



Nichtionisierende Strahlung

Technischer Bericht: Messmethode für LTE-Basisstationen



(Deutsche Übersetzung des *Technical Report: Measurement Method for LTE Base Stations*)

METAS-Bericht Nr. 2012-218-808 (deutsche Übersetzung)

Herausgeber

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS
Sektion Elektrizität
Lindenweg 50
3003 Bern-Wabern
Tel. +41 58 38 70 111
www.metas.ch

Verfasser

Frédéric Pythoud, Beat Mühlemann

Copyright

Das Dokument darf nur in vollständiger Form veröffentlicht oder verbreitet werden.

Dieser Bericht wurde zunächst auf Englisch publiziert unter dem Titel:

Technical Report: Measurement Method for LTE Base Stations.

In Zweifelsfällen ist der Originaltext massgebend.

METAS-Bericht 2012-218-808 (deutsche Übersetzung)

Die vorliegende Publikation kann als Pdf-Datei heruntergeladen werden unter
<http://www.metas.ch/nisv>

3003 Bern-Wabern, 13. Januar 2014

Technischer Bericht: Messmethode für LTE-Basisstationen

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Vorwort | 2 |
| 1.1 | Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung | 2 |
| 1.2 | Messempfehlungen | 2 |
| 1.3 | Zweck und Geltungsbereich | 2 |
| 1.4 | Überblick | 2 |
| 1.5 | Anwendung und Aussichten | 3 |
| 2 | Die code-selektive Messung | 3 |
| 2.1 | Messwert | 3 |
| 2.2 | Beurteilungswert | 4 |
| 2.3 | Konformitätsbewertung | 5 |
| 2.4 | Diskussion und Kommentare | 6 |
| 2.5 | Einschränkungen | 6 |
| 3 | Die frequenzselektive Messung | 6 |
| 3.1 | Messwert | 6 |
| 3.2 | Beurteilungswert | 7 |
| 3.3 | Konformitätsbewertung | 8 |
| 3.4 | Diskussion | 8 |
| 3.5 | Einschränkungen | 9 |
| 4 | Referenzen | 9 |
| 5 | Anhang A: Grundlagen von LTE (zur Information) | 10 |
| 5.1 | Downlink Resource Grid | 10 |
| 6 | Anhang B: Beispiele | 11 |
| 6.1 | Die code-selektive Messung | 12 |
| 6.2 | Die frequenzselektive Messung | 13 |
| 7 | Anhang C: Definitionen, Symbole und Abkürzungen | 13 |

1 Vorwort

1.1 Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung

Die „Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung“ (NISV) [1] von 1999 definiert die folgenden Grenzwerte:

- **Emissionsgrenzwerte** für elektromagnetische Felder mit Frequenzen von 0 Hz bis 300 GHz (gestützt auf ICNIRP).
- die so genannten „**Anlagegrenzwerte**“, die strenger sind als die Emissionsbegrenzungen und als vorsorgliche Beschränkung der Emissionen eingeführt wurden. Sie gelten für die Strahlung, die eine Anlage in ihrem jeweiligen **massgebenden Betriebszustand** abgibt, was (im Falle mobiler Telekommunikationssysteme) den maximalen Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung meint. Diese Anlagegrenzwerte sind an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN), d.h. Wohnräume, Büroräume, Schulen, Kinderspielplätze usw., einzuhalten.

Mit andern Worten beinhaltet die Konformitätsprüfung einer Mobilfunk-Basisstation einerseits die Messung der Stärke des elektrischen Felds zu einem gegebenen Zeitpunkt, andererseits eine **Hochrechnung der Messwerte für den massgebenden Betriebszustand**.

1.2 Messempfehlungen

Die Konformitätsbewertung einer Anlage besteht somit nicht nur im Messverfahren für die elektrische Feldstärke, sondern erfordert zusätzliche Berechnungen für eine möglichst korrekte Erfassung der im massgebenden Betriebszustand erwarteten Feldstärken. Zur Harmonisierung der dabei verwendeten Messverfahren und Hochrechnungen wurden bereits eine Reihe spezifischer Messempfehlungen für verschiedene Technologien veröffentlicht: GSM [2], UMTS [4], Rundfunk und Funkruf [5] sowie EDGE [3].

