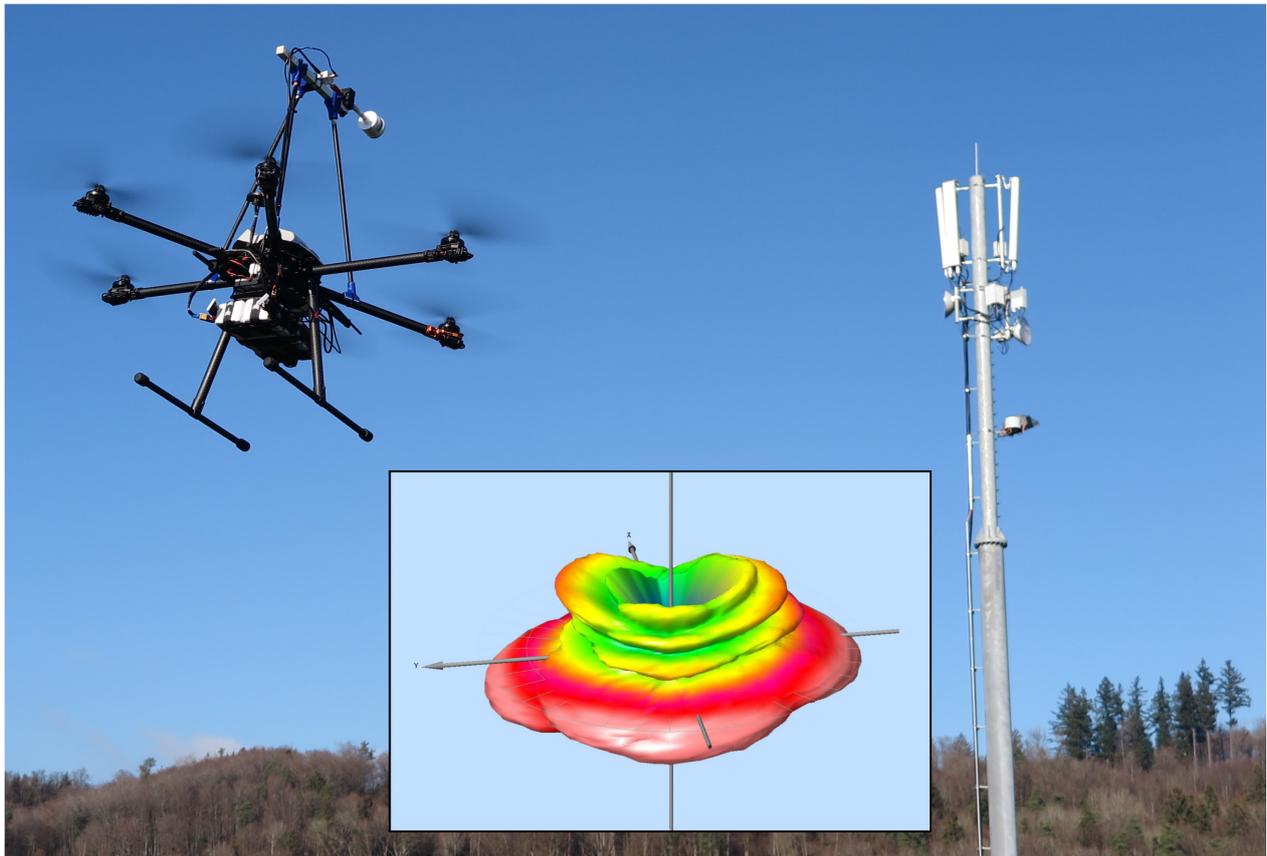


## Pilotstudie für Emissionsmessungen an einer Mobilfunksendeanlage mittels Flugdrohne



im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

## Impressum

**Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm und NIS, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

**Auftragnehmer:** STRAPAG Strahm und Partner AG

**Autoren:** Markus Müller, Jürg Burkhard

**Begleitung BAFU:** Andreas Siegenthaler

**Hinweis:** Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Management Summary</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Auftrag</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Messdrohne</b> .....	<b>8</b>
4.1	Aufbau Messsystem .....	9
4.1.1	Schema Messaufbau .....	9
4.1.2	Scanner .....	10
4.1.3	Antenne .....	11
4.1.4	GPS / RTK .....	12
4.1.5	Software.....	13
<b>5</b>	<b>Messunsicherheiten</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Messstandort</b> .....	<b>15</b>
6.1	Evaluation Messstandort .....	15
6.2	Angaben Messstandort .....	16
<b>7</b>	<b>Messungen</b> .....	<b>17</b>
7.1	Messparameter .....	17
7.1.1	RF-Parameter LTE .....	17
7.1.2	RF Parameter UMTS .....	17
7.1.3	Positions-Parameter .....	17
7.1.4	Herleitung der Max. ERP .....	18
7.2	Messflüge.....	19
<b>8</b>	<b>Messergebnisse LTE 800</b> .....	<b>20</b>
8.1	LTE 800 Sektor A.....	20
8.1.1	VRP Sektor A.....	20
8.1.2	HRP Sektor A .....	21
8.2	LTE 800 Sektor B.....	22
8.2.1	VRP Sektor B.....	22
8.2.2	HRP Sektor B .....	23
8.3	LTE 800 Sektor C.....	24
8.3.1	VRP Sektor C .....	24
8.3.2	HRP Sektor C .....	25
8.4	LTE 800 ERP .....	25
8.5	Kommentare Messergebnisse LTE 800 .....	26
8.5.1	Sektor A .....	26
8.5.2	Sektor B .....	26
8.5.3	Sektor C.....	26
<b>9</b>	<b>Messergebnisse LTE 1800</b> .....	<b>28</b>
9.1	LTE 1800 Sektor A.....	28
9.1.1	VRP Sektor A.....	28
9.1.2	HRP Sektor A .....	29
9.2	LTE 1800 Sektor B.....	30
9.2.1	VRP Sektor B.....	30
9.2.2	HRP Sektor B .....	31
