hinblick auf die Exposition des Menschen, bei welcher die verschiedenen Polarisationssebenen keine wesentliche Rolle spielen, ist somit die Anzahl Sub-Arrays relevant. In den Datenblättern zu den Antennen sind meist die Anzahl Sendepfade (bzw. Transceiver, z. B. 64T) publiziert. Bei Antennen mit zwei Polarisationssebenen kann diese Angabe somit durch 2 dividiert werden, um die Anzahl Sub-Arrays einer Antenne zu erhalten.

## 4.2 Beamforming-Technologien

Verschiedene Antennenelemente unterschiedlich anzusteuern, ist wegen der heute vorhandenen hohen Leistungsfähigkeit der Computer möglich geworden, welche die Signale in kürzerer Zeit aufbereiten können als früher. Je nachdem, wo im Signalaufbereitungsprozess die Phasenverschiebungen für die unterschiedliche Ansteuerung der Antennenelemente vorgenommen wird, sind unterschiedlich viele gleichzeitig ausgesendete Beams möglich und wird die Beamforming-Technologie anders benannt, wobei die Definitionen nicht immer exakt gleich verwendet werden.

Findet die Phasenverschiebung, mit der das Signal für die einzelnen Antennenelemente versehen wird, nach der Digital-zu-Analog-Umwandlung des Signals (im Hochfrequenzteil der Antenne) statt, spricht man von **analogem Beamforming**. Antennen, die mit analogem Beamforming betrieben werden, können immer nur einen Beam bzw. nur ein bestimmtes Antennendiagramm auf einmal aussenden. Verschiedene Diagramme resp. Senderichtungen (Beams) müssen also nacheinander abgestrahlt werden. Zudem wird die Phasenverschiebung auf das ganze Frequenzband angewendet, d. h., einzelne Frequenzbereiche können nicht gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen gesendet werden. Die Phaseninformation wird beim analogen Beamforming linear auf alle Antennenelemente einer Antenne angewendet, womit maximal gleich viele unterschiedliche räumliche Ausprägungen bzw. Beams erzeugt werden können, wie es separat voneinander ansteuerbare Einheiten in der Antenne (Sub-Arrays) hat.

Wird die Aufteilung des Signals auf die verschiedenen Antennenelemente bereits im digitalen Teil der Signalverarbeitung und damit vor dessen Digital-zu-Analog-Umwandlung vorgenommen, bezeichnet man dies als **digitales Beamforming**. Mit digitalem Beamforming können theoretisch gleichzeitig eine beliebige Anzahl Beams in beliebigen Ausrichtungen erzeugt werden, da jedem Antennenelement eine eigene Amplituden- und Phaseninformation zugeteilt werden kann. Auch muss das so gebildete Antennendiagramm nicht unbedingt eine klare Hauptstrahlrichtung aufweisen. So kann zum Beispiel ein Kanal für ein Endgerät massgeschneidert werden, wenn keine Sichtverbindung zur Basisstation besteht, indem verschiedene Ausbreitungspfade verwendet werden.

Die heute gebräuchlichen adaptiven Antennen setzen oft eine Kombination von analogem und digitalem Beamforming ein, was als **hybrides Beamforming** bezeichnet wird. Dabei werden mehrere Antennenelemente zu einem «Funktionsblock» zusammengefasst und jeweils mit der Analog-Beamforming-Technologie betrieben. Dadurch ergeben sich Beschränkungen in der Anzahl der Beams, die gleichzeitig ausgesendet werden können. Werden gleichzeitig mehrere Beams abgestrahlt, dann wird die Sendeleistung, die der Basisstation zur Verfügung steht, auf die verschiedenen Beams aufgeteilt (BAKOM 2021).

### 4.3 Anwendungen des Beamformings

Neben unterschiedlichen Möglichkeiten, Beams zu bilden, gibt es auch verschiedene Möglichkeiten, die Beamforming-Technologie anzuwenden. In der Praxis werden etwa folgende Varianten genannt, wobei die Bezeichnungen je nach Quelle nicht immer einheitlich sind (BAKOM 2021):

- Bei Funkverbindungen ohne Reflexionen, meist bei Sichtverbindung, wird die Basisstation einen einzelnen, direkten Beam mit der besten Verbindungsqualität zum Endgerät senden (**SISO: Single Input, Single Output**).
- Bei weniger guten Funkverbindungen kann die Antenne den gleichen Datenstrom auf verschiedenen Wegen, z. B. über Reflexionen an umliegenden Strukturen wie Hausfassaden oder Geländeerhebungen, zum Mobilgerät schicken und die Strahlung in Richtung anderer Nutzerinnen und Nutzer reduzieren (**SIMO: Single Input, Multiple Output**).
- Zur Erhöhung der Datenrate können einem Mobilgerät ebenfalls gleichzeitig mehrere Datenströme über verschiedene Beams geschickt werden (**SU-MIMO: Single User – 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 Reflexionen aufbauen (**MU-MIMO: Multi User – Multiple Input, Multiple Output**).
- Falls die Antenne der Basisstation aus sehr vielen Antennenelementen besteht (man spricht von über hundert Elementen) und damit auch viele einzelne Beams erzeugen kann, dann kann ein Endgerät über viele Verbindungspfade gleichzeitig angesteuert werden (**mMIMO: massive Multiple Input, Multiple Output**).

#### 4.4 Fazit

Unabhängig davon, wie die Anwendungen und Technologien des Beamformings benannt werden, sind im Hinblick auf den Vollzug der NISV bei adaptiven Antennen folgende Punkte relevant:

- Durch das Zusammenschalten mehrerer Antennenelemente (sog. Sub-Arrays) kann eine Richtwirkung der ausgesendeten Strahlung, ein sog. Beam, erzeugt werden. Dabei gilt vereinfacht: Je grösser die Anzahl Antennenelemente, desto grösser die mögliche Richtwirkung, d. h. desto schmaler der ausgesendete Beam und höher der Antennengewinn.
- Wie viele Beams eine adaptive Antenne erzeugen kann, hängt von der Anzahl separat ansteuerbarer Antenneneinheiten – der Anzahl Sub-Arrays – ab.
- Je nach angewandeter Technologie kann entweder nur ein Beam auf einmal oder können auch mehrere Beams gleichzeitig ausgesendet werden.
- Das Antennendiagramm muss nicht unbedingt eine klare Hauptstrahlrichtung haben, sondern kann verschiedene Ausprägungen aufweisen.
- Alle möglichen Beams und Ausprägungsformen bleiben dabei jedoch innerhalb eines umhüllenden Antennendiagramms (vgl. Kap. 5.3).
- Wird nur ein Beam auf einmal ausgesendet, kann die maximale Sendeleistung in diesen Beam fokussiert werden. Werden gleichzeitig mehrere Beams abgestrahlt, dann wird die Sendeleistung, die der Basisstation zur Verfügung steht, auf die verschiedenen Beams aufgeteilt. Dies haben unter anderem die Messungen des Bundesamts für Kommunikation (BAKOM) im Sommer 2020 aufgezeigt (BAKOM 2021).

### 5 Prognose und Messung der Strahlung adaptiver Antennen

#### 5.1 Grundsätzliches

Die Exposition in der Umgebung einer Basisstation hängt grundsätzlich ab von der äquivalenten Sendeleistung ERP (effective radiated power) der Antenne, dem räumlichen Abstrahlungsmuster der Antenne (Antennendiagramm), dem Abstand und der Richtung zur Antenne und der Dämpfung durch die Gebäudehülle (Mauerwerk, Dächer). Sind diese Faktoren für eine konkrete Situation bekannt, lässt sich die durch eine Mobilfunkantenne an einem bestimmten Ort in der Umgebung verursachte Immission, ausgedrückt als elektrische Feldstärke in Volt pro Meter (V/m), berechnen. Alle diese Parameter und die Berechnungsergebnisse sind im Standortdatenblatt, welches die Betreiber der Behörde einreichen müssen, dokumentiert und werden von der Behörde überprüft.

Sowohl bei konventionellen als auch bei adaptiven Antennen bilden die Antennendiagramme, welche das räumliche Abstrahlungsmuster der Antenne beschreiben, ein zentrales Element für die rechnerische Prognose im Rahmen von Bewilligungen.

#### 5.2 Antennendiagramme konventioneller Antennen

Bereits konventionelle Antennen senden nicht gleichförmig in alle Richtungen, sondern bündeln die Funksignale und lenken diese in die gewünschte Hauptstrahlrichtung. Ausserhalb des Kegels ist die Strahlung zwar noch vorhanden, aber stark reduziert. Allerdings treten neben dem Hauptstrahl so genannte «Nebenkeulen» auf, in denen die Strahlung ebenfalls erhöht ist. Abbildung 4 zeigt eine 3D-Darstellung der mit einer Flugdrohne gemessenen Strahlung einer LTE-Antenne.

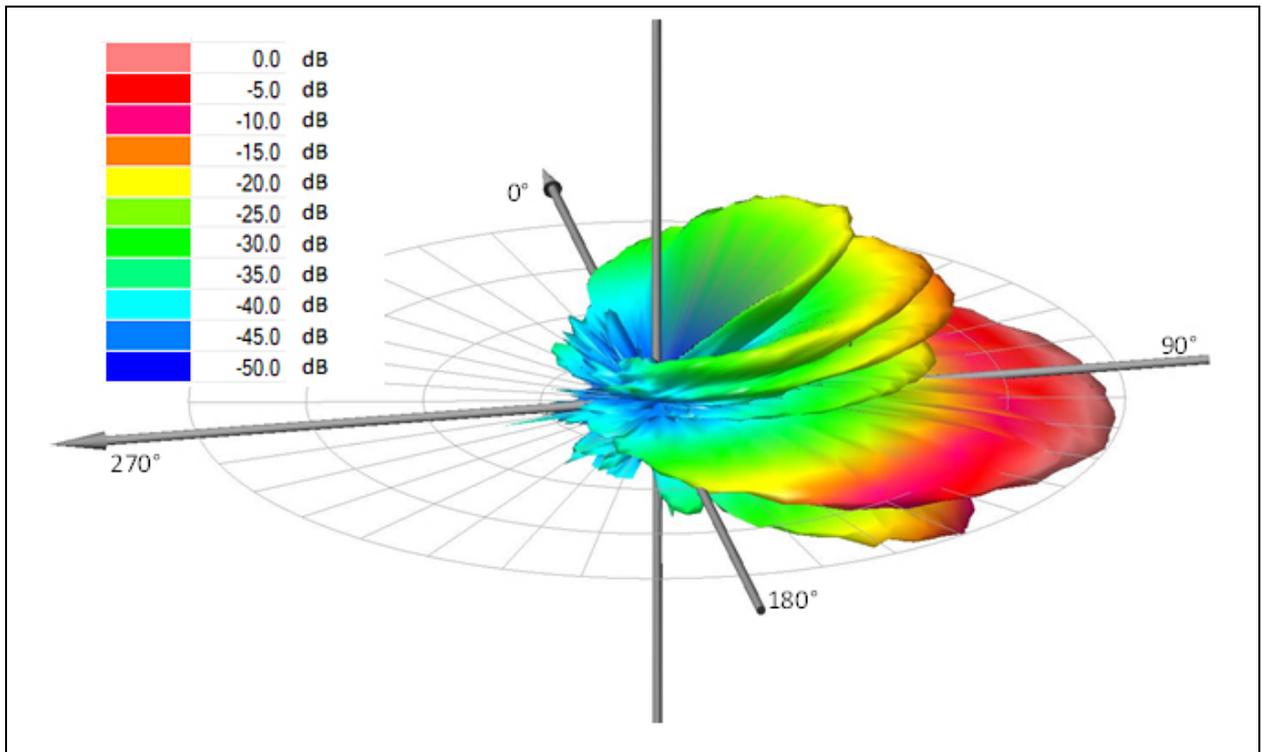


Abbildung 4: 3D-Darstellung der Strahlung einer LTE-Antenne, die auf der Frequenz von 1800 MHz sendet. Die Antenne befindet sich in der Mitte der Grafik und sendet mit einer leichten Neigung nach unten (Elevation) in die Richtung, die mit 90° (Azimut) gekennzeichnet ist. Neben dem rötlich eingefärbten Hauptstrahl sind auch Nebenseitenstrahlen erkennbar (Quelle: STRAPAG 2018).