1.3 Zweck und Geltungsbereich

Mit der Einführung von Long Term Evolution (LTE) als neue Technologie im Mobilfunkbereich galt es, eine neue Referenzmethode für die Messung der Feldstärken von LTE-Anlagen in Innen- und Aussenbereichen zu erarbeiten. Folgende Anforderungen muss die Messmethode erfüllen:

- Robustheit
- Bereitstellung von möglichst präzisen Hochrechnungen unter Vermeidung von Über- oder Unterschätzung der elektrischen Feldstärken im massgebenden Betriebszustand
- Übereinstimmung mit früheren Messempfehlungen

1.4 Überblick

Wie bei früheren Messempfehlungen werden auch hier zwei verschiedene Methoden vorgeschlagen:

- Die code-selektive Messmethode ermöglicht die Beurteilung der Konformität oder Nichtkonformität einer Anlage mit den Anlagegrenzwerten. Sie gilt deshalb als die **Referenzmethode**.
- Die spektrale Messmethode erlaubt keine Unterscheidung zwischen zwei verschiedenen Zellen eines gleichen Betreibers oder einer gleichen Anlage. Ausserdem tendiert sie zur Überschätzung der hochgerechneten Feldstärke im massgebenden Be-

triebszustand. Sie kann zwar die Konformität einer Anlage mit den Vorgaben bestätigen, scheitert letztlich jedoch an der Bestimmung der Nichtkonformität, sogar wenn die hochgerechnete Feldstärke den Anlagegrenzwert überschreitet. In der Folge gilt diese Messmethode als „**orientierende Messung**“.

1.5 Anwendung und Aussichten

Dieses Dokument kann für die Abnahmetests für LTE-Basisstationen in Bezug auf die NISV verwendet werden, bis das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine offizielle Messempfehlung herausgeben.

2 Die code-selektive Messung

2.1 Messwert

Die code-selektive Methode basiert auf der Ermittlung der Feldstärke, die das zellspezifische Referenzsignal (CRS - Cell-specific Reference Signal) des Downlink-Signals auf Port 0 produziert. Das CRS wird den Resource-Elementen R_0 zugeordnet, die über die gesamte Bandbreite des LTE-Downlink-Signals auf Port 0 verteilt sind (siehe Anhang A). Das vom Antennenport 0 übermittelte CRS (CRS_0) enthält die Zellkennung (0 bis 503). Die Messung der CRS_0 erfordert eine code-selektive Messeinrichtung, einen Messempfänger oder einen Spektrumanalysator, der CRS-Signale decodieren und ihre Leistung quantifizieren kann.

Die Bandbreite der Messeinrichtungen zur Quantifizierung der CRS_0 wird nicht spezifiziert. Die Messeinrichtung sollte über mindestens 6 LTE-Resource-Blöcke (1,08 MHz, siehe Anhang A) verfügen, kann aber auch die gesamte LTE-Downlink-Bandbreite abdecken.

Wie in früheren Messempfehlungen muss für jedes von der LTE-Zelle übertragene CRS_0 das Feldstärke-Maximum gesucht werden und zwar in Bezug auf:

- Stehwellen im Raum,
- Polarisierung der Messantenne,
- Ausrichtung (Azimut und Elevation) der Messantenne.

Die maximale elektrische Feldstärke wird auf die gleiche Weise wie in früheren Messempfehlungen ermittelt:

- Minimaler Abstand zu Wänden, Boden, Decke, Mobiliar und Fenstern: 50 cm
- Höhe zwischen 0,5 und 1,75 m in Innenräumen
- Methoden zur Maximasuche für Variante 1 oder Variante 2 gemäss Dokumentation [2,4].

Für die Messung ist eine Antenne mit kleinen Abmessungen zu verwenden, die leicht in Innenräumen zum Einsatz kommen kann. Sie muss vorgängig kalibriert werden.

2.2 Beurteilungswert

Für jede LTE-Zelle i der Basisstation (bzw. Anlage) wird ein Hochrechnungsfaktor $K_i^{R_0}$ nach folgender Formel berechnet:

$$K_i^{R_0} = \sqrt{\frac{P_{i,\text{bew}}}{P_i^{R_0}}},$$

Dabei bedeuten

| | |
|--------------------|--|
| $K_i^{R_0}$ | Hochrechnungsfaktor für Zelle i . |
| $P_i^{R_0}$ | Aktuelle Sendeleistung (ERP) des Resource-Elementes des Referenzsignals CRS ₀ von Zelle i in W. |
| $P_{i,\text{bew}}$ | Bewilligte Sendeleistung (ERP) der Zelle i in W (einschliesslich des Signals aller Antennenports der Zelle). |

Hinweis

1. Die aktuelle Sendeleistung der Referenzsignale $P_i^{R_0}$ ist definiert als Sendeleistung pro Resource-Element (R_0 Leistung) und nicht als Gesamtsendeleistung des CRS₀-Signals.
2. Die bewilligte Sendeleistung $P_{i,\text{bew}}$ und die aktuelle Sendeleistung der Referenzsignale $P_i^{R_0}$ sind den Angaben der Netzbetreiber zu entnehmen [2, 4].