9.3	LTE 1800 Sektor C.....	32

9.3.1	VRP Sektor C .....	32
9.3.2	HRP Sektor C .....	33
9.4	LTE 1800 ERP .....	33
9.5	Kommentare Messergebnisse LTE 1800 .....	34
9.5.1	Sektor A .....	34
9.5.2	Sektor B .....	34
9.5.3	Sektor C .....	34
<b>10</b>	<b>Messergebnisse UMTS 900 .....</b>	<b>36</b>
10.1	UMTS 900 Sektor A .....	36
10.1.1	VRP Sektor A .....	36
10.1.2	HRP Sektor A .....	37
10.2	UMTS 900 Sektor B .....	38
10.2.1	VRP Sektor B .....	38
10.2.2	HRP Sektor B .....	39
10.3	UMTS 900 Sektor C .....	40
10.3.1	VRP Sektor C .....	40
10.3.2	HRP Sektor C .....	41
10.4	UMTS 900 ERP .....	41
10.5	Kommentare der Messergebnisse UMTS 900 .....	42
10.5.1	Sektor A .....	42
10.5.2	Sektor B .....	42
10.5.3	Sektor C .....	42
<b>11</b>	<b>3D-Diagramme .....</b>	<b>44</b>
11.1	Legende .....	44
11.2	LTE 800 .....	44
11.2.1	Sektor A .....	44
11.2.2	Sektor B .....	45
11.2.3	Sektor C .....	45
11.2.4	Summendiagramm Sektor A, B, C .....	46
11.3	LTE 1800 .....	47
11.3.1	Sektor A .....	47
11.3.2	Sektor B .....	47
11.3.3	Sektor C .....	48
11.3.4	Summendiagramm Sektor A, B, C .....	49
11.4	UMTS 900 .....	50
11.4.1	Sektor A .....	50
11.4.2	Sektor B .....	50
11.4.3	Sektor C .....	51
11.4.4	Summendiagramm Sektor A, B, C .....	52
<b>12</b>	<b>Erkenntnisse .....</b>	<b>53</b>
<b>13</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>54</b>
13.1	Abkürzungsverzeichnis .....	54
13.2	Abbildungsverzeichnis .....	55
13.3	Tabellenverzeichnis .....	55

Version	Datum	Name	Änderung
1.0	23.01.2019	J. Burkhard	Erste Version
1.1	15.01.2019	M. Müller	Zweite Version
1.2	02.04.2019	M. Müller	Dritte Version
1.3	16.08.2019	J. Burkhard	Ergänzungen

## 1 Management Summary

Dank moderner und kompakter SDR-Scanner (software defined radio), welche an ein D-GPS System (differential global positioning System) gekoppelt sind, werden mittels Flugdrohne exakte und stabile Messungen an Orten möglich, welche mit bodengestützten Messsystemen nicht durchführbar sind.