Blickt man von der Seite auf die 3-dimensionale Abbildung und macht einen vertikalen Schnitt, erhält man das 2-dimensionale vertikale Antennendiagramm (vgl. Abbildung 5, links). Im dargestellten Beispiel ist ersichtlich, dass die Antenne nicht waagrecht abstrahlt (0°), sondern leicht gegen unten.

Blickt man von oben auf die Antenne und macht einen horizontalen Schnitt durch das 3D-Antennendiagramm, ergibt sich das 2-dimensionale horizontale Antennendiagramm (vgl. Abbildung 5, rechts). Daraus lässt sich ablesen, in welche Richtung (Azimut in Grad) die Antenne sendet.

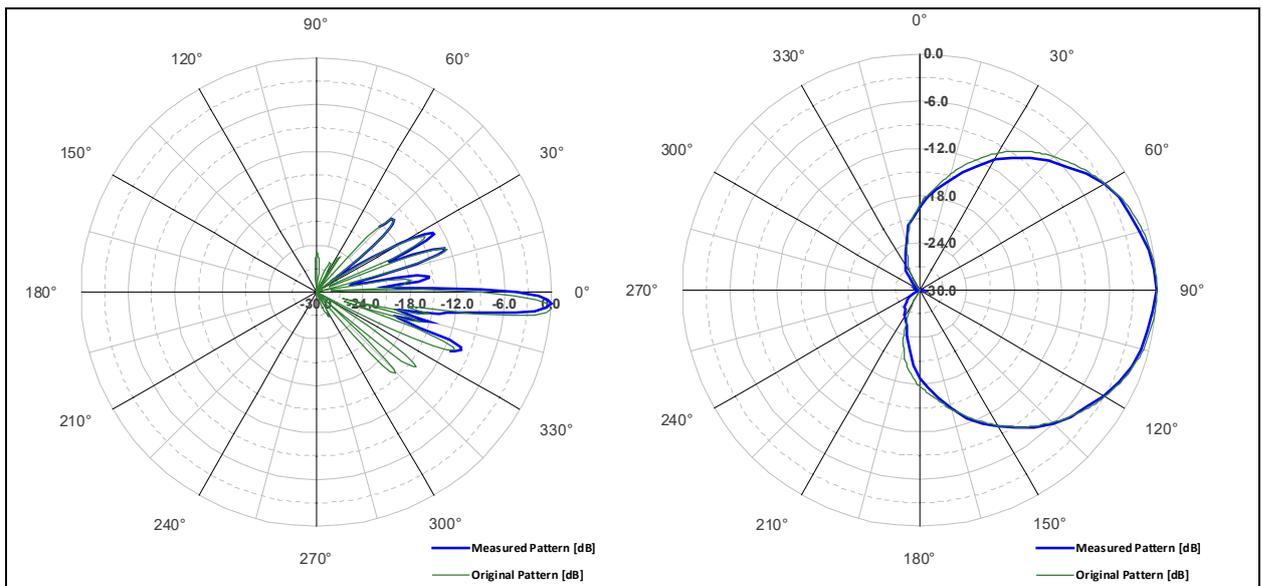


Abbildung 5: Vertikales Antennendiagramm (links) und horizontales Antennendiagramm (rechts) einer LTE-Antenne, die im Bereich von 1800 MHz sendet. Grün ist das im Labor gemessene Originaldiagramm und blau das im Feld mit einer Flugdrohne gemessene Antennendiagramm (bezogen auf die elektrische Feldstärke) (Quelle: STRAPAG 2018).

Die horizontalen und vertikalen Antennendiagramme werden vom Antennenhersteller geliefert und liegen jeweils auch dem Standortdatenblatt bei, welches die Betreiber im Rahmen von Bewilligungsverfahren einreichen müssen. Es liefert wesentliche Angaben, um die elektrische Feldstärke an den Orten mit empfindlicher Nutzung in der Umgebung der Anlage berechnen zu können.

Die Antennendiagramme werden vom Hersteller im Labor gemessen. 2018 hat das BAFU im Rahmen einer [Pilotstudie](#) das räumliche Abstrahlungsmuster einer bestehenden Mobilfunkanlage in realer Umgebung mittels einer Flugdrohne ausmessen lassen. Die Resultate haben gezeigt, dass die gemessenen Antennendiagramme gut mit den Originaldiagrammen übereinstimmen (vgl. STRAPAG 2018).

### 5.3 Umhüllende Antennendiagramme adaptiver Antennen

Anhang 1 Ziffer 63 der NISV bestimmt, was bei einer Mobilfunkanlage als massgebender Betriebszustand gilt, in welchem der Anlagegrenzwert an Orten mit empfindlicher Nutzung einzuhalten ist. Als massgebender Betriebszustand gilt grundsätzlich der maximale Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung.

Bei konventionellen Antennen ist das räumliche Abstrahlungsmuster (dargestellt als Antennendiagramm) immer das gleiche. Bei adaptiven Antennen hingegen kann das Abstrahlungsmuster beim maximalem Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung unterschiedliche räumliche Ausprägungen annehmen. Es kann zum Beispiel nur ein Beam gebildet werden. Dieser kann in verschiedene Richtungen gesendet werden (vgl. Abbildung 6), wodurch adaptive Antennen eine hohe Abdeckung in der Fläche erzielen und bisher schlecht versorgte Zonen am Rand der versorgten Zelle bei Bedarf mit einer höheren Feldstärke versorgen können. Es können auch mehrere Beams gleichzeitig abgestrahlt werden, auch bei diesen kann ihre Hauptsenderichtung variieren.

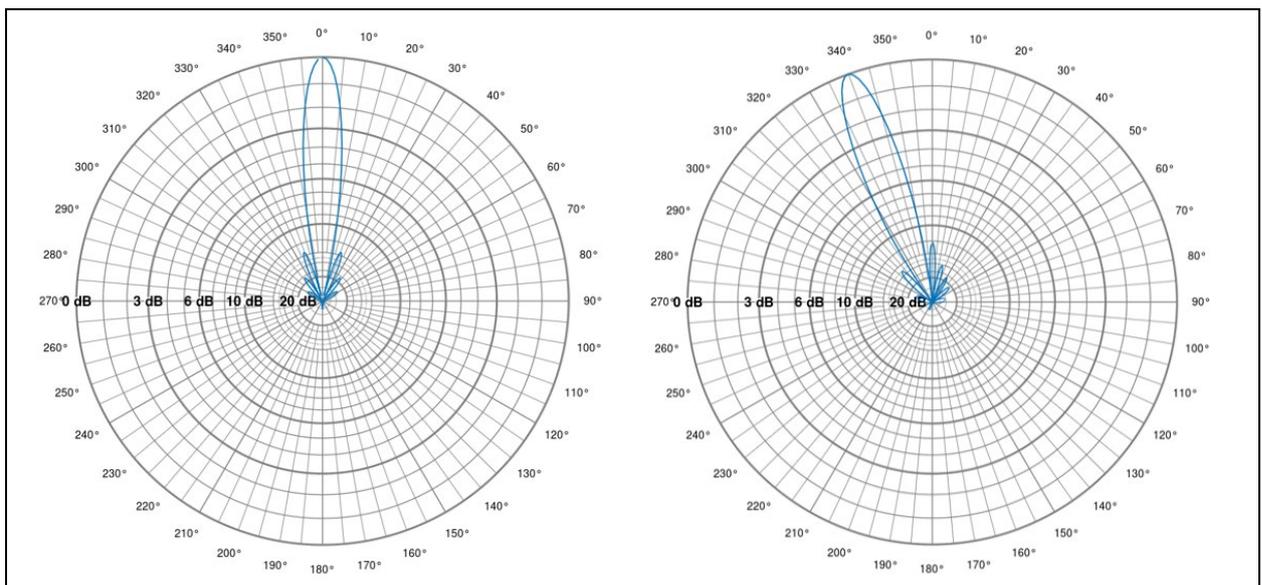


Abbildung 6: Beispiele, wie das horizontale Antennendiagramm einer adaptiven Antenne im massgebenden Betriebszustand aussehen kann. Im Bild links beträgt das Azimut der Hauptsenderichtung 0° und im Bild rechts 340°.

Das Antennendiagramm im massgebenden Betriebszustand ist bei adaptiven Antennen also nicht immer das gleiche. Die rechnerischen Prognosen basieren bei adaptiven Antennen daher auf einem umhüllenden Antennendiagramm. Dieses umhüllende Antennendiagramm schliesst sämtliche Antennendiagramme ein, die im massgebenden Betriebszustand auftreten können (vgl. Abbildung 7). Bei den umhüllenden Antennendiagrammen ist berücksichtigt, dass Beams in Richtungen, die stark von der Hauptstrahlrichtung abweichen, weniger stark gebündelt sind und einen kleineren Antennengewinn aufweisen.