Die gemessene elektrische Feldstärke muss für den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet werden:

$$E_{i,h} = E_{i,\text{max}}^{R_0} \cdot K_i^{R_0},$$

Dabei bedeuten:

| | |
|--------------------------|---|
| $E_{i,h}$ | Hochgerechneter Wert der elektrischen Feldstärke von Zelle i in V/m. |
| $E_{i,\text{max}}^{R_0}$ | Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke pro Resource-Element des Referenzsignals CRS ₀ von Zelle i in V/m. (Dieser Wert entspricht im Allgemeinen der mittleren Sendeleistung aller gemessenen Resource-Elemente R_0). |
| $K_i^{R_0}$ | Hochrechnungsfaktor für Zelle i . |

Hinweis:

Die maximale gemessene elektrische Feldstärke $E_{i,\text{max}}^{R_0}$ des Referenzsignals CRS₀ wird als „elektrische Feldstärke pro Resource-Element“ (elektrische Feldstärke von R_0) gemessen und nicht als gesamte Feldstärke des CRS₀-Signals. Sollte die Messeinrichtung nur die gesamte elektrische Feldstärke angeben, so muss der Messwert für die gesamte elektrische Feldstärke auf die elektrische Feldstärke eines einzigen Resource-Elements skaliert werden.

Anschliessend werden alle hochgerechneten elektrischen Feldstärken von LTE-Zellen wie folgt summiert:

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

Dabei bedeuten:

- E_h Hochgerechnete elektrische Feldstärke von LTE in einem gegebenen Netz, in V/m.
- $E_{i,h}$ Hochgerechneter Messwert der elektrischen Feldstärke von Zelle i , in V/m.
- n Anzahl Zellen der Basisstation, bzw. der Anlage.

Den Beurteilungswert E_B erhält man durch Summierung der einzelnen Beiträge $E_{\text{Netz}_j,h}$ aller Netzwerke einer gleichen Anlage:

$$E_B = \sqrt{E_{\text{Netz}_1,h}^2 + E_{\text{Netz}_2,h}^2 + \dots}$$

Beispiele für die Berechnung finden sich in Anhang B.

Bei Anlagen, die gleichzeitig GSM- oder UMTS-Dienste betreiben, sind diese ebenfalls zu berücksichtigen. E_B wird gemäss [4] (Kapitel 9) errechnet.

2.3 Konformitätsbewertung

Mit der code-selektiven Methode lässt sich die Konformität oder Nichtkonformität einer Anlage eindeutig nachweisen:

- $E_B \leq E_{\text{limit}}$ Die Anlage erfüllt die Anforderungen.
- $E_B > E_{\text{limit}}$ Die Anlage erfüllt die Anforderungen nicht.

Wie in den bestehenden Empfehlungen [2, 4, 5] wird die erweiterte Messunsicherheit U ($k=2$) für die Konformitätsbewertung nicht direkt berücksichtigt (so genannt „geteiltes Risiko“ oder „einfache Abnahme“ gemäss [11]). Hingegen gilt für diese erweiterte Messunsicherheit:

- Sie muss einen Beitrag von $\pm 15\%$ ($k=1$) für die Erfassung (Probenahme) des Messvolumens beinhalten;
- sie darf den Wert von $\pm 45\%$ ($k=2$) nicht überschreiten.

Die Messunsicherheit muss ähnlich wie beim code-selektiven Messverfahren für UMTS-Basisstationen ermittelt werden [4].

2.4 Diskussion und Kommentare

Die Wahl des Referenzsignals CRS_0 als Messsignal hat folgende Gründe:

- Das Signal CRS_0 wird nur vom Antennenport 0 ausgegeben. Im Gegensatz zu den Synchronisierungssignalen produziert dieses Signal ein elektrisches Feld, das frei ist von konstruktiven oder destruktiven Interferenzen durch Signale anderer Antennenports. Die elektrische Feldstärke des Signals CRS_0 , bzw. R_0 an einem bestimmten Ort ist deshalb unabhängig vom Polarisationswinkel zwischen den Sendeelementen des Antennenports 0 und jenen anderer Antennenports. Dies ist ähnlich bei GSM und UMTS, wo der Kontrollkanal ebenfalls nur von einem Antennenport ausgegeben wird.
- Das CRS_0 wird immer unabhängig von der Anzahl Ports im MIMO-Übertragungsverfahren gesendet (für Einschränkungen siehe Abschnitt 2.5).

2.5 Einschränkungen

1. Die CRS-Signale sind nur bei einem Subträgerabstand Δf von 15 kHz verfügbar, nicht jedoch bei einem Subträgerabstand Δf von 7,5 kHz, wie er für MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast Service) geplant ist.
2. Die Methode wurde für FDD-Systeme erarbeitet. Die Grundsätze lassen sich – gegebenenfalls mit kleineren Anpassungen – auch auf TDD-Systeme anwenden.
3. Die auf Messung des Referenzsignals CRS_0 basierende Methode ist nur gültig, solange sich alle Antennen aller Ports am gleichen Ort befinden.