Die Ergebnisse dieser Pilotstudie können wie folgt zusammengefasst werden.

- Dreidimensionale Antennendiagramme konnten gemessen und dargestellt werden.
- Vertikale- und horizontale Antennendiagramme wurden erstellt und mit den Herstellerdiagrammen verglichen. Dabei wurde im Sektor C eine Abweichung des Antennentilts um rund 3° festgestellt. Der mechanische Tilt der Antenne wurde überprüft und entsprach den Vorgaben. Der Defekt der Antenne liess sich mittels herkömmlicher mechanischer Überprüfung nicht feststellen.

Allenfalls kann der Defekt durch die Alterung der Antenne erklärt werden. Eine schlüssige Erklärung wird jedoch erst möglich, wenn die Antenne ersetzt wird. Ein Ersatz ist gemäss Sunrise im Rahmen eines Standortumbaus in den nächsten Jahren geplant.

- Die Sendeleistungen ERP (effective radiated power) wurden verifiziert und werden in folgender Tabelle zusammengefasst

Band	Sektor	ERP gemessen	ERP gem. Betreiber	Delta
LTE800	A	53.58 dBm	54.6 dBm	-1.02 dB
	B	53.74 dBm	54.6 dBm	-0.86 dB
	C	54.37 dBm	54.6 dBm	-0.23 dB
LTE1800	A	58.34 dBm	59.1 dBm	-0.76 dB
	B	57.29 dBm	59.1 dBm	-1.81 dB
	C	58.92 dBm	59.1 dBm	-0.18 dB
UMTS900	A	57.41 dBm	57.4 dBm	0.01 dB
	B	57.31 dBm	57.4 dBm	-0.09 dB
	C	57.03 dBm	57.4 dBm	-0.37 dB

**Tabelle 1: Zusammenfassung ERP**

- Mittels isotroper Messantenne konnten alle abgestrahlten Polarisationen erfasst werden.
- Messunsicherheiten wurden in Zusammenarbeit mit METAS definiert.

Die Messdaten können auch in einem elektronischen Format zur Verfügung gestellt werden, so dass diese in ein Funkplanungs- oder NIS (nicht ionisierende Strahlung) Berechnungstool

eingelassen werden können, um entsprechende Nachberechnungen mit realen Daten durchzuführen.

Die im vorliegenden Bericht aufgeführten Ergebnisse zeigen auf, dass sich eine Flugdrohne zur Messung und Überprüfung der Emissionen und Installationen von Mobilfunksendeanlagen optimal eignet.

## 2 Einleitung

Die elektrische Feldstärke von Mobilfunksendeanlagen wird gemäss der «Vollzugsempfehlung zur NISV – Mobilfunk- und WLL-Basisstationen», BUWAL (heute BAFU), 2002 (inkl. aller Nachträge) berechnet. Das relativ einfache Berechnungsmodell beruht auf der Freiraumausbreitung des elektromagnetischen Feldes; Reflexionen und Beugungen werden nicht berücksichtigt.

Die ins Berechnungsmodell eingesetzten Emissionsparameter einer Mobilfunksendeanlage werden vom Inhaber in einem Standortdatenblatt deklariert. Dies sind insbesondere pro Frequenzband die zu bewilligende äquivalente Sendeleistung ERP, die Position, die mechanische und elektrische Ausrichtung der Antennen und deren räumliche Abstrahlungseigenschaften, die auf vom Antennenhersteller zur Verfügung gestellten horizontalen und vertikalen Antennendiagrammen beruhen.

Eine unabhängige Überprüfung der Position und Ausrichtung von Antennenanlagen sowie deren effektiv abgestrahlten Leistungen sind bis heute bloss bedingt bzw. nur mit aufwendigen Besteigungen von Sendemasten und entsprechenden Kabelmessungen möglich. Auch wurden unseres Wissens 3-dimensionale Antennendiagrammen ausserhalb des Labors bisher nicht messtechnisch erfasst. Im Rahmen von Grenzwert-Überprüfungen dienen bis heute nur punktuelle Messungen. Immissionsmessungen der elektrischen Feldstärke zeigen teilweise Abweichungen gegenüber den rechnerischen Prognosen.