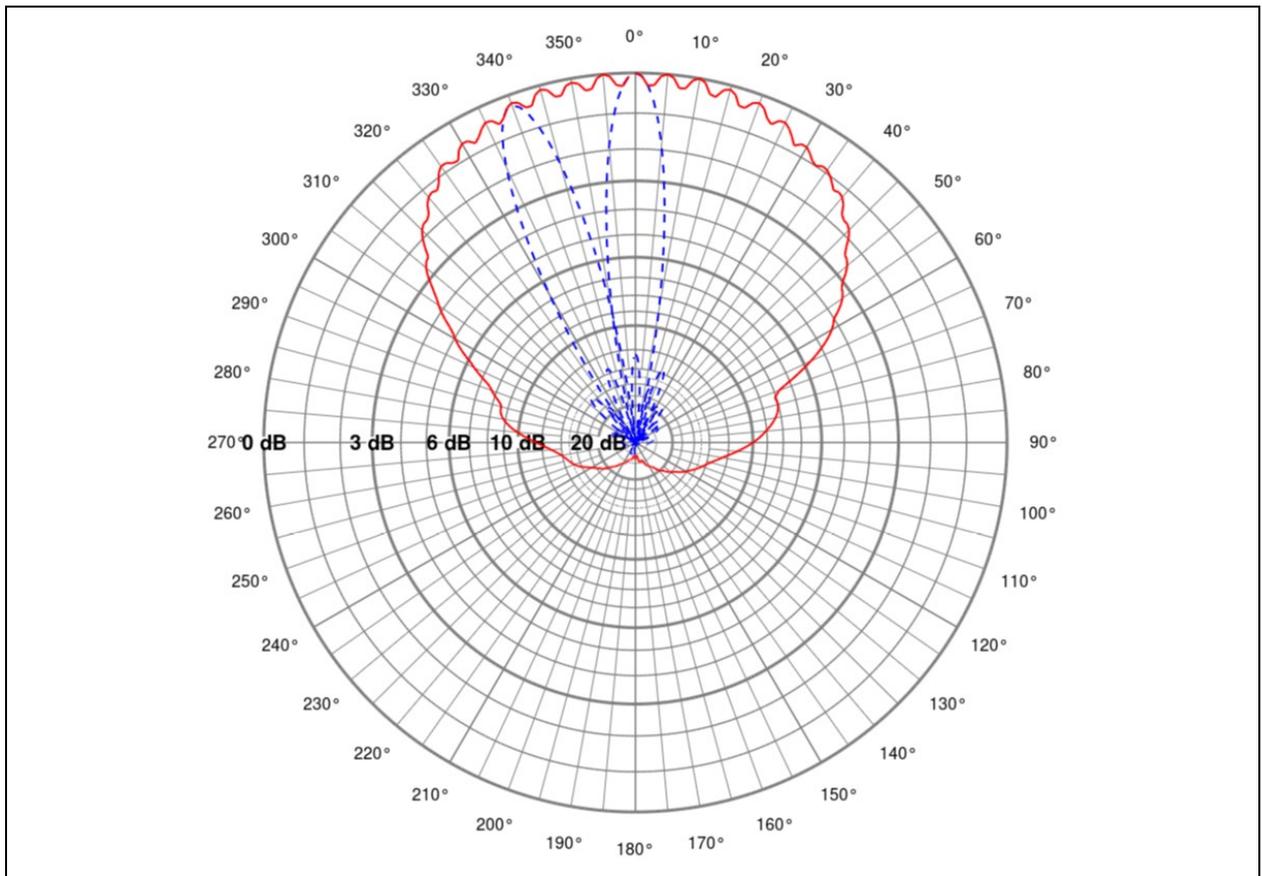


Abbildung 7: Beispiel für ein umhüllendes horizontales Antennendiagramm einer Ericsson-Antenne (AIR6488), die im Bereich von 3.6 GHz sendet. Das umhüllende Antennendiagramm schliesst sämtliche Antennendiagramme ein, die im massgebenden Betriebszustand theoretisch auftreten können. Allerdings können diese einzelnen Antennendiagramme nicht alle zur selben Zeit gesendet werden.

Im Beispiel von Abbildung 7 sind die Ausprägungen einzelner Beams im umhüllenden Antennendiagramm gut erkennbar. Dies ist eine Folge davon, dass diese Antenne vordefinierte Antennendiagramme verwendet. Es gibt jedoch auch adaptive Antennen, die das Antennendiagramm laufend berechnen und anpassen, um die aktiven Mobilgeräte in der Funkzelle möglichst optimal zu versorgen. Einbezogen werden neben der Position der Endgeräte und deren Qualitätsanforderungen an die Funkverbindung insbesondere die vorhandenen Reflexionen und Abschattungen sowie weitere Randbedingungen wie z. B. die Topographie. Damit nehmen die konkret angewendeten Beamformen bzw. Antennendiagramme vielfältige Konturen an, bleiben jedoch immer innerhalb des umhüllenden Antennendiagramms. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt.

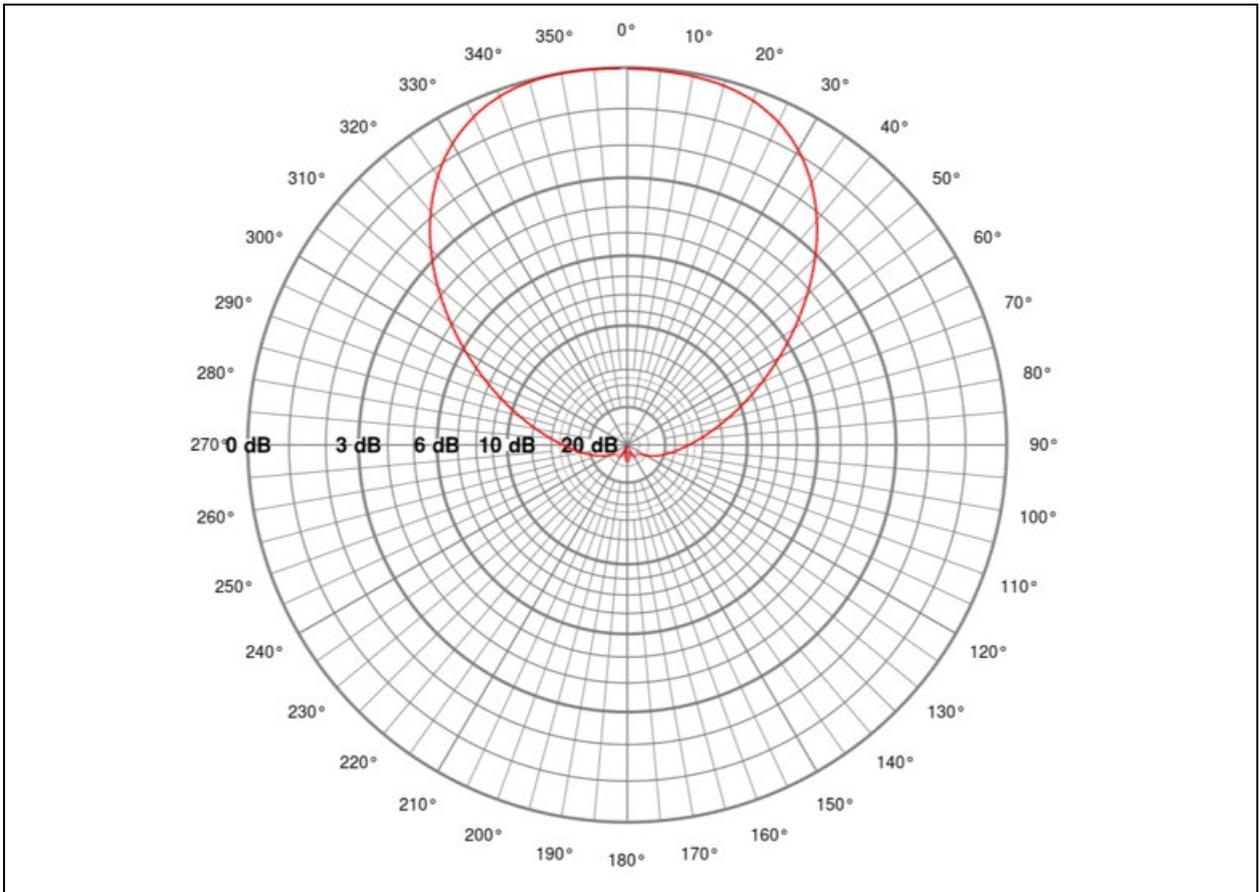


Abbildung 8: Beispiel eines umhüllenden horizontalen Antennendiagramms einer Huawei-Antenne (AAU5313), die mit einer Frequenz von 3.6 GHz bis 3.8 GHz sendet und bei welcher die einzelnen Antennendiagramme vielfältige Konturen annehmen können. Entsprechend sind in der Umhüllenden nicht mehr ausgeprägte Beams erkennbar. Die verschiedenen Einzel-Antennendiagramme bleiben jedoch immer innerhalb der Umhüllenden.

#### 5.4 Berücksichtigung umhüllender Antennendiagramme bei der Prognose der Strahlung adaptiver Antennen gemäss Vollzugsempfehlung zur NISV

Wie erwähnt basieren die rechnerischen Prognosen für adaptiv betriebene Antennen im Rahmen der Bewilligung auf dem umhüllenden Antennendiagramm – dies sowohl beim vertikalen als auch beim horizontalen Antennendiagramm (vgl. Abbildung 9).

Da die unterschiedlichen Antennendiagramme, die dem umhüllenden Diagramm zugrunde liegen, aber nicht alle gleichzeitig auftreten können, überschätzen Berechnungen basierend auf den umhüllenden Antennendiagrammen die in der Realität auftretende Strahlung deutlich. Mit diesem bisher angewendeten «worst-case»-Szenario werden adaptive Antennen folglich strenger beurteilt als konventionelle Antennen.

Damit adaptive Antennen gegenüber konventionellen Antennen nicht benachteiligt werden, hat der Bundesrat in der Revision der NISV 2019 festgelegt, dass die Variabilität der Senderichtungen und der Antennendiagramme bei adaptiven Antennen im massgebenden Betriebszustand zu berücksichtigen ist (Anh. 1 Ziff. 63 NISV). Dies erfolgt gemäss dem Nachtrag zur Vollzugshilfe zur NISV für Mobilfunkseideanlagen betreffend adaptive Antennen vom 23.2.2021, indem auf die maximale Sendeleistung ein Korrekturfaktor angewendet wird. Dieser Faktor ist abgestuft – je nach Anzahl Sub-Arrays (vgl. Kap. 7). Der Korrekturfaktor ist aus den in Kapitel 6 vorgestellten Studien und Messungen abgeleitet.

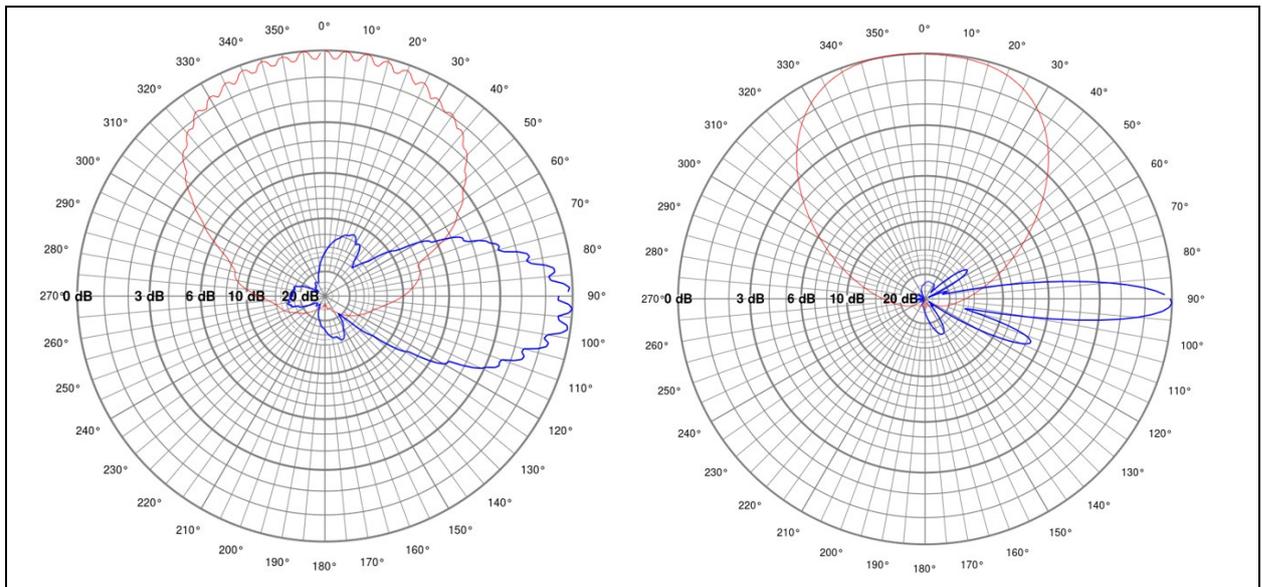


Abbildung 9: Beispiele von umhüllenden vertikalen (in Blau) und horizontalen (in Rot) Antennendiagrammen, wie sie für die rechnerische Prognosen im Rahmen der Bewilligungen verwendet werden. Links ist das Beispiel einer Ericsson-Antenne (AIR6488) und rechts einer Huawei-Antenne (AAU5313) dargestellt. Die umhüllenden Antennendiagramme schliessen alle theoretisch möglichen Einzel-Antennendiagramme ein. Letztere können allerdings nicht alle zur selben Zeit auftreten. Bei den umhüllenden Antennendiagrammen ist berücksichtigt, dass Beams in Richtungen, die stark von der Hauptstrahlrichtung abweichen, weniger stark gebündelt sind und einen kleineren Antennengewinn aufweisen.