3 Die frequenzselektive Messung

3.1 Messwert

Die frequenzselektive Methode beruht auf der Leistung beider Synchronisierungssignale. Das primäre Synchronisierungssignal (PSS) und das sekundäre Synchronisierungssignal (SSS) werden alle 10 Zeitschlitz (Slots) in je einem OFDM-Symbol (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) über eine Bandbreite von 62 Subträgern (930 kHz + 15 kHz für den mittleren Subträger gemäss Abschnitt 6.12 von [6]) übertragen. Zur Messung der Synchronisierungssignale ist ein Spektrumanalysator mit einem "true RMS"-Detektor, einer minimalen Auflösungsbandbreite von 945 kHz (typische Auflösungsbandbreite von 1 MHz) und einer Maximum-Hold-Funktion erforderlich. Die Messungen werden im „Zero Span“-Modus vorgenommen, wobei die Sweepzeit so zu wählen ist, dass die Messzeit pro Pixel 70 μs nicht überschreitet (die Dauer eines OFDM-Symbols beträgt ungefähr 71,5 μs). Die Gründe für diese Einschränkung sind in [9, 10] erläutert.

Das Maximum der Synchronisierungssignale ist ähnlich wie bei früheren Messempfehlungen zu ermitteln (weitere Erläuterungen in obenstehenden Abschnitten).

3.2 Beurteilungswert

Für jede LTE-Zelle i der Basisstation wird ein Hochrechnungsfaktor K_i^{SS} nach der folgenden Formel berechnet:

$$K_i^{SS} = \sqrt{\frac{P_{i,bew}}{\min(P_i^{PSS}, P_i^{SSS})}}$$

Dabei bedeuten:

| | |
|-------------|--|
| K_i^{SS} | Hochrechnungsfaktor für Zelle i . |
| P_i^{PSS} | Aktuelle Sendeleistung (ERP) des primären Synchronisierungssignals von Zelle i in W. |
| P_i^{SSS} | Aktuelle Sendeleistung (ERP) des sekundären Synchronisierungssignals von Zelle i in W. |
| $P_{i,bew}$ | Bewilligte Sendeleistung (ERP) der Zelle i in W (einschliesslich des Signals aller Antennenports der Zelle). |

Hinweis:

1. Die aktuelle Sendeleistung der Synchronisierungssignale P_i^{PSS} und P_i^{SSS} wird definiert als Sendeleistung pro Resource-Element und nicht als Gesamtsendeleistung der Synchronisierungssignale.
2. Die bewilligte Sendeleistung $P_{i,bew}$ und die aktuelle Sendeleistung der Synchronisierungssignale P_i^{PSS} und P_i^{SSS} sind den Angaben der Netzbetreiber zu entnehmen [2, 4].

Die gemessene elektrische Feldstärke muss für den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet werden:

$$E_h = E_{\max}^{SS} \cdot \max_{i=1..n} (K_i^{SS}),$$

Dabei bedeuten:

| | |
|-----------------|---|
| E_h | Hochgerechnete elektrische Feldstärke von LTE in einem gegebenen Netz, in V/m. |
| E_{\max}^{SS} | Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke (pro Resource-Element) der Synchronisierungssignale, in V/m. |
| K_i^{SS} | Hochrechnungsfaktor für Zelle i . |
| n | Anzahl Zellen der Basisstation, bzw. der Anlage |

Hinweis:

Die gemessene maximale elektrische Feldstärke E_{\max}^{SS} der Synchronisierungssignale wird als elektrische Feldstärke pro Resource-Element gemessen und nicht als gesamte Feldstärke der Synchronisierungssignale. Sollte die Messeinrichtung nur die gesamte elektrische Feldstärke angeben, so muss der Messwert für die gesamte elektrische Feldstärke wie folgt auf die elektrische Feldstärke eines einzigen Resource-Elements skaliert werden:

$$E_{\max}^{\text{SS}} = E_{\max}^{\text{measured}} \cdot \sqrt{\frac{1}{62}},$$

Dabei bedeuten:

$E_{\max}^{\text{measured}}$ über die gesamte Bandbreite des Spektrumanalysators gemessene Max- und Hold-Werte.

Den Beurteilungswert E_B erhält man durch Summierung aller Beiträge sämtlicher Netzwerkbetreiber und Dienste wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben. (Beispiel in Anhang B).

