



30.06.2020

## Erläuterungen zur Messmethode für adaptive Antennen

Das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) hat eine Messmethode für die Strahlung von 5G-Basisstationen und adaptiven Antennen bis 6 GHz erarbeitet und am 18. Februar 2020 veröffentlicht<sup>1</sup>. Seit der Veröffentlichung dieses technischen Berichts haben mehrere Kantone gegenüber dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) Bedarf an weiteren Erläuterungen zum fachlichen Inhalt dieses Berichts geäussert. Als Antwort auf diese Anfragen fasst das vorliegende Dokument die vom METAS vorgestellte Methode zur Messung der Strahlung von adaptiven Antennen zusammen.

### 1 Allgemeines zur Abnahmemessung

Mobilfunkanlagen müssen den Anlagegrenzwert der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) 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 konstanter 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, aber anders als bei 4G, wo Signalisierungs- und Verkehrskanäle mit demselben Antennendiagramm abstrahlt werden, ist die Signalstruktur bei 5G optimiert und die Kanäle können mit verschiedenen Diagrammen abgestrahlt werden. Ausserdem erfordert 5G, aufgrund der vielfältigen Anwendungsbiete, einen hohen Grad an Flexibilität und Adaptivität. Insbesondere wird das Signal bei hohen Frequenzen, wegen der höheren Richtungsdämpfung, in einen engen Antennenstrahl (Beam) konzentriert, um dadurch einen höheren Antennengewinn zu erreichen. Es handelt sich dabei um die «Beamforming»-Technologie. Diese ermöglicht das Versenden von Signalen tendenziell in die Richtung des Nutzers. Man unterscheidet zwischen zwei Arten von Beams, die je ein unterschiedliches Antennendiagramm aufweisen:

- Signalisierungsbeams (bzw. Signalisierungskanäle), die antennenspezifische Informationen enthalten wie die Identifizierung der Funkzelle und die Synchronisation mit den Nutzern innerhalb des Versorgungsgebietes ermöglichen.
- Verkehrsbeams (bzw. Verkehrskanäle), die die Nutzlastdaten zwischen der Basisstation und den Nutzern übertragen.

Aufgrund der unterschiedlichen Antennendiagramme der Signalisierungs- und Verkehrskanäle ist der Hochrechnungsfaktor bei adaptiven Antennen im Gegensatz zu 4G nicht mehr für alle Senderichtungen konstant. Der Unterschied zwischen den adaptiven und den konventionellen Antennen ist in Abbildung 1 illustriert.

<sup>1</sup> <https://www.metas.ch/metas/de/home/dok/publikationen/medienmitteilungen/2020-02-18.html>