## 5.5 Verwendung der Antennendiagramme adaptiver Antennen bei der Abnahmemessung

Ergeben die rechnerischen Prognosen, dass der Anlagegrenzwert zu mehr als 80 % ausgeschöpft ist, ordnen die Behörden in der Regel eine Abnahmemessung nach Inbetriebnahme der Anlage an. Mobilfunkanlagen müssen den Anlagegrenzwert der NISV, wie bereits erwähnt, bei maximalem Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung einhalten. Dieser sog. massgebende Betriebszustand tritt in der Realität nur selten auf. Es ist auch nicht ohne weiteres möglich, diesen Betriebszustand während der Zeit der Messung gezielt herzustellen. In der Regel wird eine Abnahmemessung daher beim realen Betrieb der Anlage durchgeführt. Aufgrund ihrer periodischen Abstrahlung und konstanten Leistung eignen sich die Signalisierungskanäle am besten für diese Messung. Das Messergebnis wird anschliessend auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet (sog. Beurteilungswert), um zu beurteilen, ob der Anlagegrenzwert eingehalten ist.

Grundsätzlich ist diese Methode auch für adaptive Antennen anwendbar. Anders als bei 4G, wo Signalisierungs- und Verkehrskanäle mit demselben Antennendiagramm abgestrahlt werden, können diese bei 5G jedoch mit verschiedenen Diagrammen ausgesendet werden. Die Antennendiagramme der Verkehrskanäle sind im vorangehenden Kapitel 5.3 beschrieben. Die Signalisierungskanäle ihrerseits können bei 5G über einen bis acht Beams bzw. über ein bis acht Antennendiagramme gesendet werden (vgl. Abbildung 10). Werden mehrere Beams abgestrahlt, so werden diese nicht gleichzeitig, sondern nacheinander gesendet.

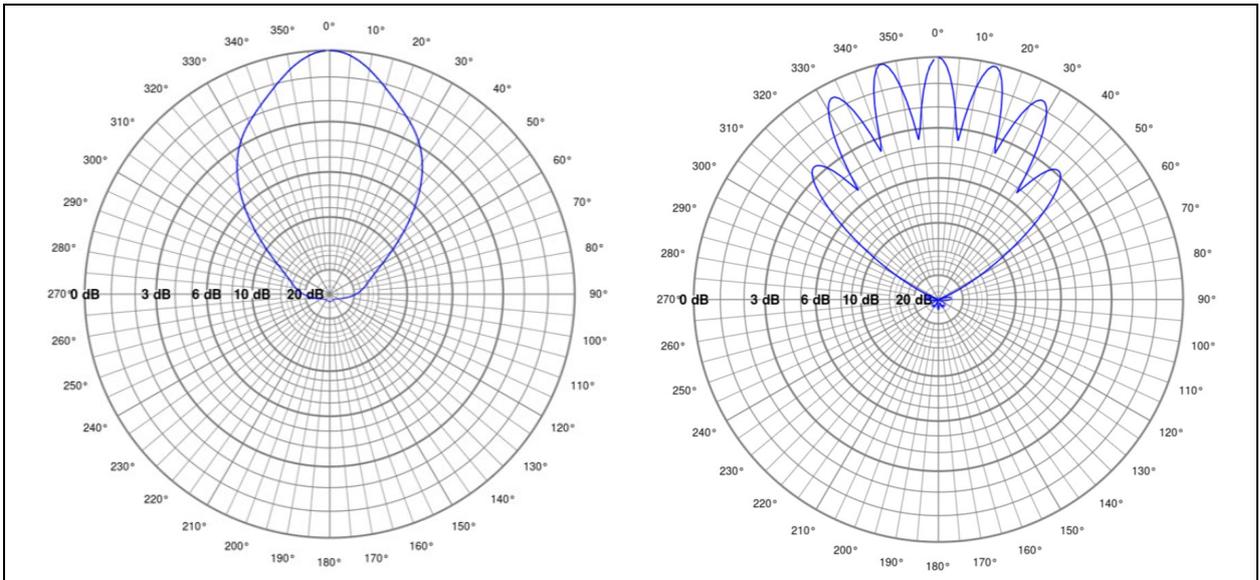


Abbildung 10: Zwei Beispiele für Antennendiagramme der Signalisierungskanäle von adaptiven 5G-Antennen. Die Ericsson-Antenne (AIR6488) im Bild links verwendet nur ein Antennendiagramm für die Signalisierung, die Huawei-Antenne (AAU5313) im Bild rechts verwendet hingegen 7 Beams. Dargestellt ist das umhüllende Antennendiagramm, welches alle 7 Beams beinhaltet. Die einzelnen Beams werden jedoch nicht gleichzeitig, sondern sequentiell ausgesendet.

Aufgrund der unterschiedlichen Antennendiagramme der Signalisierungs- und Verkehrskanäle (vgl. Abbildung 11) ist der Hochrechnungsfaktor bei adaptiven Antennen im Gegensatz zu 4G nicht mehr für alle Senderichtungen konstant. Im technischen Bericht «[Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz](#)» vom 18. Februar 2020 und im [Nachtrag vom 15. Juni 2020](#) hat das METAS beschrieben, wie bei unterschiedlichen Antennendiagrammen auf den Beurteilungswert hochgerechnet werden kann. Informationen dazu finden sich ebenfalls in den «[Erläuterungen zur Messmethode für adaptive Antennen](#)» des BAFU vom 30. Juni 2020.

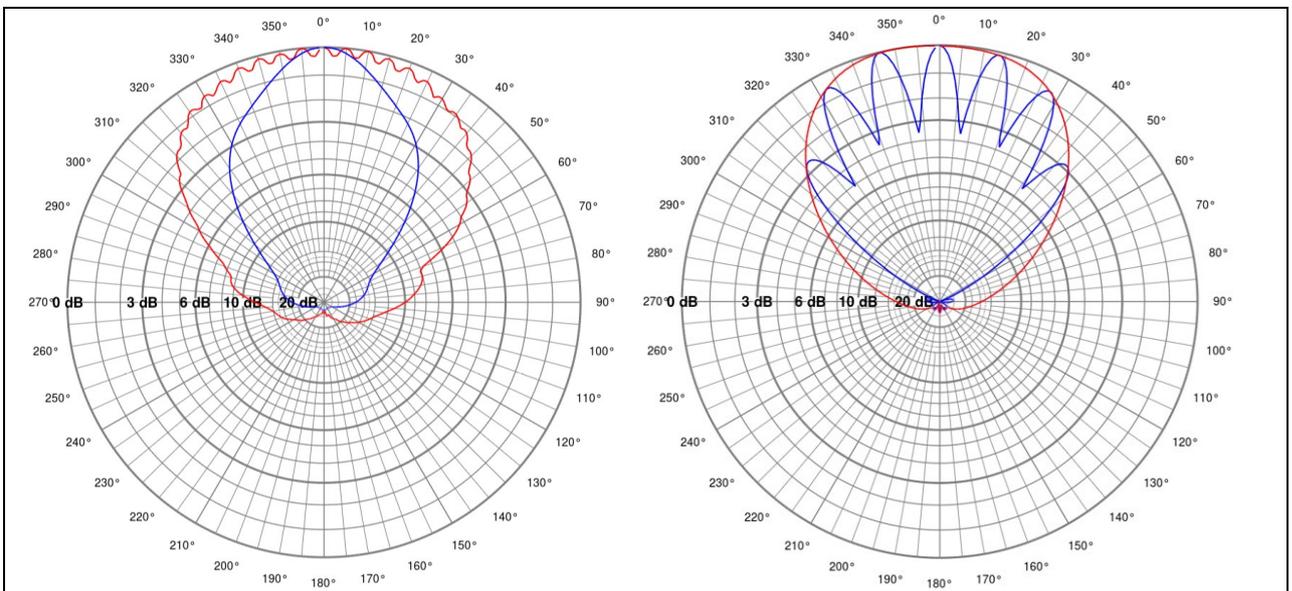


Abbildung 11: Umhüllende Antennendiagramme für die Verkehrskanäle (in Rot) und die Signalisierungskanäle (in Blau) einer adaptiven Ericsson-Antenne (AIR6488) links und einer adaptiven Huawei-Antenne (AAU5313) rechts. Die Diagramme der Verkehrs- und der Signalisierungskanäle sind beide auf 0 dB normiert, die höheren Antennengewinne der Verkehrskanäle sind also nicht abgebildet.

## 6 Exposition durch adaptive Antennen

Aufgrund der Tatsache, dass adaptive Antennen das Signal tendenziell in die Richtung der Nutzerin oder des Nutzers bzw. des Mobilfunkgerätes fokussieren und es in andere Richtungen reduzieren, ergibt sich eine andere Verteilung der elektrischen Feldstärke im Raum als bei konventionellen Antennen. Da adaptive Antennen noch nicht lange eingesetzt werden, existieren allerdings erst wenige Publikationen dazu, wie die konkreten Verteilungen aussehen. Solche Informationen sind wesentlich, um die Variabilität der Senderichtungen und Antennendiagramme bei der Beurteilung gemäss NISV sachgerecht einbeziehen zu können.

Die Studien befassen sich mit Antennen-Arrays verschiedener Grösse resp. Antennen-Arrays mit unterschiedlicher Anzahl Antennenelemente, die immer quadratisch angeordnet sind (z. B. 4×4-, 8×8-Array etc.). Die statistischen Aussagen der Studien ergeben sich dann, wenn sich diese Antennenelemente separat ansteuern lassen. Ihre Anzahl entspricht also der Anzahl von Sub-Arrays, wie sie in Kapitel 4.1 definiert wurden.

Nachfolgend werden einige Erkenntnisse aus vorhandenen Studien zusammengefasst.

### 6.1 Simulationsstudien und theoretische Betrachtungen

Erste Simulationsstudien von Antennenherstellern erfolgten in den Jahren 2017 (Thors et al.) und 2018 (Baracca et al.). Die Studie von **Thors et al.**<sup>1</sup> untersuchte für eine 8×8-Array-Antenne, welche realistischen maximalen Sendeleistungen in verschiedenen Versorgungsszenarien auftreten. Als realistische Maximalleistung wurde dabei – gestützt auf Normen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission IEC<sup>2</sup> und der Internationalen Telekommunikationsunion (ITU)<sup>3</sup> – das 95. Perzentil aller möglichen Sendeleistungen herangezogen. Oder anders ausgedrückt: Als realistische Maximalleistung gilt eine Sendeleistung, die in 95 % der untersuchten Fälle nicht überschritten wird. Untersucht wurden die über 6 Minuten gemittelten Sendeleistungen bei der Versorgung eines städtischen und eines ländlichen Gebietes, je einmal mit einer Gleichverteilung der Nutzenden und einmal mit einer erhöhten Nutzungsdichte im Zentrum. Es flossen auch Parameter wie die Nutzungsdauer, verschiedene Netzauslastungen und der TDD-Betrieb in die Simulationen ein. Für das Beamforming wurden vereinfachte Annahmen getroffen. Die Ergebnisse zeigten, dass die realistischen Maximalleistungen je nach Szenario zwischen 7 % (0.07 bzw. -11.5 dB) und 22 % (0.22 bzw. -6.5 dB) der theoretisch möglichen Maxmalleistung betragen. Der höchste Wert von 22 % trat für ein städtisches Gebiet und einer Netzauslastung von ca. 95 % auf.