3.3 Konformitätsbewertung

Mit dieser Methode kann zwar die Konformität einer Anlage beurteilt, nicht aber die Nichtkonformität nachgewiesen werden:

- $E_B \leq E_{\text{limit}}$ Die Anlage erfüllt die Anforderungen.
- $E_B > E_{\text{limit}}$ Keine Beurteilung möglich. Zur Klärung ist eine code-selektive Messung erforderlich.

3.4 Diskussion

Die frequenzselektive Messmethode ermöglicht keine abschliessende Beurteilung der Nichtkonformität einer Anlage gegenüber den Vorgaben. Das Verfahren schätzt die hochgerechnete elektrische Feldstärke zu hoch ein. Diese Überschätzung liegt in folgenden Faktoren begründet:

- Die Synchronisierungssignale enthalten zwar Kennungsinformationen der Zelle, herkömmliche Spektrumanalysatoren können diese jedoch nicht dekodieren. Die hier vorgeschlagene Hochrechnung basiert somit auf den Maximalwerten aller Hochrechnungsfaktoren, die dann auf jede einzelne Zelle der Anlage Anwendung finden.
- Der hier verwendete Hochrechnungsfaktor wird so definiert, als ob die Synchronisierungssignale von einem einzigen Antennenport stammen würden. Falls die Synchronisierungssignale von zwei Antennenports gesendet werden (was gemäss [6] ebenfalls möglich ist), kann das entsprechende Synchronisierungssignal in Abhängigkeit der Polarisation der Sendeelemente an beiden Antennenports am Messort als konstruktive Summierung beider Synchronisierungssignale gewertet werden. Um diesem „Boostfaktor“ Rechnung zu tragen, sollte der Hochrechnungsfaktor theoretisch leicht reduziert werden, was aber in der Praxis nicht möglich ist. In der Folge ergibt sich eine geringfügige Überschätzung der Werte. Diese sollte in der Praxis jedoch vernachlässigbar sein, vor allem (im Falle einer

Antenne mit zwei Ports) bei einer senkrechten Polarisierung der Strahlung beider Antennenports.

- Die Skalierung des maximalen Signalwerts über die gesamte Messbandbreite $E_{i,\max}^{\text{measured}}$ auf die elektrische Feldstärke E_{\max}^{SS} der Synchronisierungssignale „pro Resource-Element“ erfolgt unabhängig von der Auflösungsbandbreite des Spektrumanalysators. Ist die Auflösungsbandbreite grösser als 945 kHz, resultiert eine geringfügige Überschätzung.

3.5 Einschränkungen

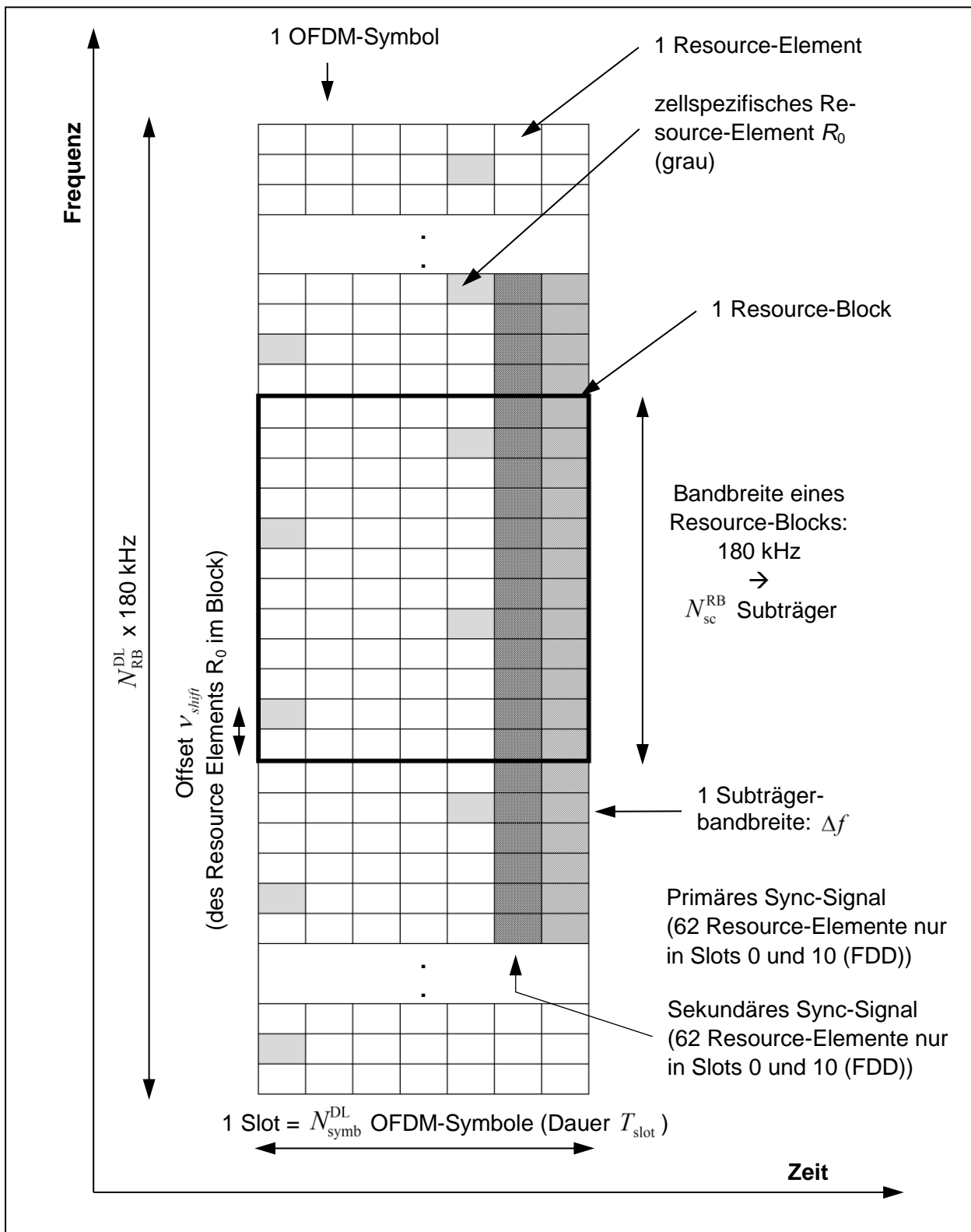
Für diese Methode gelten die gleichen Einschränkungen wie für das code-selektive Verfahren.