Die räumlichen Abstrahlungseigenschaften können von den im Standortdatenblatt deklarierten Angaben ausfolgenden Gründen abweichen:

- Installations- und Materialfehler an Antennen- und HF-Kabelanlagen
- Falsche Einstellungen an den aktiven Sendekomponenten
- Nichtberücksichtigung von Reflexionen

Die Firmen STRAPAG und METEOTEST haben deshalb dem BAFU am 04.04.2018 Möglichkeiten zur Messung der Emissionsparameter mittels ferngesteuerter Flugdrohnen vorgestellt.

## 3 Auftrag

Mittels Flugdrohne soll in dieser Pilotstudie die Machbarkeit und Aussagekraft folgender frequenzselektiver Emissionsmessungen eruiert und dargestellt werden:

- Bestimmung der dreidimensionalen Antennendiagramme von Antennen der Frequenzbänder 800, 900 und 1800 MHz. Diese Aufgabe wurde mit Hilfe der Firma PreHCM Services durchgeführt.
- Bestimmung der Abweichung der gemessenen Antennendiagramme von den Herstellerangaben (vertikale und horizontale Antennendiagramme).
- Bestimmen der aktuell eingestellten Sendeleistung ERP pro Funkdienst und Frequenzband; dabei sollen mindestens die in den Messempfehlungen von METAS und BAFU festgelegten Pilotkanäle (CPICH, RS) der Funkdienste gemessen werden. Bestimmung der Abweichung der vom Betreiber eingestellten Werte.
- Die Messung soll die abgestrahlten Polarisierungen derart berücksichtigen, dass die gesamte abgestrahlte Leistung erfasst wird.
- Detaillierte Berechnung der Messunsicherheit.

Ebenfalls Teile des Auftrags sind:

- Organisieren einer geeigneten Messumgebung bei mindestens einer Mobilfunkanlage und Koordination mit dem Inhaber der Anlage, inkl. Einholen der Emissionsparameter gemäss Standortdatenblatt und der aktuell eingestellten Sendeleistungen, Frequenzen und Antennenangaben.
- Einbezug der zuständigen kantonalen Fachstelle für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung.
- Vertrauliche Behandlung der Messergebnisse, sofern dies der Betreiber wünscht.

Die Ergebnisse des Auftrags sollen in einem Bericht an das BAFU festgehalten werden.

## 4 Messdrohne

Die Technologie unbemannter Luftfahrzeuge respektive Drohnen, hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung durchlaufen. Mit Hilfe von D-GPS wurde die hochgenaue Momentanposition von Drohnen ermöglicht, einer der wichtigsten Voraussetzungen, die Reproduzierbarkeit von Messflügen zu garantieren. Erst dank moderner und kompakter SDR-Scanner, welche an das D-GPS System gekoppelt sind, wurden exakte und stabile Messergebnisse an Orten möglich, welche mit bodengestützten Messsystemen nicht durchführbar sind. Im Rahmen verschiedener Projekte im Bereich der Funknetzplanung und NIS Berechnungen, gewann das Thema Messdrohne bei der Firma STRAPAG mehr und mehr an Bedeutung. Die von der Firma STRAPAG gebaute Drohne kann anwendungsspezifisch mit diversen Messgeräten ausgestattet werden, wie beispielsweise einem SDR Scanner für HF-Messungen. Dies ermöglicht Messungen an unzugänglichen Bereichen, wie Mobil- oder Broadcast Sendeanlagen, welche von bodengestützten Messsystemen nicht durchgeführt werden können.