Der Studie von **Baracca et al.**<sup>4</sup> wurde eine Anordnung von 7 Basisstationen zugrunde gelegt, die mit 8×8-Array-Antennen je drei Funkzellen versorgen. Mit unterschiedlichen Höhen und Distanzen zwischen den Antennen simulierte die Studie einmal ein städtisches Netz mit grossen Funkzellen («urban macro UMa») und einmal eines mit kleinen Funkzellen («urban micro UMi»). Dabei wurde die Annahme getroffen, dass sich 80 % der Nutzerinnen und Nutzer innerhalb und 20 % ausserhalb der Gebäude aufhalten. Für verschiedene Nutzungskonfigurationen (1 bis 5 gleichzeitig aktive Nutzende, 1 bis 60 Sekunden Verbindungsdauer) wurden die (im FDD-Betrieb) notwendigen Sicherheitsabstände berechnet, um die Grenzwerte der Internationalen Strahlenschutzkommission ICNIRP gemittelt über 6 Minuten einhalten zu können. Aus den Berechnungen liessen sich die auftretenden Sendeleistungen ableiten und mit einer maximal möglichen Sendeleistung vergleichen. Als Maximalleistung galt diejenige Sendeleistung, die auftritt, wenn nur ein einzelner Nutzer pro Funkzelle während 6 Minuten versorgt wird (d. h. es ist nur ein Beam vorhanden, der – mit maximalem Antennengewinn – die Person während 6 Minuten bestrahlt). Denn auch in dieser Situation müssen die Grenzwerte der ICNIRP eingehalten sein. Die Berechnungen zeigten, dass eine höhere Anzahl an Nutzenden pro Zelle und/oder eine kleinere Verbindungsdauer zu einer geringeren abgestrahlten Leistung pro Nutzer führt. In 95 % der Fälle wurden 22 % (Szenario UMi) und 26 % (Szenario UMa) der Maximalleistung nicht überschritten. In Bezug auf die Maximalleistung

<sup>1</sup> Thors et al., Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO, IEEE Access (Vol. 5), 19711–19719, 2017

<sup>2</sup> IEC 62232:2017: Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 516p., 2017

<sup>3</sup> ITU-T K.100: Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service, International Telecommunication Union ITU, 2019

<sup>4</sup> Baracca et al., A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems, International Workshop on Smart Antennas (WSA), Bochum (Germany), 2018

betragen die Reduktionen somit 0.22 bzw. -6.6 dB und 0.26 bzw. -5.9 dB. In 99 % der Fälle wurden 27 % (0.27 bzw. -5.7 dB, Szenario UMi) und 32 % (0.32 bzw. -5 dB, Szenario UMa) der Maximalleistung nicht überschritten.

Eine von einem Schweizer Mobilfunkbetreiber bei der ETH Lausanne (EPFL) in Auftrag gegebene Studie (**Tingyong & Skrivervik**<sup>5</sup>), konnte 2020 die Ergebnisse von Thors et al. und Baracca et al. bestätigen. Mittels einer sog. Monte-Carlo-Simulation wurden die Berechnungsansätze verfeinert und ein realistischeres Anwendungsszenario für eine genauere Expositionsabschätzung modelliert. Es flossen Parameter wie Nutzungsszenarien, Nutzerverteilung, Nutzungsdauer, Anzahl gleichzeitig aktiver Nutzender, Mittelungszeit, FDD/TDD-Betriebsart und die Ausprägung des Antennendiagramms einer 8×8-Array-Antenne in die Berechnungen ein. Für das Beispielszenario einer Gleichverteilung der Nutzenden, einer Nutzungsdauer von einer Sekunde und FDD-Betrieb berechneten Tingyong & Skrivervik eine realistische Maximalleistung von 14 % (95. Perzentil bezogen auf die theoretisch mögliche Maximalleistung), während Thors et al. 13 % und Baracca et al. 14 % bis 16 % ermittelt hatten. Für alle Szenarien ermittelte die EPFL-Studie Reduktionsfaktoren zwischen 0.01 (-20 dB) und 0.3 (-5.2 dB).

Basierend auf einem bestehenden LTE-Netz in Gent (Belgien) haben **Matalatala et al.**<sup>6</sup> 2019 untersucht, wie 5G-Netze mit adaptiven Antennen («massive MIMO») bezüglich Standort und Belegung optimiert werden können, damit gleichzeitig der Energiekonsum sowie die Exposition durch die Basisstation und durch das eigene Mobilgerät minimiert werden. Hierzu wurde das Studiengebiet mit einem sog. Multi-Zellen Netzwerk ausgelegt. Jede Zelle enthielt dabei eine Basisstationsantenne mit mehreren Antennenelementen, wobei die Anzahl Antennenelemente je nach Szenario variierte. Für den Betrieb des Netzes wurden realistische Kommunikationsszenarien simuliert. Die Studie ergab, dass bei einer Erhöhung der verwendeten Anzahl Antennenelemente pro Basisstation von 16 auf 256 die Anzahl der nötigen Basisstationen für ein Netzwerk mit adaptiven Antennen abnimmt. Dies wiederum führt zu einer Abnahme der durch die Basisstationen verursachten elektrischen Feldstärke um 12 % und zu einer Zunahme der Exposition durch das eigene Mobiltelefon um +70 %, wobei beide Expositionen mit zunehmender Anzahl gleichzeitiger Benutzer ansteigen. Für das betrachtete Gebiet ergab sich ein bezüglich Energieverbrauch und Exposition optimales Netz aus 37 Basisstationen mit je 64 Antennenelementen. Zudem zeigte sich, dass die Exposition durch die Basisstationen bei adaptiven Antennen (für alle untersuchten unterschiedlichen Anzahlen an Antennenelementen, 95. Perzentil) 5-mal tiefer (-14 dB) war als beim 4G-Referenzszenario.

Aus der gleichen Forschungsgruppe der Universität Gent (Belgien) stammt eine Studie von **Shikhantsov et al.**<sup>7</sup> von 2020, welche eine Abschätzung realistischer maximaler Sendeleistungen von 5G-Massive-MIMO-Antennen in einer städtischen Umgebung basierend auf sog. Ray-Tracing vornahm. Die Ray-Tracing-Methode diente dazu, die Ausbreitung der Mobilfunkstrahlung in einem städtischen Makrozellen-Modell im Freien zu simulieren. Für verschiedene Szenarien mit adaptiven Antennen bestehend aus 64 Antennenelementen berechnete die Studie Werte (95. Perzentil) von rund -10 dB (0.1) bis -3 dB (0.5) bezogen auf das theoretische Maximum und für ein realistisches Szenario mit einer Nutzungsdauer von 10 Sekunden Reduktionen von -7 dB (0.2) bis -6 dB (0.25).

Neben Simulationsstudien gibt es auch theoretische Überlegungen dazu, welche Sendeleistungen bei adaptiven Antennen auftreten können. Die französische **Agence Nationale des Fréquences ANFR**<sup>8</sup> hat gestützt auf Annahmen zur übertragenen Datenmenge und Datenrate, zur Anzahl versorgten Personen pro Antennenstandort und zur Anzahl Beams abgeleitet, dass eine adaptive Antenne während 6 Minuten rund 15 Sekunden sendet. Dies entspricht 4 % der Zeit, weshalb die ANFR für Expositionsrechnungen einen Reduktionsfaktor von 0.04 bzw. -13.5 dB auf die Sendeleistung anwendet. Eine solche Mittelung nur über die Zeit ist nicht mit dem massgebenden Betriebszustand der NISV vereinbar. Dieser

<sup>5</sup> Tingyong & Skrivervik (2020): EMF Exposure Assessment Based on Monte Carlo Method, EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), 45p.

<sup>6</sup> Matalatala et al., Multi-Objective Optimization of Massive MIMO 5G Wireless Networks towards Power Consumption, Uplink and Downlink Exposure, Appl. Sci. 2019, 9, 4974

<sup>7</sup> Shikhantsov et al (2020): Ray-Tracing-based numerical assessment of the spatiotemporal duty cycle of 5G Massive MIMO in an outdoor urban environment, Appl. Sci. 2020, 10, 7631; doi:10.3390/app10217631

<sup>8</sup> ANFR (2020): Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G - Volet 2: premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz, Agence Nationale des Fréquences ANFR, 34p., 2020.

basiert grundsätzlich auf dem maximalen Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung, bei adaptiven Antennen ist gemäss Anhang 1 Ziffer 63 zudem deren räumliche Variabilität zu berücksichtigen.

Die **IEC** schlägt in einem technischen Report (IEC TR 62669:2019<sup>9</sup>) basierend auf den Studien von Thors et al., Baracca et al. und Auswertungen der Sendeleistungen von existierenden adaptiven Antennen, die für LTE eingesetzt wurden, einen Reduktionsfaktor von 0.25 bzw. -6 dB bezogen auf die maximal mögliche Sendeleistung vor, wenn Expositionsberechnungen zu adaptiven Antennen im Hinblick auf die ICNIRP-Grenzwerte vorgenommen werden.

## 6.2 Messstudien

Im Rahmen einer Studie an einer LTE-Basisstation mit adaptiven Antennen in einem urbanen Gebiet führten **Werner et al.**<sup>10</sup> (2019) Messungen durch. Es handelte sich um eine 8×8-Array-Antenne im TDD-Betrieb und einer Eingangsleistung von 120 W. Die Messergebnisse wurden so skaliert, dass sie der Exposition bei einer Auslastung der Basisstation von 100 % entsprachen und mit den ICNIRP-Grenzwerten verglichen. Die auf maximale Auslastung extrapolierten Messwerte betragen 7.3 % bis 16.1 % des ICNIRP-Grenzwertes, während die rechnerische Prognose unter worst case-Annahmen (gleichzeitig maximale Sendeleistung in alle Richtungen) eine Exposition von 79.3 % des ICNIRP-Grenzwertes ergab. Dies entspricht einem Reduktionsfaktor von 0.20 (-6.9 dB) bis 0.09 (-10.4 dB).

Eine erste Untersuchung zu Basisstationen in einem kommerziellen 5G-Netz führten **Colombi et al.**<sup>11</sup> 2020 durch. Der Betreiber des Netzes gehörte zu den ersten in Australien, der 5G einführte, und im Januar 2020 waren mehr als 100'000 5G-fähige Mobilegeräte an sein Netzwerk angeschlossen. Die Studie erfasste während 24 Stunden Betriebsdaten von 25 Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen – insbesondere die Sendeleistungen und Referenzdaten, welche es ermöglichten, das für die jeweilige Verbindung abgestrahlte Antennendiagramm zu ermitteln. Anhand dieser Daten wurde für jede Basisstation die räumliche Verteilung der gemittelten ERP berechnet und mit der theoretischen maximalen ERP der Antenne verglichen. Der maximale ERP-Wert über alle Basisstation innerhalb der 24 Stunden war um 8.8 dB kleiner als der theoretische Höchstwert. Zieht man für diesen Vergleich die registrierten ERP-Werte der 25 Basisstationen heran, so ergibt sich über die gesamte Dauer des Experiments eine Reduktion des theoretischen ERP-Höchstwerts von -20.2 dB (95. Perzentil) bzw. -18 dB (99. Perzentil). Diese Studie untersuchte ausserdem den Einfluss der Anzahl gleichzeitig aktiver Nutzer auf die Exposition. Dabei wurden die über 6 Minuten gemittelten ERP-Werte für die jeweilige Basisstation nach Anzahl aktiver Nutzer sortiert. Die Ergebnisse zeigen mit steigender Anzahl Nutzer eine Reduktion des höchstregistrierten ERP-Werts aller Basisstationen. Die Reduktion gegenüber des theoretischen maximalen ERP-Werts entspricht -8.8 dB bei 15 aktiven Nutzern bzw. -22 dB bei 190 aktiven Nutzern.