4 Referenzen

1. „Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)“ (Dokument Nr. 814.710), Dezember 1999. Erhältlich in Deutsch, Französisch, Italienisch und in einer nichtverbindlichen Fassung in Englisch.
2. Messempfehlung für GSM: „Nichtionisierende Strahlung: Mobilfunk-Basisstationen (GSM) - Messempfehlung“, 2002. Erhältlich unter www.bafu.admin.ch/elektrosmog.
3. Messempfehlung für GSM mit Edge: „NIS-Abnahmemessung bei GSM-Basisstationen mit EDGE-Betrieb“, Entwurf vom 28.11.2005, November 2011. Erhältlich unter www.bafu.admin.ch/elektrosmog.
4. Messempfehlung für UMTS: „Nichtionisierende Strahlung: Mobilfunk-Basisstationen (UMTS – FDD), Entwurf vom 17.9.2003“, September 2003. Erhältlich unter www.bafu.admin.ch/elektrosmog.
5. Messempfehlung für Rundfunk und Funkruf: „Nichtionisierende Strahlung: Rundfunk- und Funkrufsendeanlagen, Vollzugsempfehlung zur NISV, Entwurf vom 6.7.2005“, Juli 2005. Erhältlich unter www.bafu.admin.ch/elektrosmog.
6. ETSI TS 136 211, „LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 10.3.0 Release 10)“, Oktober 2011.
7. ETSI TS 136 213, „LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 9.2.0 Release 9)“, Juni 2010.
8. ETSI TS 136 214, „LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 9.2.0 Release 9)“, Juni 2010.
9. C. Bornkessel, „Messung und Dokumentation des Signalverlaufs von LTE-Signalen“, IMST GmbH, Abschlussbericht 5. Mai 2010.
10. C. Bornkessel, „Entwurf eines vereinfachten Mess- und Hochrechnungsverfahrens für Expositionen durch LTE-Basisstationen“, IMST GmbH, Abschlussbericht 16. Juni 2010.
11. JCGM 106, „Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment“, Mai 2009.

5 Anhang A: Grundlagen von LTE (zur Information)

5.1 Downlink Resource Grid



Figur A1: LTE Downlink Resource Grid (übernommen aus [6]).