Abbildung 1: Messdrohne

## 4.1 Aufbau Messsystem

### 4.1.1 Schema Messaufbau

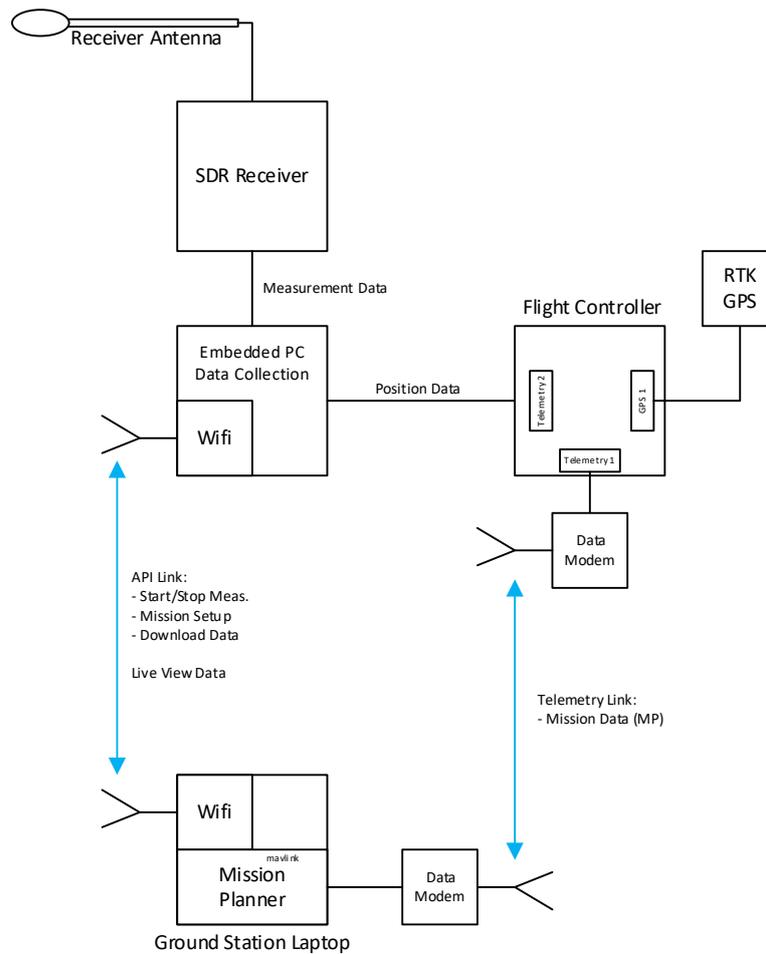


Abbildung 2: Messaufbau

## 4.1.2 Scanner

Der SDR-Scanner ermöglicht Messungen zwischen 10 MHz bis 6 GHz und ist in der Lage sämtliche bekannten Technologien wie UKW, DAB, DMR, TETRA, TETRAPOL, GSM, UMTS, LTE 4G und 5G zu messen bzw. zu demodulieren. Gesteuert wird der Scanner von einem On-Board Mini-PC, welcher die Messdaten mit den D-GPS Positionsdaten verknüpft und abspeichert.



Abbildung 3: SDR Scanner

Parameter	LTE	UMTS
Measurement Mode	Top N Signal	Top N Pilot
Channel Bandwidth	1.4 / 3 / 5 / 10 / 15 / 20 MHz	200 kHz / 3.84 MHz
Max Number of Channels	24	24
Measurement Rates	50 / sec (LTE-FDD)	50 / sec (High Dynamic)
Min. Detection Level	-140 dBm RSRP	-120 dBm RSCP
Relative Accuracy	+/- 1dB	+/- 1dB

Tabelle 2: Technische Daten SDR Scanner

## 4.1.3 Antenne

Die Antenne ist auf einem Gestell aus dielektrischem Material (Holz / Kunststoff) montiert, 50cm oberhalb der Drohne.



Abbildung 4: Messantenne

Parameter	Value
Antenna Sensor	Isotropic 3 Axis
Frequency Range	30 MHz – 6 GHz
Dynamic Range	1 mV/m – 60 V/m
Size	240 x 60 mm
Weight	105 g

Tabelle 3: Technische Daten Messantenne

## 4.1.4 GPS / RTK

Die Drohne verfügt über einen hochpräzisen RTK-GPS Empfänger mit eingebautem Kompass und Beschleunigungssensoren.

Eine sehr hohe Positionsgenauigkeit wird mittels Verwendung eines NTRIP Casters erreicht.

NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) ist die Bezeichnung für eine standardisierte Methode Differential-GPS-Daten (DGPS) über das Internet zu verteilen

Dabei werden von einer Referenzstation im näheren Umfeld laufend Live-Korrekturdaten via Bodenstation an die Drohne gesendet, was zu einer erheblichen Verbesserung der Positionsgenauigkeit führt.