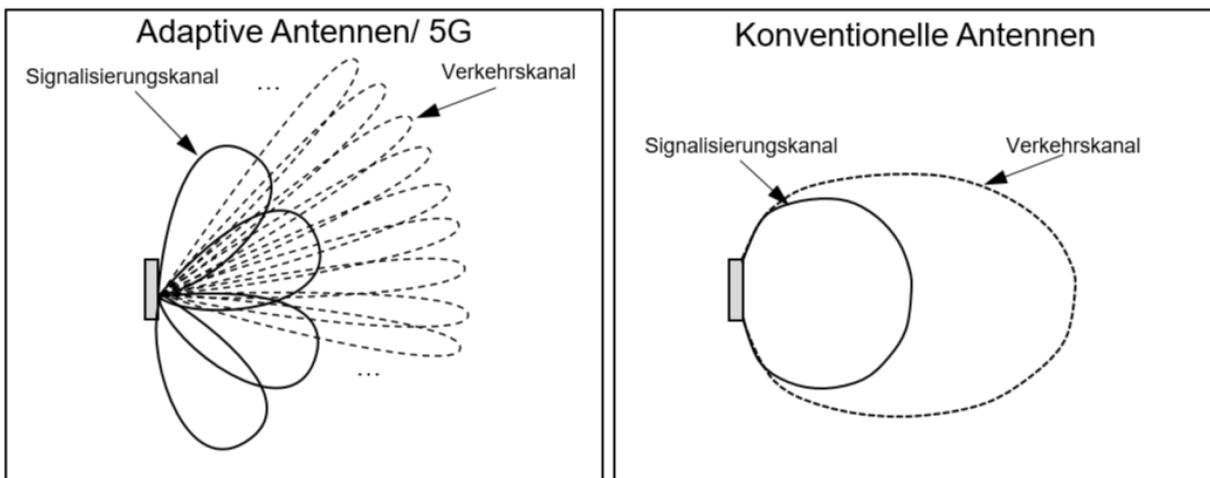


Abbildung 1: Antennendiagramm: 5G vs. 4G (Quelle: Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz). Schematische Darstellung (von oben) der horizontalen Abstrahlung einer 5G-Zelle (links) und einer konventionellen Basisstation (rechts). Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um auf 0 dB normierte Antennendiagramme handelt; es wird die Sendeleistung pro Senderichtung dargestellt. Konventionelle Antenne: Signalisierungs- und Verkehrskanäle werden mit demselben Diagramm abgestrahlt; sie unterscheiden sich in der Sendeleistung. Bei adaptiven Antennen werden Signalisierungs- und Verkehrskanäle sowohl mit unterschiedlichem Diagramm als auch mit unterschiedlicher Sendeleistung abgestrahlt.

## 2 Messmethode für die Strahlung von 5G-Basisstationen und adaptive Antennen

Der METAS-Bericht behandelt die folgenden Themen:

- Die Funkschnittstelle und die ausgewählten Messsignale
- Code-selektive Messung
- Frequenzselektive Messung

### 2.1 Messsignal

Die Referenzsignale, die zu messen sind, werden in den Signalisierungsbeams übertragen. Das Downlink-Signal des Physical Broadcast Channels (PBCH) besteht aus mehreren physikalischen Signalen, die periodisch abgestrahlt werden. Aufgrund der erforderlichen Genauigkeit wurde das sekundäre Synchronisierungssignal (SSS) für die Messung der elektrischen Feldstärke ausgewählt. Dieses Signal belegt eine Bandbreite von 1,905 MHz oder 3,810 MHz (127 Ressourcen-Elemente), je nach Abstand der einzelnen Frequenzträger, der bei 5G die Werte 15, 30 oder 60 kHz annehmen kann. Ein Ressourcen-Element ist die kleinste Einheit im Frequenz-Zeit-Raster des abgestrahlten Signals, nämlich ein einzelner Frequenzträger während eines OFDM-Symbols (OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, auf Deutsch: Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren).

### 2.2 Code-selektive Messung

#### 2.2.1 Bestimmung des Beurteilungswerts für eine Zelle $i$

Der mit der code-selektiven Messung erhaltene Wert  $E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}}$  entspricht dem örtlichen Maximum der elektrischen Feldstärke pro Ressourcen-Element für eine Zelle  $i$ .  $E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}}$  wird anschliessend mit dem globalen Hochrechnungsfaktor  $K_i(\varphi_i, \theta_i)$  für eine Zelle  $i$  multipliziert und auf den Beurteilungswert für die entsprechende Zelle  $E_{i,h}$  hochgerechnet:

$$E_{i,h} = E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}} \cdot K_i(\varphi_i, \theta_i)$$

Im Vergleich zu früheren Technologien ist dieser Faktor  $K_i(\varphi_i, \theta_i)$  bei adaptiven Antennen komplexer und setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen, die verschiedene dynamische Aspekte der adaptiven Antennen wiedergeben:

$$K_i(\varphi_i, \theta_i) = K_i^{\text{SSS(REF)}} \cdot K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i) \cdot K_i^{\text{stat}} \cdot K^{\text{duplex}}$$

Dabei bedeuten:

- $K_i^{\text{SSS(REF)}}$ : Hochrechnungsfaktor für das Verhältnis zwischen der aktuellen Sendeleistung (ERP) des SSS der Antenne  $P_i^{\text{SSS(REF)}}$  und der bewilligten Sendeleistung (ERP) der Antenne  $P_{i,\text{bewilligt}}$ :
- $$K_i^{\text{SSS(REF)}} = \sqrt{\frac{P_{i,\text{bewilligt}}}{P_i^{\text{SSS(REF)}}}}$$
- $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$ : Antennenkorrekturfaktor, der die Trennung der Signalisierungs- und Verkehrs-kanäle und die Tatsache berücksichtigt, dass die Antennendiagramme der SSS des PBCH (Signalisierungskanal) und das umhüllende Antennendiagramm der Verkehrsbeams<sup>2</sup> bei den maximalen bewilligten Betriebsbedingungen unterschiedlich sind. Dieser Faktor hängt vom Winkel zwischen der Hauptstrahlrichtung der Antenne und dem Messort ab (Azimut  $\varphi_i$  und Elevation  $\theta_i$ ). Dieser Faktor variiert also je nach Messort. Außerdem hängt er vom Typ der Antenne ab und muss für sämtliche Messpositionen in einer Datei verfügbar sein. Eine ausführlichere Erklärung zur Bestimmung dieses Faktors  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  folgt im Abschnitt 2.2.2.
  - $K_i^{\text{stat}}$ : Statistischer Faktor, welcher die Variabilität der adaptiven Antennen der Zelle  $i$  nach Anhang 1 Ziffer 63 NISV berücksichtigt. Solange die Antennen nach dem Worst-Case-Szenario beurteilt werden, nimmt dieser Faktor den Wert 1 an und ist wirkungslos. Dies wird bis zur Publikation der Vollzugshilfe für adaptive Antennen der Fall sein.
  - $K^{\text{duplex}}$ : Duplexfaktor. Dieser Faktor kommt zur Anwendung, wenn beide Übertragungsrichtungen Downlink (Antenne -> Nutzer) und Uplink (Nutzer -> Antenne) dieselbe Bandbreite alternierend nutzen (Time Domain Duplex (TDD)-Modus). In diesem Modus können das Uplinksignal und das Downlinksignal nicht zeitgleich übertragen werden<sup>3</sup>.

## 2.2.2 Ermittlung des Antennenkorrekturfaktors $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$

Der Antennenkorrekturfaktor  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  hängt von der Richtungsdämpfung im Vergleich zur Hauptabstrahlrichtung ab. Er hängt insbesondere von der unterschiedlichen Richtungsdämpfung des Signalisierungssignals  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  und des Gesamtsignals  $A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$  ab. Die Richtungsdämpfung des SSS und die des Gesamtsignals können sich je nach Messort unterscheiden. Dieser Faktor wurde eingeführt, um diese Abweichung zu korrigieren und den Beurteilungswert korrekt zu ermitteln. Anzumerken ist Folgendes:

- Um auf der sicheren Seite zu bleiben, wird dieser Faktor nur dann grösser als 1 eingesetzt, wenn die Dämpfung des Signalisierungssignals im Antennendiagramm grösser als die des Gesamtsignals ist.
- Um einen realistischen Wertebereich für diesen Ansatz zu verwenden, wird dieser Faktor mit dem Wert von  $K_{i,\text{max}}^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  begrenzt. Dieser entspricht dem maximalen Wert in allen Richtungen, in denen der SSS stark genug ist, d. h. die Richtungsdämpfung  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  kleiner als 10 (20 dB) ist.
- Für die Ermittlung von  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  unterscheidet man zwischen drei verschiedenen Fällen, die in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt sind.

<sup>2</sup> Das umhüllende Antennendiagramm repräsentiert den massgebenden Betriebszustand. Im Grunde tragen auch die Signalisierungskanäle zum Gesamtsignal bei, allerdings nur marginal. Deshalb ist es sachgerecht, die Umhüllende der Verkehrskanäle als Antennendiagramm für den massgebenden Betriebszustand heranzuziehen.

<sup>3</sup> Bei den bisherigen Mobilfunkgenerationen erfolgen Downlink und Uplink auf verschiedenen Frequenzen (sog. Frequency Domain Duplex FDD). Bei 5G kommt FDD in den tieferen Frequenzen und TDD bei den höheren Frequenzen zum Einsatz.