## 6.3 Messungen und Simulationen BAKOM

Im Sommer 2020 führte das BAKOM Testmessungen an zwei bewilligten adaptiven Antennen von zwei verschiedenen Betreibern durch. Die beiden 8×8-Array-Antennen sendeten im 3.5-GHz-Band. Das BAKOM baute eine Versuchsanordnung mit jeweils zwei Mobiltelefonen auf und mass die Exposition unter verschiedenen Bedingungen («nur Signalisation», «beide Handys am gleichen Ort: Exposition im Datenbeam und Exposition neben Datenbeam» sowie «die Handys an zwei verschiedenen Orten: Exposition in je einem von zwei Datenbeams»). Zusätzlich wurde das Funktionieren der automatischen Leistungsbegrenzung (vgl. Kap. 7) auf den Antennen getestet. Im Anschluss an die Messungen bildete das BAKOM die Messsituation mit einer Berechnungssoftware nach, berechnete die Expositionen für die verschiedenen getesteten Betriebsbedingungen und verglich diese mit den Messergebnissen. In einem zweiten Schritt wurde die Exposition, die im Messgebiet durch eine adaptive Antenne (mit bis zu 13 Beams) entsteht, mit der Exposition durch eine konventionelle Antenne rechnerisch verglichen. Diese

<sup>9</sup> IEC TR 62669:2019: Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radio-communication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 124p., 2019

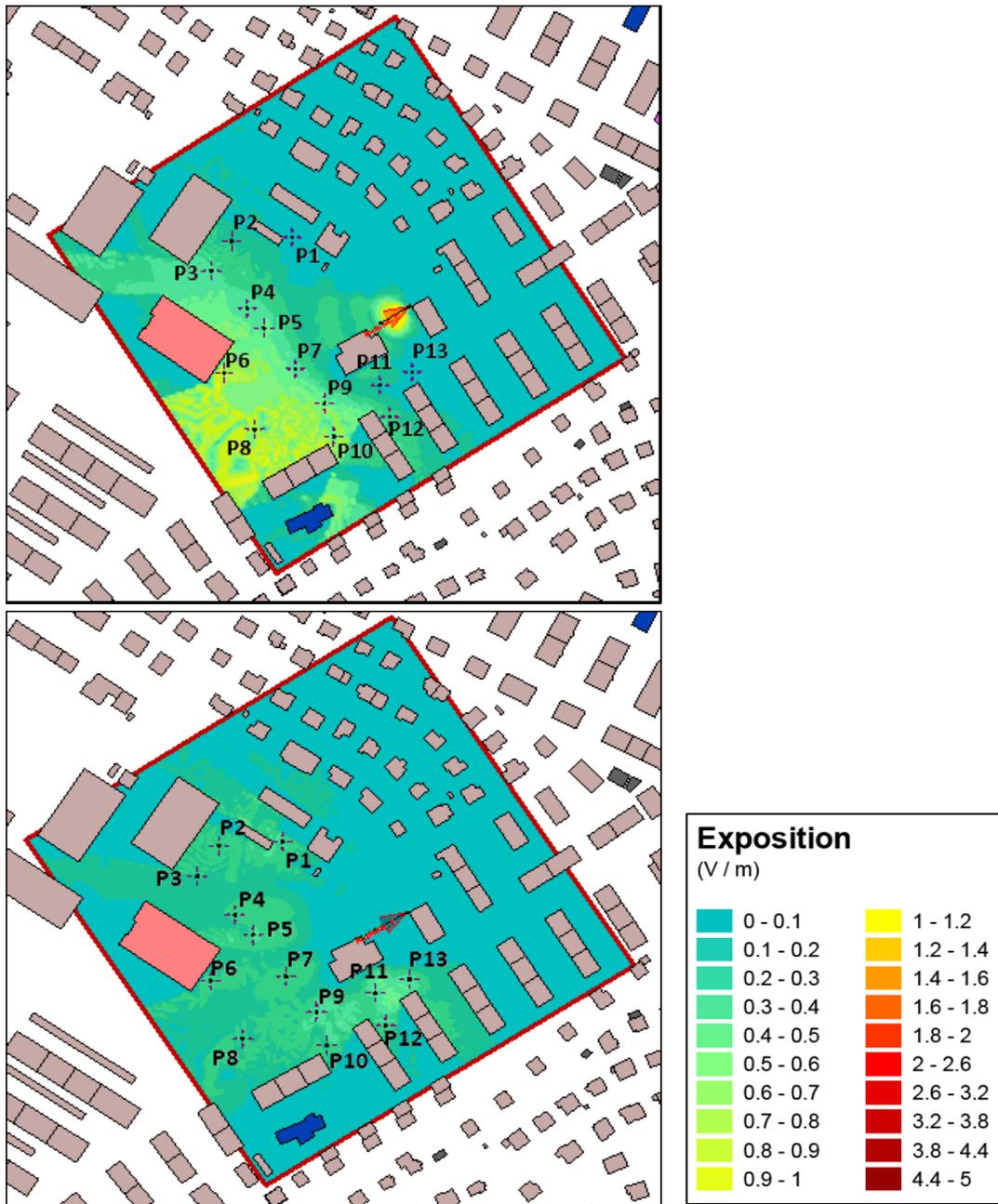
<sup>10</sup> Werner et al. (2019): A Comparison between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna. IEEE Access, Volume 7, 170682-170689, 2019

<sup>11</sup> Colombi et al. (2020): Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network. Appl. Sci. 2020, 10, 5280

Arbeiten und die Resultate sind im Bericht «Testkonzession und Messung adaptive Antennen» des BAKOM ausführlich beschrieben. Hier folgt ein Auszug von wichtigen Ergebnissen.

Insgesamt bestätigten die Resultate die theoretischen Grundlagen betreffend Funktechnologie und Feldausbreitung:

- Die Exposition bei adaptiven Antennen hängt wesentlich von der Position der Endgeräte ab, die in Gebrauch sind.
- Der Hauptanteil der elektrischen Feldstärke an einem Punkt in der Funkzelle wird bei adaptiven Antennen jeweils klar vom spezifischen Beam verursacht, der in diese Richtung ausgestrahlt wird. Von den Beams in andere Richtungen werden nur sehr kleine Anteile beigetragen. Bei den Testmessungen wurde das Nutzsignal ausserhalb eines Beams mit einer mindestens 3-mal (10 dB) kleineren Feldstärke empfangen als innerhalb des Beams (durchschnittlich sogar 12-mal kleiner).
- Die Messungen haben zudem gezeigt, dass sich die gesamte Sendeleistung einer Antenne bei mehreren gleichzeitigen Beams auf die aktuell vorhandenen Beams aufteilt.
- Auch konnten die Messungen das Funktionieren der automatischen Leistungsbegrenzung bestätigen.
- Die Simulationen (vgl. auch Abbildung 12) haben ergeben, dass die Feldstärke bei adaptiven Antennen vor der Antenne gleichmässiger verteilt ist als bei konventionellen Antennen.
- Für die untersuchte Situation war die elektrische Feldstärke in Hauptstrahlrichtung vor der Antenne bei der adaptiven Antenne bis zu einem Faktor 3 kleiner als bei der konventionellen Antenne. Während bei letzterer der Hauptteil des Signals immer in diese Richtung gesendet wird, unabhängig davon, woher in der Funkzelle es angefordert wird, ist dies bei adaptiven Antennen nur dann der Fall, wenn die Daten auch tatsächlich dort benötigt werden.
- Die Übertragungseffizienz seitwärts ist bei adaptiven Antennen viel besser, da sie die Strahlung stärker bündeln und gezielter aussenden können. Der Vergleich mit der herkömmlichen Antenne zeigt bis zu einem Faktor 6 mehr elektrische Feldstärke, womit die Daten effizienter und in kürzerer Zeit übertragen werden.
- Die Feldstärke durch den Signalisierungskanal ist bei einer adaptiven Antenne etwa um den Faktor 3 tiefer als bei der herkömmlichen Antenne.



Punkt	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
<b>E (V/m) Konventionelle Antenne</b>	0.04	0.13	0.32	0.35	0.44	0.61	0.36	0.51	0.54	0.35	0.10	0.27	0.06
<b>E (V/m) Adaptive Antenne</b>	0.20	0.15	0.17	0.21	0.29	0.20	0.28	0.16	0.37	0.12	0.34	0.28	0.36
<b>Verhältnis konventionell / adaptiv</b>	0.20	0.87	1.88	1.67	1.52	3.05	1.29	3.19	1.46	2.92	0.29	0.96	0.17

Abbildung 12: Dargestellt ist die elektrische Feldstärke in Volt pro Meter, die durch eine konventionelle Antenne mit einer Sendeleistung von 200 W ERP (Bild oben) und durch eine adaptive Antenne mit 13 Beams (Bild unten) erzeugt wird. Bei der adaptiven Antenne wurde die Sendeleistung auf die 13 Beams aufgeteilt und beträgt pro Beam 15.4 W ERP. Für 13 Punkte innerhalb des Messfeldes sind die berechneten Feldstärkewerte aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Feldstärke in den Punkten 3 – 10, die vor der Antenne liegen, bei der konventionellen Antenne grösser ist als bei der adaptiven. Seitlich der Antenne (Punkte 1, 2, 11 – 13) ist es gerade umgekehrt, da adaptive Antennen seitwärts besser abstrahlen können. Die über die Fläche gemittelte Exposition beträgt bei der konventionellen Antenne 0.15 V/m und bei der Antenne mit 13 Beams 0.074 V/m (Quelle: BAKOM).

## 6.4 Fazit

Die Ergebnisse der beschriebenen Simulations- und Messstudien sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die über 6 Minuten gemittelten Sendeleistungen von adaptiven Antennen (mit unterschiedlicher Anzahl Antennenelemente) liegen je nach Szenario in einem Bereich zwischen rund 1 % (0.01 bzw. -20 dB) und 50 % (0.5 bzw. -3 dB) der theoretischen Maximalleistung. Die Spannweite der Studienresultate ist sehr gross. Bezüglich 8x8-Array-Antennen liegen die ermittelten Sendeleistungen meist zwischen rund 10 % (0.1 bzw. -10 dB) und 32 % (0.32 bzw. -5 dB) der theoretischen Maximalleistung.

In den Studien zeigte sich auch, dass der Unterschied zwischen der ermittelten und der theoretisch maximalen Sendeleistung von der Antennengrösse abhängt, also von der Anzahl unabhängig ansteuerbarer Antenneneinheiten (Arrays bzw. Sub-Arrays). Ausgehend von Studien, welche verschiedene Antennengrössen untersuchten, wurde ein abgestufter Korrekturfaktor abgeleitet, der auf die maximal mögliche Sendeleistung von adaptiven Antennen angewendet werden kann (vgl. Kap. 7). Der Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und Studienergebnissen ist in Abbildung 13 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht von Studien, welche im Hinblick auf die Abschätzung von Expositionen durch adaptive Antennen Simulationen und Messungen insbesondere zu erwarteten Sendeleistungen vornahmen.