Legende

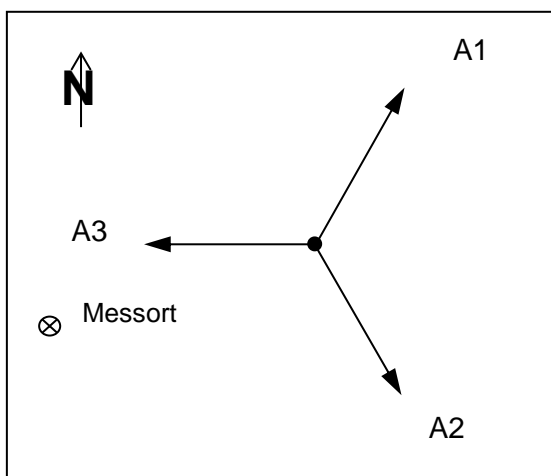
| | |
|-------------------------------|--|
| Δf | Subträgerabstand gleich 15 kHz (Hinweis: 7,5 kHz ist auch für MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast Service) geplant). In diesem Fall stehen keine CRS (Zellreferenzsignale) zur Verfügung. |
| T_{slot} | Slot-Dauer: 0,5 ms für FDD. |
| $N_{\text{symp}}^{\text{DL}}$ | Anzahl OFDM-Symbole in einem Downlink-Slot: 7 oder 6 je nach Konfiguration (normales Cycling Prefix oder erweitertes Cycling Prefix, siehe Abschnitt 6.2.3 von [6]). |
| $N_{\text{RB}}^{\text{DL}}$ | Bandbreitenkonfiguration für Downlink, ausgedrückt in Mehrfachen von $N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$. $N_{\text{RB}}^{\text{DL}}$ liegt zwischen 6 und 110: $6 \leq N_{\text{RB}}^{\text{DL}} \leq 110$ |
| $N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$ | Grösse der Resource-Blöcke im Frequenzbereich, ausgedrückt als Anzahl Subträger. $N_{\text{sc}}^{\text{RB}} = 12$ bei $\Delta f = 15$ kHz. |
| V_{shift} | Zellspezifische Frequenzverschiebung abhängig von der Zellen-ID-Nummer. |

6 Anhang B: Beispiele

Ein Netzbetreiber bietet mit drei Antennen auf einem Funkmast LTE-Dienste an. Alle drei Zellen senden im Band von 1800 MHz. Die Hauptachsen der Antenne stehen wie in der Abbildung unten gezeigt in einem Abstand von 120 Grad. Die technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 1 aufgeführt. Gemäss NISV gilt für die Anlage ein Anlagegrenzwert von 6 V/m.

| Zellen-ID | Antenne | Ausrichtung Hauptträger | LTE Downlink | Aktuelle Sendeleistung (ERP) eines Resource-Elements R_0 | Aktuelle Sendeleistung (ERP) eines Resource-Elements SS | Total bewilligte Sendeleistung (ERP) | Hochrechnungsfaktor $K_i^{R_0}$ | Hochrechnungsfaktor K_i^{SS} |
|-----------|---------|-------------------------|--|--|---|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 6 | 1 | 30° | Mitte: 1838 MHz Kanalbandbreite 10,0 MHz Anzahl OFDM-Symbole pro Slot: $N_{\text{symp}}^{\text{DL}} = 7$ | 333 mW | 333 mW | 400 W | 34,64 | 34,64 |
| 7 | 2 | 150° | | 333 mW | 333 mW | 200 W | 25,00 | 25,00 |
| 8 | 3 | 270° | | 333 mW | 333 mW | 200 W | 25,00 | 25,00 |

Tabelle 1: Technische Daten der Anlage. (Hinweis: Eine Systembandbreite von 9 MHz = 600 x 15 kHz bedeutet eine Kanalbandbreite von ungefähr 10 MHz).



Figur 1: Plan der Anlage mit den drei Antennen und der Lage des Messortes

6.1 Die code-selektive Messung

Mit einer code-selektiven Messeinrichtung kann die elektrische Feldstärke jeder Zelle am Messort separat gemessen werden. Für jedes CRS_0 -Signal wird die örtlich höchste Feldstärke $E_{i,\text{max}}^{R_0}$ innerhalb des Messvolumens erfasst. Die Hochrechnungsfaktoren sowie die hochgerechneten Werte der Feldstärken finden sich in Tabelle 2.

| Zellen-ID | Antenne | Messwert $E_{i,\text{max}}^{R_0}$ | Hochrechnungsfaktor | Hochgerechnete elektrische |
|-----------|---------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|
|-----------|---------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|

| | | | $K_i^{R_o}$ | Feldstärke $E_{e,j}$ |
|---|---|----------|-------------|-------------------------|
| 6 | 1 | 6 mV/m | 34,64 | 0,21 V/m |
| 7 | 2 | 16 mV/m | 25,00 | 0,40 V/m |
| 8 | 3 | 151 mV/m | 25,00 | 3,78 V/m |

Die für den massgebenden Betriebszustand hochgerechnete elektrische Feldstärke beträgt

$$E_B = E_h = \sqrt{\sum_i E_{i,h}^2} = \sqrt{0,21^2 + 0,40^2 + 3,78^2} \text{ V/m} = 3,80 \text{ V/m}$$

Dieser Wert liegt unter dem Grenzwert von 6 V/m. Der Anlage gilt somit als konform.