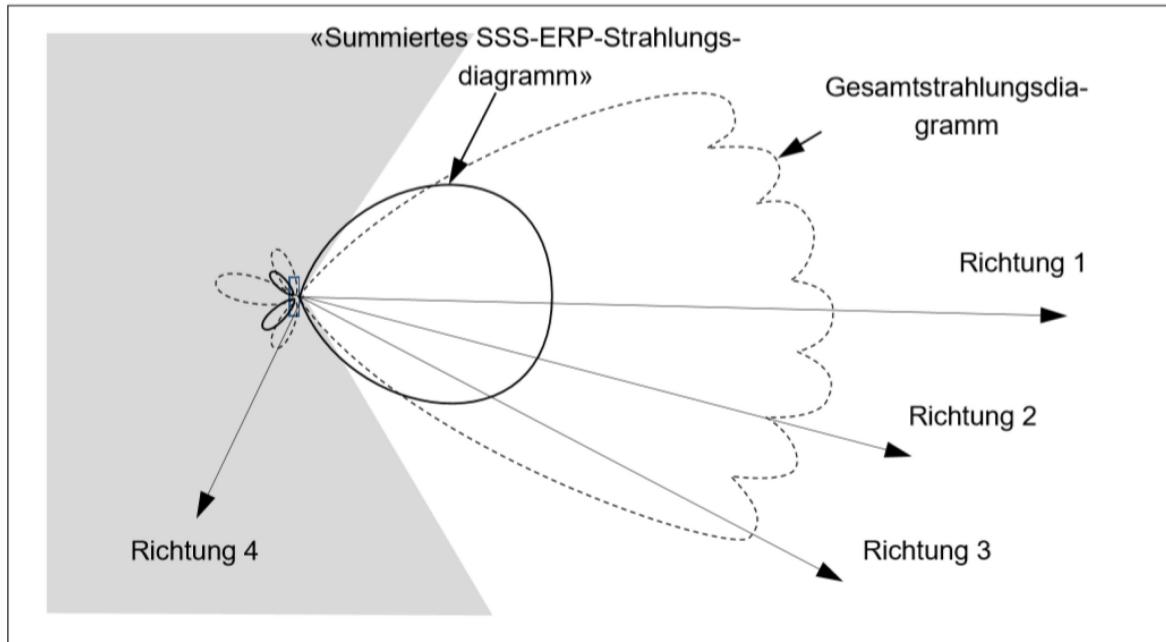


Abbildung 2: Schematische Darstellung (von oben) des horizontalen Strahlungsdiagramms einer Zelle einer New Radio (NR) Basisstation. Dargestellt sind nicht auf 0 dB normierte Diagramme, sondern die Sendeleistung pro Senderichtung (Quelle: Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz).