Studie	Methode / Bemerkungen	Unterschied realistische vs. theoretische Maximalleistung		Andere Reduktionen
		95. Perzentil	Maximum bzw. 99. Perzentil	
Thors et al. (2017)	Statistische Modellierung, 8x8-Array und weitere Array-Grössen, versch. Versorgungsszenarien (ländlich, städtisch)	0.07 bis 0.22 -11.5 dB bis -6.5 dB		
Baracca et al. (2018)	Simulation / Statistik, 8x8-Array, 2 städtische Versorgungsszenarien	0.22 bis 0.26 -6.6 dB bis -5.9 dB	99. P: 0.27 bis 0.32 -5.7 dB bis -5 dB	
Tingyong & Skrivervik (EPFL, 2020)	Monte-Carlo-Simulation versch. Nutzungsszenarien, Nutzerverteilungen, Anzahl Nutzer und Nutzungsdauer, 8x8-Array	0.01 bis 0.3 -20 dB bis -5.2 dB		
Matalatala et al (2019)	Simulation: Optimierung eines Mobilfunknetzes mit adaptiven Antennen (unterschiedlicher Anzahl Antennenelemente) bzgl. Exposition und Energieverbrauch			Exposition 5G zu 4G: -14 dB
Shikhantsov et al. (2020)	Simulation städtische Makrozellerversorgung, Szenarien für mMIMO-Antennen mit unterschiedlicher Zahl an Antennenelementen. Realistisches Szenario: 64 Antennenelemente	Alle Szenarien: 0.1 bis 0.5 -10 dB bis -3 dB Realistisch: 0.2 bis 0.25 -7 dB bis -6 dB		
ANFR	Ansatz zeitliche Mittelung nicht mit massgebendem Betriebszustand der NISV vereinbar			Zeitl. Mittelung über 6 Min.: -13.5 dB
IEC TR 62669:2019	Auswertung der Studien Thors et al., Baracca et al. und von Messungen zu für LTE eingesetzte adaptive Antennen	0.25 -6 dB		
Werner et al. (2019)	Messung Exposition 8x8-Array (mMIMO) 4G / 2.3 GHz / TDD / skaliert auf 100% Nutzung		0.09 bis 0.20 -10.4 dB bis -6.9 dB	
Colombi et al. (2020)	Messung / Auswertung Betriebsdaten (inkl. Sendeleistung) von 25 kommerziell genutzten mMIMO-5G-Antennen	0.1 -20 dB	99. P.: 0.016 bzw. -18 dB Maximum: 0.03 bis 0.16 -15 dB bis -8 dB	

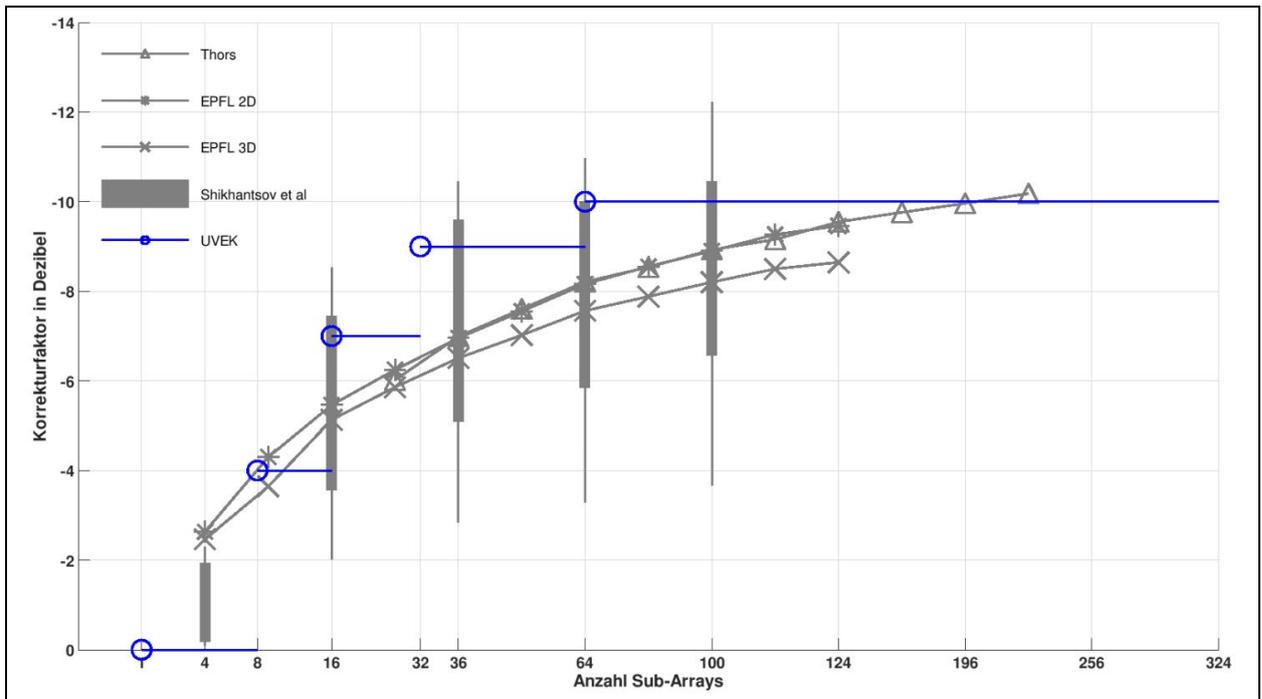


Abbildung 13: Korrekturfaktoren aus den oben genannten Studien, welche unterschiedliche Antennengrößen berücksichtigen in Grau (Thors et al. (2017), Tingyong & Skrivervik (EPFL, 2020) und Shikhantsov et al. (2020)), und daraus abgeleitete Korrekturfaktoren in Blau abhängig von der Antennengröße (Anzahl Sub-Arrays).

## 7 Korrekturfaktor und automatische Leistungsbegrenzung

Der massgebende Betriebszustand, in welchem die Anlagegrenzwerte nach Anhang 1 Ziffer 64 NISV einzuhalten sind, wird bei adaptiven Antennen gemäss dem Nachtrag zur Vollzugshilfe zur NISV für Mobilfunksendeanlagen vom 23.2.2021 wie folgt bestimmt:

- Grundlage für den massgebenden Betriebszustand bildet der maximale Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung – ausgedrückt als maximal mögliche Sendeleistung  $ERP_{max, n}$ ;
- um die Variabilität der Senderichtungen und Antennendiagramme bei adaptiven Antennen zu berücksichtigen, wird ein Korrekturfaktor  $K_{AA}$  auf die maximal mögliche Sendeleistung  $ERP_{max, n}$  angewendet. Dieser Korrekturfaktor  $K_{AA}$  ist abhängig von der Antennengröße, ausgedrückt in der Anzahl Sub-Arrays (vgl. Tabelle 3).

Die massgebende Sendeleistung  $ERP_n$  der adaptiven Antenne  $n$  beträgt also:  $ERP_n = ERP_{max, n} \times K_{AA}$ . Diese massgebende Sendeleistung  $ERP_n$  wird in das Standortdatenblatt eingetragen und in Kombination mit den umhüllenden Antennendiagrammen zur Berechnung der elektrischen Feldstärke verwendet, um zu prüfen, ob der Anlagegrenzwert an den Orten mit empfindlichen Nutzung eingehalten ist.

Tabelle 3: Korrekturfaktor  $K_{AA}$ . Bei den angegebenen Korrekturfaktoren handelt es sich jeweils um die für die entsprechende Sub-Array-Anzahl maximal zugelassene Korrektur. Je grösser die Korrektur desto kleiner der Zahlenwert für den Faktor. Die in der Tabelle angegebenen Werte entsprechen also der Untergrenze für den Zahlenwert des Korrekturfaktors.

Anzahl Sub-Arrays	Korrekturfaktor $K_{AA}$	Korrekturfaktor in dB
64 und mehr	$\geq 0.10$	$\geq -10$ dB
32 bis 63	$\geq 0.13$	$\geq -9$ dB
16 bis 31	$\geq 0.20$	$\geq -7$ dB
8 bis 15	$\geq 0.40$	$\geq -4$ dB
1 bis 7	1	0 dB

Da es aufgrund dieser Festlegung des massgebenden Betriebszustands im tatsächlichen Betrieb vorkommen kann, dass die massgebende Sendeleistung  $ERP_n$  kurzzeitig überschritten wird (im Maximum bis zur maximal möglichen Sendeleistung  $ERP_{max, n}$ ), darf der Korrekturfaktor nur geltend gemacht werden, wenn die adaptive Antenne mit einer automatischen Leistungsbegrenzung versehen ist.

Bei der automatischen Leistungsbegrenzung handelt es sich um eine Softwareapplikation auf der Antenne. Diese detektiert dauernd die in einen Funksektor abgestrahlte Gesamtleistung der adaptiven Antenne. Wenn kurzzeitige Leistungsspitzen über der im Standortdatenblatt deklarierten Sendeleistung  $ERP_n$  auftreten, wird die Leistung soweit gedrosselt (und damit verbunden die zur Verfügung gestellte Kapazität), dass die über einen Zeitraum von 6 Minuten gemittelte Sendeleistung die deklarierte Sendeleistung nicht überschreitet. Die automatische Leistungsbegrenzung berechnet also dauernd den «laufenden Mittelwert» der Sendeleistung der letzten 6 Minuten. Ist abzusehen, dass dieser laufende Mittelwert die bewilligte Sendeleistung überschreiten könnte, wird die Sendeleistung soweit gedrosselt, dass der Mittelwert sicher unterhalb der genannten Schwelle bleibt.

Die kurzzeitigen Leistungsspitzen können höchstens einen Wert  $ERP_{max, n}$  erreichen, welcher der bewilligten Sendeleistung  $ERP_n$  multipliziert mit dem Reziproken des Korrekturfaktors entspricht. Bei einem Korrekturfaktor von 0.1 kann der Spitzenwert der Sendeleistung höchstens zehnmal höher sein als die deklarierte. Das bedeutet gleichzeitig, dass die für die adaptive Antenne berechnete elektrische Feldstärke kurzfristig höchstens um das 3.2-Fache übertroffen werden kann. Bedenkt man, dass eine Mobilfunksendeanlage mit adaptiven Antennen in den meisten Fällen auch mit konventionellen Antennen ausgerüstet ist, erhöht sich die Feldstärke der gesamten Anlage kurzfristig um einen kleineren Faktor. Wird z. B. ein Ort mit empfindlicher Nutzung je «zur Hälfte» durch konventionelle und adaptive Antennen einer Anlage mit derselben massgebenden Sendeleistung bestrahlt (Annahme: dieselben Distanzen, Richtungs- und Gebäudedämpfungen), dann kann sich die gesamte Feldstärke kurzfristig um das 2.3-Fache über die berechnete Feldstärke erhöhen: Die Sendeleistung der konventionellen Antennen bleibt unverändert, die der adaptiven Antennen kann sich kurzfristig um Faktor 10 erhöhen, was für die gesamte Sendeleistung einen Faktor von 5.5 ergibt. Hier wurde wiederum nicht berücksichtigt, dass selten mehrere adaptive Antennen gleichzeitig mit maximaler Leistung senden.

Die automatische Leistungsbegrenzung muss im Qualitätssicherungssystem der Mobilfunkbetreiber für die Behörde einfach nachvollziehbar abgebildet sein.

## 8 Weiteres

### 8.1 Berücksichtigung des TDD-Betriebs

Die Anlagegrenzwerte, welche Mobilfunkanlagen im massgebenden Betriebszustand einhalten müssen, sind in Anhang 1 Ziffer 64 NISV für den *Effektivwert* der elektrischen Feldstärke festgelegt. Beim Effektivwert handelt es sich – ganz grundsätzlich – um den auf die Leistung bezogenen Mittelwert einer zeitlich veränderlichen Grösse. Für eine Spannung oder Feldstärke müsste dafür also der quadratische Mittelwert herangezogen werden, da die Leistung sich proportional zum Quadrat der Spannung oder Feldstärke verhält. Auf Englisch wird der Effektivwert einer solchen Grösse als «Root Mean Square» bzw. «RMS» bezeichnet. In Abbildung 14 wird der Effektivwert am Beispiel einer physikalischen Grösse dargestellt, die sich sinusförmig über die Zeit verändert.