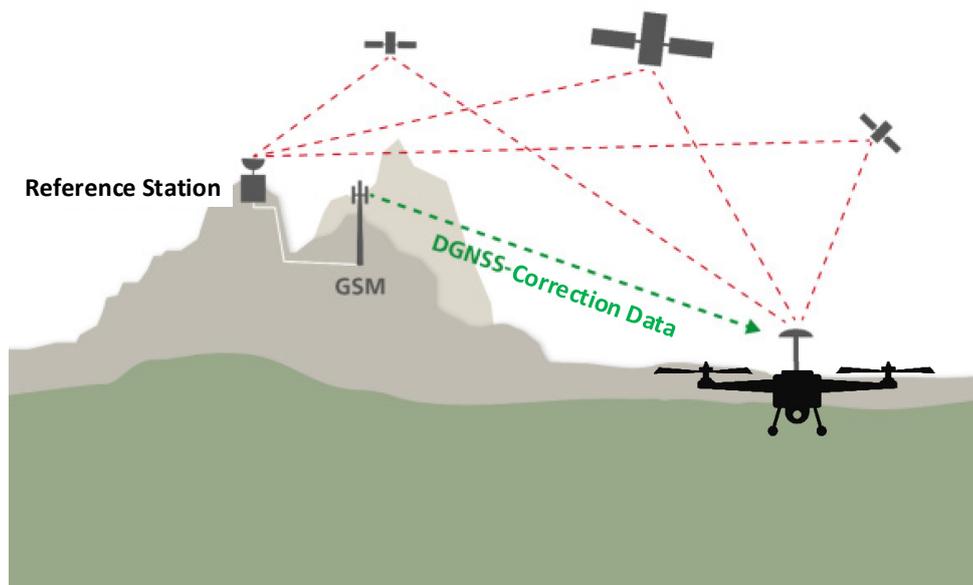


Abbildung 5: RTK GPS

## 4.1.5 Software

Die von STRAPAG entwickelte Software RDM (Radio Data Measurement) synchronisiert die Messwerte des Scanners mit Zeitstempel und Positionsdaten (Länge, Breite, Höhe und Azimut) des Flight Controllers der Drohne und legt diese in einem Logfile pro Messung ab

RDM ermöglicht einerseits die Konfiguration des Scanners (Dienst, Frequenzband, Anzahl der zu messenden Zellen, Start- und Stoppunkte), sowie die Kontrolle während des Flugs mittels Live View (Messwerte und Drohnenpositionen). Weiter können die geloggteten Daten mittels Mausclick vom Mini-PC auf der Drohne auf den Base Station Laptop heruntergeladen werden.

Der Messflug wird ebenfalls von der Bodenstation via Funkschnittstelle zur Drohne übertragen und programmiert.