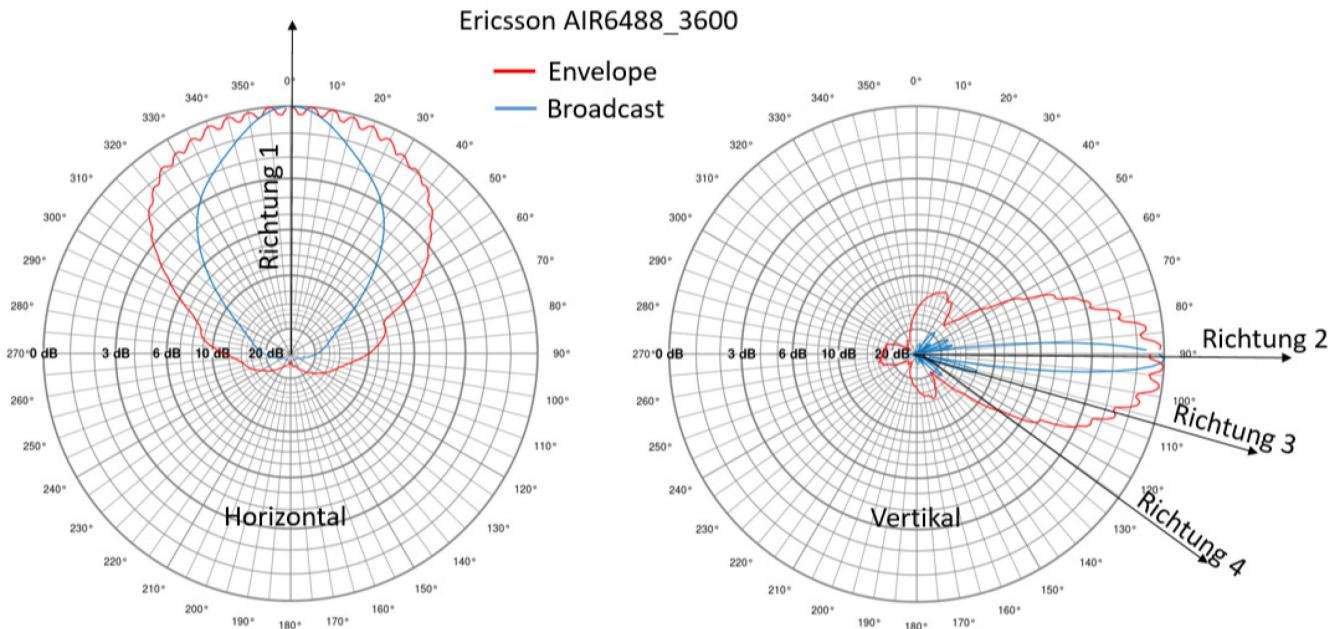


Abbildung 3: Antennendiagramme (auf 0 dB normiert) einer Ericsson-Antenne AIR6488\_3600. Blau ist das Antennendiagramm des Signalisierungskanals (Broadcast) und rot dasjenige der Umhüllenden (Envelope).

a) Richtung 1 / Richtung 2:

Die Richtungsdämpfung des SSS  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  ist kleiner als 10 (20 dB) und kleiner (Richtung 2) oder gleich (Richtung 1) der Richtungsdämpfung des Gesamtsignals  $A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$ . In diesen Fällen wird der Faktor  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  gleich 1 (0 dB) gesetzt und ist wirkungslos:

$$K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i) = 1$$

b) Richtung 3:

Die Richtungsdämpfung des SSS  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  ist kleiner als 10 (20 dB) und grösser als die des Verkehrskanals  $A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$ . In dieser Richtung wird der Faktor  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  eingesetzt und entspricht dem Verhältnis zwischen der Richtungsdämpfung des SSS  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  und der Richtungsdämpfung des Gesamtsignals  $A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$ :

$$K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i) = A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i) / A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$$

c) Richtung 4:

Die Richtungsdämpfung des SSS  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  ist grösser oder gleich 10 (20 dB). Dieser Fall tritt auf, wenn der Messort sich einem schlecht definierten Bereich des Antennendiagramms befindet und die Strahlung deutlich schwächer als in der frontalen Antennenrichtung ist. Um extrem hohe Werte für  $K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  zu vermeiden, die sich aus dem starken Unterschied zwischen der Richtungsdämpfung des SSS und derjenigen des Gesamtsignals in diesem Bereich ergeben, wird dieser mit dem maximalen Antennenfaktor in der frontalen Richtung der Antennen  $K_{i,\max}^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i)$  begrenzt. Dieser Wert entspricht dem Maximum für alle Richtungen, bei denen der Beam des SSS stark genug, d. h. die Signaldämpfung  $A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i)$  kleiner als 10 (20 dB) ist. Dieser Bereich ist in Abbildung 2 weiss markiert. Der Bereich, für den diese Bedingung nicht erfüllt ist, ist hellgrau markiert. In diesem Fall gilt:

$$K_i^{\text{antenna}}(\varphi_i, \theta_i) = K_{i,\max}^{\text{antenna}} = \max_{\{\varphi_i, \theta_i \mid A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i) < 10\}} A_i^{\text{SSS(REF)}}(\varphi_i, \theta_i) / A_i^{\text{total}}(\varphi_i, \theta_i)$$

### 2.2.3 Ermittlung des Beurteilungswerts für die Gesamtanlage

Wenn der globale Hochrechnungsfaktor für Zelle  $i$   $K_i(\varphi_i, \theta_i)$  bestimmt ist, kann der Beurteilungswert für die Zelle  $i$   $E_{i,h}$  wie folgt berechnet werden (vgl. auch Abbildung 4):

$$E_{i,h} = E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}} \cdot K_i(\varphi_i, \theta_i)$$