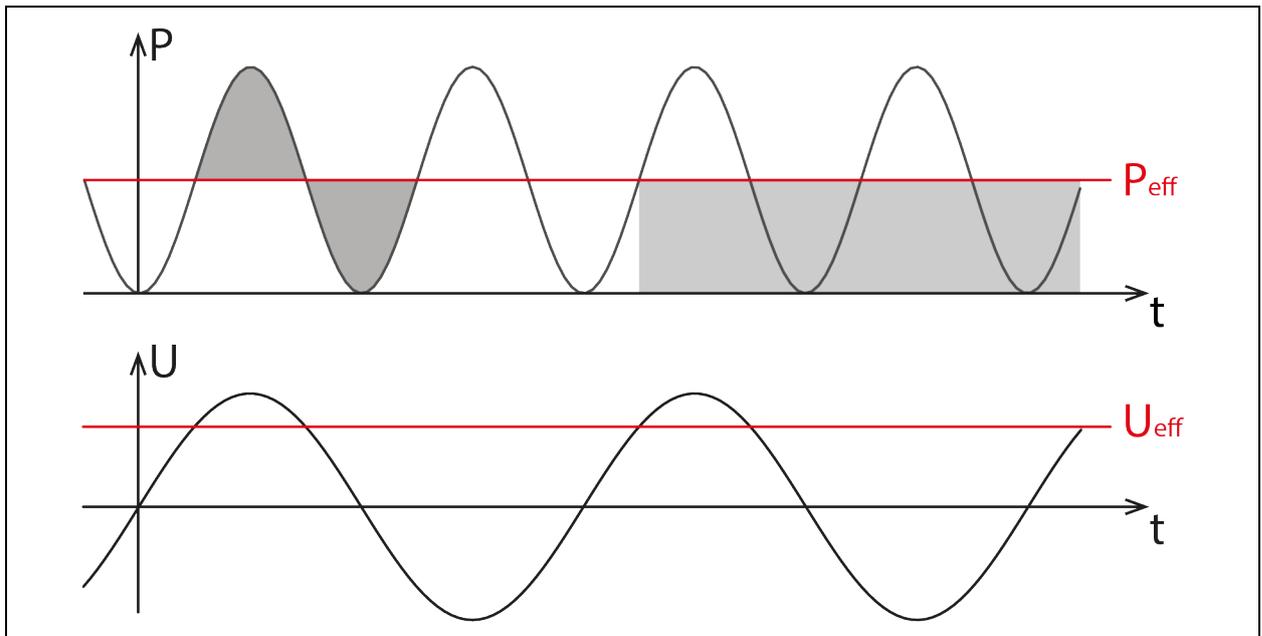


Abbildung 14: Effektivwert einer sich sinusförmig verändernden physikalischen Grösse. Obere Figur: Der Effektivwert für die Leistung lässt sich grafisch veranschaulichen:  $P_{\text{eff}}$  entspricht der halben Amplitude von  $P$ ; Werte oberhalb  $P_{\text{eff}}$  mitteln sich mit Werten unterhalb  $P_{\text{eff}}$ . Untere Figur:  $P_{\text{eff}}$  umgerechnet in eine Spannung  $U$ :  $U_{\text{eff}}$  entspricht  $0.71 (= \sqrt{0.5})$  mal der Amplitude von  $U$  ( $U$  ist proportional zur Wurzel von  $P$ ).

Mit dem Effektivwert der Feldstärke korrespondiert also die über eine bestimmte Zeitperiode gemittelte abgestrahlte Sendeleistung. Der Anlagegrenzwert muss grundsätzlich bei maximaler Sendeleistung eingehalten werden. Da im bisher angewendeten FDD-Betrieb eine Mobilfunkanlage ununterbrochen sendet, wenn sie Signale abstrahlt (z. B. Signalisierungskanal), diese Signale keine eindeutige, sich periodisch wiederholende Struktur (wie z. B. eine Sinus-Form) aufweisen und für den Anlagegrenzwert die maximale Sendeleistung relevant ist, erübrigen sich beim FDD-Betrieb weitere Überlegungen zu der über eine Zeitperiode gemittelten Leistung. Dynamische Leistungsregelungen, die sich aus dem tatsächlichen Betrieb ergeben, dürfen im Hinblick auf den Anlagegrenzwert nicht berücksichtigt werden.

In den Mobilfunkkonzessionen für 3.4 GHz bis 3.8 GHz (und teilweise für 2.6 GHz) ist der TDD-Betrieb vorgeschrieben: Downlink und Uplink erfolgen auf der gleichen Frequenz, aber zu unterschiedlichen Zeiten. Im TDD-Betrieb, wie er derzeit von den Mobilfunkbetreibern für 5G eingesetzt wird, sendet eine Basisstation bei der Übermittlung von Nutzdaten nur noch höchstens 80 % der Zeit innerhalb eines 5G-Zeitschlitzes («slot») von 1 ms (oder 0.5 ms) und 20 % der Zeit innerhalb des Slots sind für die Übermittlung der Daten vom Mobilfunkgerät zur Basisstation reserviert. Dies führt dazu, dass der Effektivwert der elektrischen Feldstärke geringer ausfällt, als wenn die Basisstation die gesamte Zeit senden würde (vgl. Abbildung 15).

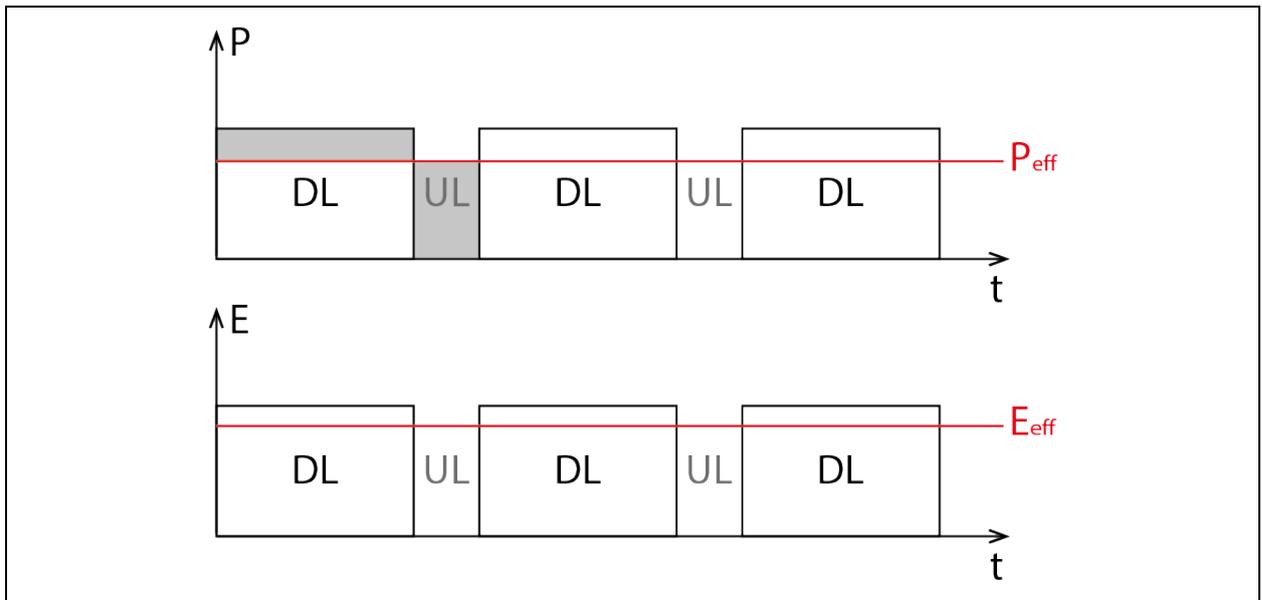


Abbildung 15: Effektivwert der Sendeleistung  $P_{\text{eff}}$  (oben) und der elektrischen Feldstärke  $E_{\text{eff}}$  (unten) bei TDD-Betrieb bezogen auf die maximale Sendeleistung. Da die Basisstation bei der Übermittlung der Nutzdaten (DL: Downlink) nur höchstens 80 % der Zeit sendet und 20 % der Zeit für den Uplink (UL) vorgesehen sind, fällt der Effektivwert der elektrischen Feldstärke ( $E_{\text{eff}}$ ) geringer aus, als wenn die Basisstation die gesamte Zeit senden würde. Als Effektivwert der Sendeleistung gilt der Mittelwert über die Zeit  $t$ , dargestellt als rote Linie ( $P_{\text{eff}}$ ). Die grau hinterlegten Flächen in der oberen Grafik zur Sendeleistung haben dieselbe Fläche. Die untere Grafik ist auf den Effektivwert der elektrischen Feldstärke umgerechnet. Letzterer entspricht dem quadratischen Mittelwert über die Zeit  $t$ .

Da bei einer Mobilfunkanlage – im Hinblick auf den Effektivwert – die über eine Zeitperiode gemittelte abgestrahlte Leistung massgebend ist, darf beim TDD-Betrieb das Verhältnis der Sendedauer innerhalb dieser Periode zur Periodendauer – der sogenannte Duty Cycle (deutsch: Tastverhältnis) – bei der massgebenden Sendeleistung berücksichtigt werden. Denn beim Tastverhältnis handelt es sich um einen einstellbaren, konstanten Systemparameter, weshalb eine Mittelung der maximalen Sendeleistung über den Duty Cycle den Bestimmungen der NISV betreffend Anlagegrenzwert entspricht.

Beim derzeit festgelegten Verhältnis Downlink zu Uplink von 4:1 bzw. 80:20 beträgt der Duty Cycle 0.8. Der Duty Cycle für den TDD-Betrieb wird im Standortdatenblatt nicht angegeben, muss allerdings im Qualitätssicherungssystem hinterlegt werden, damit der Leistungspfad für die Überwachung der Sendeleistung korrekt dokumentiert ist.

## 8.2 Begleitung und Erfahrungssammlung der Vollzugsempfehlung

Mit dem Korrekturfaktor und der automatischen Leistungsbegrenzung finden zwei neue Elemente Eingang in den Vollzug der NISV bei Mobilfunkanlagen. Diese sollen in der Anfangsphase mit empirischen Studien begleitet werden.

## 9 Weitere Informationen

Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung (2019): «[Bericht Mobilfunk und Strahlung](#)». Bericht im Auftrag des Departementes für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 18.11.2019.

Bundesamt für Kommunikation BAKOM (2020): «[Faktenblatt 5G: Ein einleitender Überblick](#)», 30.1.2020.

Bundesamt für Kommunikation BAKOM (2021): «Testkonzession und Messung adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1)», 24.9.2020 und «Testkonzession und Messungen adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1) – Bericht-Nachtrag», 8.2.2021.

Bundesamt für Umwelt BAFU (2020): «[Erläuterungen zur Messmethode für adaptive Antennen](#)», 30.6.2020.

Bundesamt für Umwelt BAFU (2021): «Adaptive Antennen. Nachtrag vom 23. Februar 2021 zur Vollzugsempfehlung zur Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) für Mobilfunk- und WLL-Basisstationen, BUWAL 2002», 23.2.2021.

Eidg. Institut für Metrologie METAS (2020a): «[Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz](#)», 18.2.2020.

Eidg. Institut für Metrologie METAS (2020b): «[Nachtrag vom 15. Juni 2020 zum Technischen Bericht Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz](#)», 15.6.2020.

STRAPAG (2018): «[Pilotstudie für Emissionsmessungen an einer Mobilfunksendeanlage mittels Flugdrohne](#)». Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, 23.11.2018.