6.2 Die frequenzselektive Messung

Ein Spektrumanalysator mit einer Auflösungsbandbreite von 1 MHz misst eine maximale elektrische Feldstärke von 1.25 V/m (über die gesamte Bandbreite gemessen). Das elektrische Feld pro Resource-Element wird wie folgt bestimmt:

$$E_{\max}^{SS} = E_{\max}^{\text{measured}} \cdot \sqrt{\frac{1}{62}} = \frac{1,25 \text{ V/m}}{\sqrt{62}} = 0,16 \text{ V/m}$$

Der Hochrechnungsfaktor ist der Maximalwert aller Hochrechnungsfaktoren K_i^{SS} von Tabelle 1, in unserem Beispiel: 34.64. Die hochgerechnete Feldstärke beträgt somit

$$E_B = E_h = \max_i(K_i^{SS}) \cdot E_{\max}^{SS} = 34,64 \cdot 0,16 \text{ V/m} = 5,54 \text{ V/m}$$

Der Hochrechnungswert der elektrischen Feldstärke für den massgebenden Betriebszustand liegt unter dem Anlagengrenzwert von 6 V/m. Der Anlage gilt somit als konform.

7 Anhang C: Definitionen, Symbole und Abkürzungen

| | |
|------------------|---|
| CRS | Zellspezifisches Referenzsignal |
| CRS ₀ | Zellspezifisches Referenzsignal gesendet auf Antennenport 0 |
| CRS ₁ | Zellspezifisches Referenzsignal gesendet auf Antennenport 1 |
| EDGE | Enhanced Data Rates for GSM Evolution |
| ERP | Effective Radiated Power (effektive Strahlungsleistung) |
| FDD | Frequency Division Multiplexing |
| GSM | Global System for Mobile Communication |

| | |
|------------------------------------|---|
| ICNIRP | International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| LTE | Long-Term-Evolution |
| OFDM | Orthogonal Frequency-Division Multiplexing |
| NISV | Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung |
| PSS | Primäres Synchronisierungssignal |
| R_0 | Resource-Element für die CRS-Übertragung auf Antennenport 0 |
| SSS | Sekundäres Synchronisierungssignal |
| TDD | Time Division Multiplex |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| E_B | Beurteilungswert der Anlage in V/m |
| E_{limit} | Grenzwert für die elektrische Feldstärke, in V/m |
| E_h | Hochgerechnete LTE-Feldstärke, in V/m |
| $E_{i,h}$ | Hochgerechneter Messwert der Feldstärke von Zelle i , in V/m |
| $E_{i,\text{max}}^{R_0}$ | Maximale (im Messvolumen gemessene) elektrische Feldstärke pro Resource-Element des Signals CRS_0 von Zelle i , in V/m |
| $E_{\text{max}}^{\text{SS}}$ | Maximale (im Messvolumen gemessene) elektrische Feldstärke pro Resource-Element der Synchronisierungssignale, in V/m |
| $E_{\text{max}}^{\text{measured}}$ | Über die gesamte Bandbreite des Spektrumanalysators gemessene Max- und Hold-Werte, in V/m |
| $E_{\text{Netz } j,h}$ | Hochgerechnete Feldstärkenmesswerte für Netz j |
| i | Identifikationsnummer der Zelle der Basisstation |
| $K_i^{R_0}$ | Hochrechnungsfaktor für Zelle i basierend auf Zellreferenzsignal R_0 |
| K_i^{SS} | Hochrechnungsfaktor für Zelle i basierend auf Synchronisierungssignalen |
| n | Anzahl Zellen der Basisstation, bzw. der Anlage |
| $N_{\text{symb}}^{\text{DL}}$ | Anzahl OFDM-Symbole in einem Downlink-Slot |

| | |
|---------------|--|
| N_{RB}^{DL} | Bandbreitenkonfiguration für Downlink, ausgedrückt in Mehrfachen von N_{sc}^{RB} |
| N_{sc}^{RB} | Grösse der Resource-Blöcke im Frequenzbereich, ausgedrückt als Anzahl Subträger |
| $P_i^{R_0}$ | Aktuelle Sendeleistung (ERP) pro Resource-Elemente des Referenzsignals R_0 von Zelle i in W |
| P_i^{PSS} | Aktuelle Sendeleistung (ERP) pro Resource-Element des primären Synchronisierungssignals von Zelle i in W . |
| P_i^{SSS} | Aktuelle Sendeleistung (ERP) pro Resource-Element des sekundären Synchronisierungssignals von Zelle i in W . |
| $P_{i,bew}$ | Bewilligte LTE-Sendeleistung (ERP) für Zelle i in W |
| T_{slot} | Dauer des Zeitschlitzes (Slot) |
| Δf | Subträgerabstand |
| ν_{shift} | Zellspezifische Frequenzverschiebung |