Anschliessend werden die hochgerechneten Werte der elektrischen Feldstärke für jede Zelle  $i$  ( $E_{i,h}$ ) für die Basisstation  $E_h$  wie folgt addiert:

$$E_h = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{i,h}^2}$$

Wenn mehrere Netzbetreiber und/oder Funkdienste vorhanden sind, ergibt sich der Beurteilungswert  $E_B$  durch Addition der Beiträge aller Systeme, die zu derselben Anlage gehören:

$$E_B = \sqrt{E_{\text{Netzwerk } 1,h}^2 + E_{\text{Netzwerk } 2,h}^2 + \dots}$$

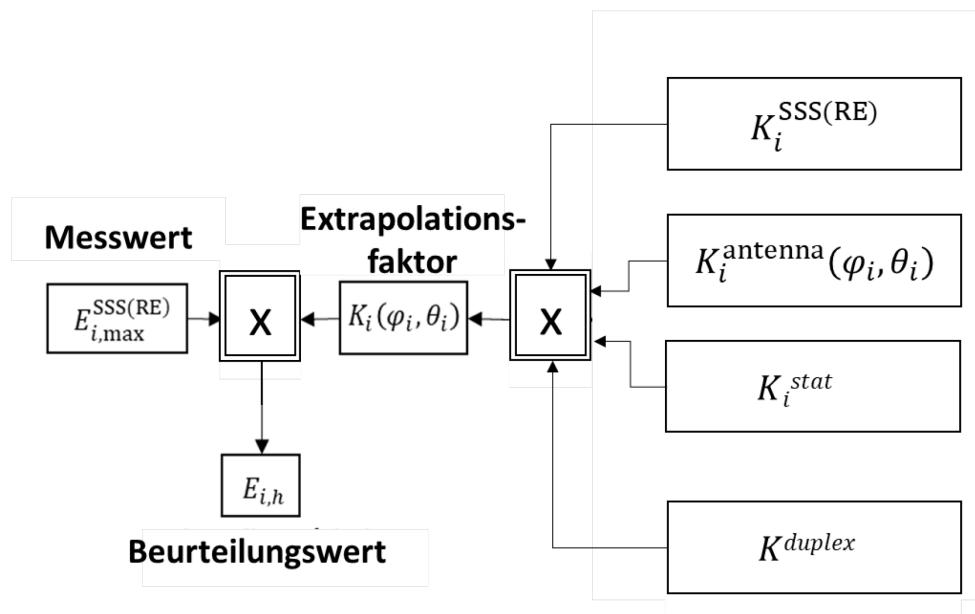


Abbildung 4: Flussdiagramm zur Bestimmung des Beurteilungswerts für eine Zelle  $i$ . Die Abbildung veranschaulicht schematisch das Verfahren zur Bestimmung des Hochrechnungsfaktors  $K_i(\varphi_i, \theta_i)$  und dessen Multiplikation mit dem Messwert  $E_{i,\max}^{\text{SSS(Re)}}$ , um den Beurteilungswert für eine bestimmte Zelle  $i$   $E_{i,h}$  zu erhalten.

## 2.3 Frequenzselektive Messung

### 2.3.1 Allgemeines zur frequenzselektiven Messung

Wenn kein code-selektives Messgerät zur Verfügung steht, kann eine frequenzselektive Messung durchgeführt werden. Die frequenzselektive Messmethode überschätzt die elektrische Feldstärke generell. Dies hat in Bezug auf den Nachweis der Einhaltung des Anlagegrenzwerts (AGW) der NISV folgende Konsequenzen:

- Ist der Beurteilungswert nicht höher als der AGW, so ist dessen Einhaltung zuverlässig nachgewiesen und es sind keine weiteren Massnahmen notwendig.
- Ist der Beurteilungswert jedoch oberhalb des AGW, kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob der Grenzwert tatsächlich überschritten wird. Desungeachtet muss die Anlage so angepasst werden, dass der Beurteilungswert unterhalb des Anlagegrenzwerts zu liegen kommt.

Die frequenzselektive Methode basiert ebenfalls auf der Messung des sekundären Synchronisations-signalen (SSS) und erfordert die Verwendung eines Spektrumanalysators mit einem RMS-Detektor. Der Wert  $E_{i,\max}^{\text{SSS(Re)}}$  kann nicht direkt mit einem frequenzselektiven Messinstrument gemessen werden. Der gemessene Wert  $E_{i,\max}^{\text{measured}}$  entspricht dem räumlichen Maximum aller Signale, die im Frequenzbereich des SSS liegen. Um den Wert  $E_{i,\max}^{\text{SSS(Re)}}$  zu erhalten, müssen zusätzliche Faktoren angewendet werden.

### 2.3.2 Frequenzselektive Messung gemäss technischem Bericht vom 18. Februar 2020

Im technischen Bericht vom 18. Februar 2020 hat das METAS folgende Faktoren vorgeschlagen:

- Anzahl der Ressourcen-Elemente: Die Anzahl der Ressourcen-Elemente im Frequenzbereich des SSS beträgt 127. Der gemessene Wert  $E_{i,\max}^{\text{measured}}$  muss mit  $\sqrt{\frac{1}{127}}$  multipliziert werden, um die elektrische Feldstärke pro Ressourcen-Element zu erhalten.
- Anzahl Signalisierungsbeams: Der FSM-Faktor (frequenzselektives Messverfahren)  $K_i^{\text{FSM}}$  wird angewandt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass es nicht möglich ist, das von jedem Beam individuell erzeugte elektrische Feld zu messen. Wenn zwei und mehr Signalisierungsbeams vorhanden sind, wird ein Faktor  $\sqrt{2}$  eingesetzt.

Der Wert  $E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}}$  wird somit mit der folgenden Formel ermittelt:

$$E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}} \cong E_{i,\max}^{\text{measured}} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{\text{FSM}}$$

Schliesslich wird die hochgerechnete Feldstärke  $E_h$  mit folgender Formel bestimmt, in welche der globale Hochrechnungsfaktor  $K_i(\phi_i, \theta_i)$  gemäss Kapitel 2.2.1 einfließt:

$$E_h \cong \left( E_{i,\max}^{\text{measured}} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{\text{FSM}} \right) \cdot \max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$$

Den Bewertungswert  $E_B$  erhält man, indem man wie in Kapitel 2.2.3 die Beiträge aller Netzbetreiber und/oder Funkdienste addiert.

Bei ersten Anwendungen in der Praxis hat sich gezeigt, dass mit diesem Vorgehen die hochgerechnete elektrische Feldstärke stark überschätzt wird. Dabei spielen zwei Effekte eine Rolle:

- Bei der frequenzselektiven Methode können die Zellen nicht unterschieden werden. Für diesen Fall schreibt der technische Bericht des METAS vom 18. Februar 2020 vor, den maximalen globalen Hochrechnungsfaktor der gesamten Anlage  $\max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$  zu nehmen, auch wenn dieser Faktor möglicherweise aus einer anderen Richtung bzw. einer andern Zelle stammt.
- Bei bestimmten eingesetzten Antennen ist der Antennenkorrekturfaktor  $K_i(\phi_i, \theta_i)$  extrem vom Azimut und von der Neigung abhängig (zum Teil bis zu einem Faktor von 10).

### 2.3.3 Frequenzselektive Messung gemäss Nachtrag METAS vom 15. Juni 2020

Um diese Überschätzung zu vermeiden, hat das METAS mit Nachtrag vom 15. Juni 2020<sup>4</sup> die folgenden Anpassungen an der frequenzselektiven Messmethode vorgenommen:

1. Anpassung des Hochrechnungsfaktors:

Der maximale globale Hochrechnungsfaktor der gesamten Anlage  $\max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$  für die Ermittlung der hochgerechneten Feldstärke  $E_h$  wurde mit  $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$  ersetzt. Dieser ermöglicht es, nur die für die Messung relevanten Zellen für die Hochrechnung zu berücksichtigen.

Für die Ermittlung von  $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$  gilt die folgende Fallunterscheidung:

- Bei Messungen im Hauptsendebereich der Zelle  $i_1$  wird der Faktor  $K_{i_1}(\phi_i, \theta_i)$  dieser Zelle  $i_1$  als Faktor  $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$  eingesetzt.
- Bei Messungen im Hauptsendebereich der Zelle  $i_2$  wird der Faktor  $K_{i_2}(\phi_i, \theta_i)$  dieser Zelle  $i_2$  als Faktor  $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$  eingesetzt.
- Bei Messungen im Bereich zwischen den Zellen  $i_1$  und  $i_2$  wird der grössere der beiden Faktoren  $K_{i_1}(\phi_i, \theta_i)$  und  $K_{i_2}(\phi_i, \theta_i)$  als Faktor  $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$  eingesetzt.

Wie sich die Hauptsendebereiche und der Bereich zwischen den Zellen definieren, ist in Abbildung 5 dargestellt.

<sup>4</sup> [https://www.metas.ch/dam/data/metas/Dokumentation/rechtliches/nisv/Nachtrag\\_nr\\_%20measurement%20methods\\_2.1.pdf](https://www.metas.ch/dam/data/metas/Dokumentation/rechtliches/nisv/Nachtrag_nr_%20measurement%20methods_2.1.pdf)

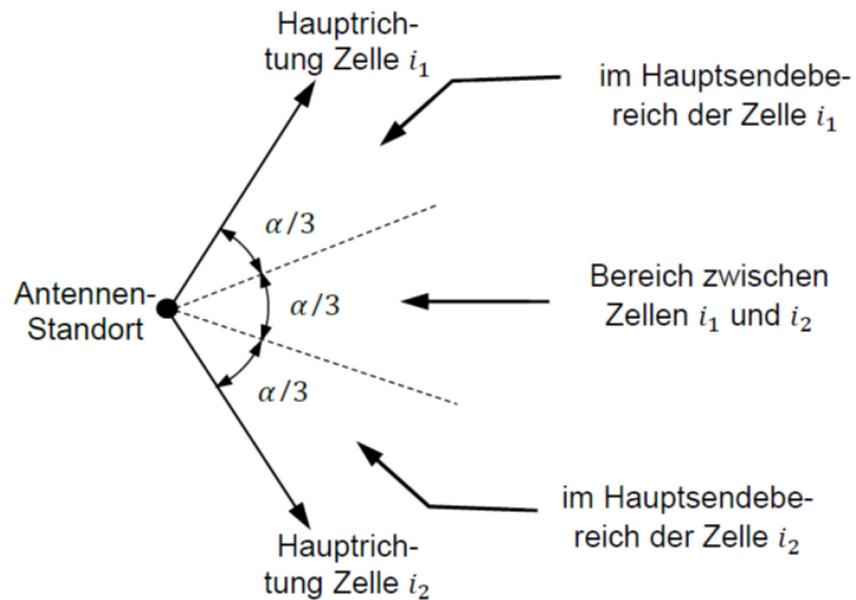


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Aufteilung des Sendebereichs zwischen zwei Zellen.

$E_h$  kann anschliessend mit folgender Formel bestimmt werden:

$$E_h \cong \left( E_{i,\max}^{\text{measured}} \cdot \sqrt{\frac{1}{127} \cdot K_i^{\text{FSM}}} \right) \cdot K_i^R(\varphi_i, \theta_i)$$

## 2. Anpassung der Auflösungsbandbreite:

Die aktuell erforderliche minimale Auflösungsbandbreite für die Ermittlung von  $E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}}$  beträgt  $127 \cdot \Delta f$ . Die Anpassung sieht vor, dass die Bandbreite des Netzwerkanalysators (RBW) bei der Ermittlung von  $E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}}$  mit der folgenden Formel berücksichtigt wird:

$$E_{i,\max}^{\text{SSS(REF)}} \cong E_{i,\max}^{\text{measured}} \cdot \max\left(\sqrt{\frac{1}{127}}, \sqrt{\frac{\Delta f}{\text{RBW}}} \right) \cdot K_i^{\text{FSM}}$$

Diese Anpassungen sollen die Überschätzung der frequenzselektiven Methode zum Teil verhindern, sollen aber in keinem Fall zu einer Unterschätzung führen.