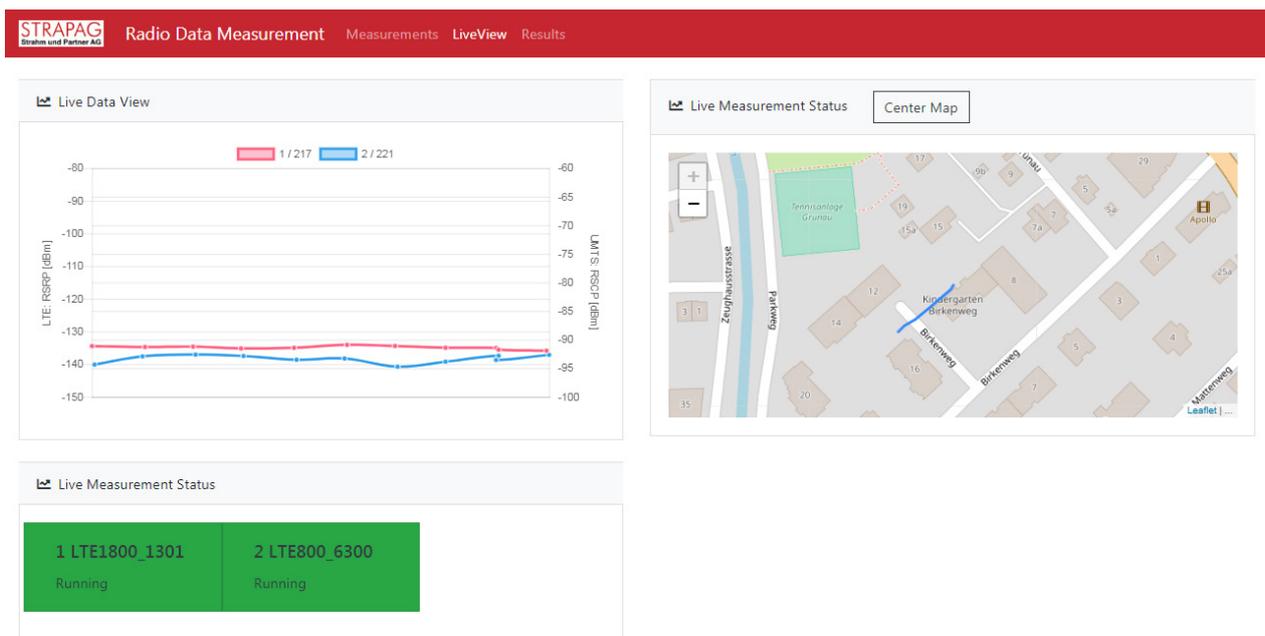


Abbildung 6: Darstellung der Messungen

## 5 Messunsicherheiten

Die Messunsicherheitsberechnungen wurden in Zusammenarbeit mit dem eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS) erarbeitet.

**Messunsicherheitsbudget LTE 800 / UMTS 900**

Quelle der Messungengenauigkeit	Wert	Einheit	Unsicherheitsbeitrag	Einheit	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor d	Sensitivitätskoeffizient	Einheit	U <sub>i</sub> (dB)
Position (Distanz)	20	m	0.2	dB	Triangular	2.45	0.08642748	dB/m	0.007
Streuungs-Effekte			1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.577
Receiver			1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.577
Feederkabel			0.1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.058
Antennen Gain			0.5	dB	Normal	2.00	1	dB	0.250
Isotropie			2	dB	Rectangular	1.73	1	dB	1.155
<b>Total</b>									<b>1.437</b>
<b>Erweiterte Ungenauigkeit, U = (k=2)* uc</b>									<b>2.875</b>

Tabelle 4: Messunsicherheiten LTE 800 / UMTS900

**Messunsicherheitsbudget LTE 1800**

Quelle der Messungengenauigkeit	Wert	Einheit	Unsicherheitsbeitrag	Einheit	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor d	Sensitivitätskoeffizient	Einheit	U <sub>i</sub> (dB)
Position (Distanz)	20	m	0.2	dB	Triangular	2.45	0.08642748	dB/m	0.007
Streuungs-Effekte			1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.577
Receiver			1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.577
Feederkabel			0.1	dB	Rectangular	1.73	1	dB	0.058
Antennen Gain			0.5	dB	Normal	2.00	1	dB	0.250
Isotropie			2.6	dB	Rectangular	1.73	1	dB	1.501
<b>Total</b>									<b>1.728</b>
<b>Erweiterte Ungenauigkeit, U = (k=2)* uc</b>									<b>3.456</b>

Tabelle 5: Messunsicherheiten LTE 1800

- u = Standardmessunsicherheit
- u<sub>i</sub> = individuelle Messunsicherheit
- uc = kumulierte Messunsicherheit
- U = berechnete Messunsicherheit
- k = Erweiterungsfaktor

Bei diesen Messunsicherheitsberechnungen fehlt die Beeinflussung der Drohnenstruktur auf das Messsystem. Diese Beeinflussungen werden im Q3 2019 im EMV-Labor des METAS für die relevanten Frequenzen durchgeführt.

## 6 Messstandort

### 6.1 Evaluation Messstandort

Als idealer Standort für diese Studie wurde der Sendestandort Diessbach bei Büren (Fussballplatz Eichi) ausgewählt. Der Betreiber dieses Standortes ist Sunrise. Die Gründe für die Wahl dieses Standortes sind:

- Freies Feld, keine Hindernisse
- Relevante Frequenzbänder / Technologien vorhanden
- Keine Lärmbelästigung der Anwohner
- Nähe zu STRAPAG-Sitz in Lyss
- Volle Kooperation des Betreibers

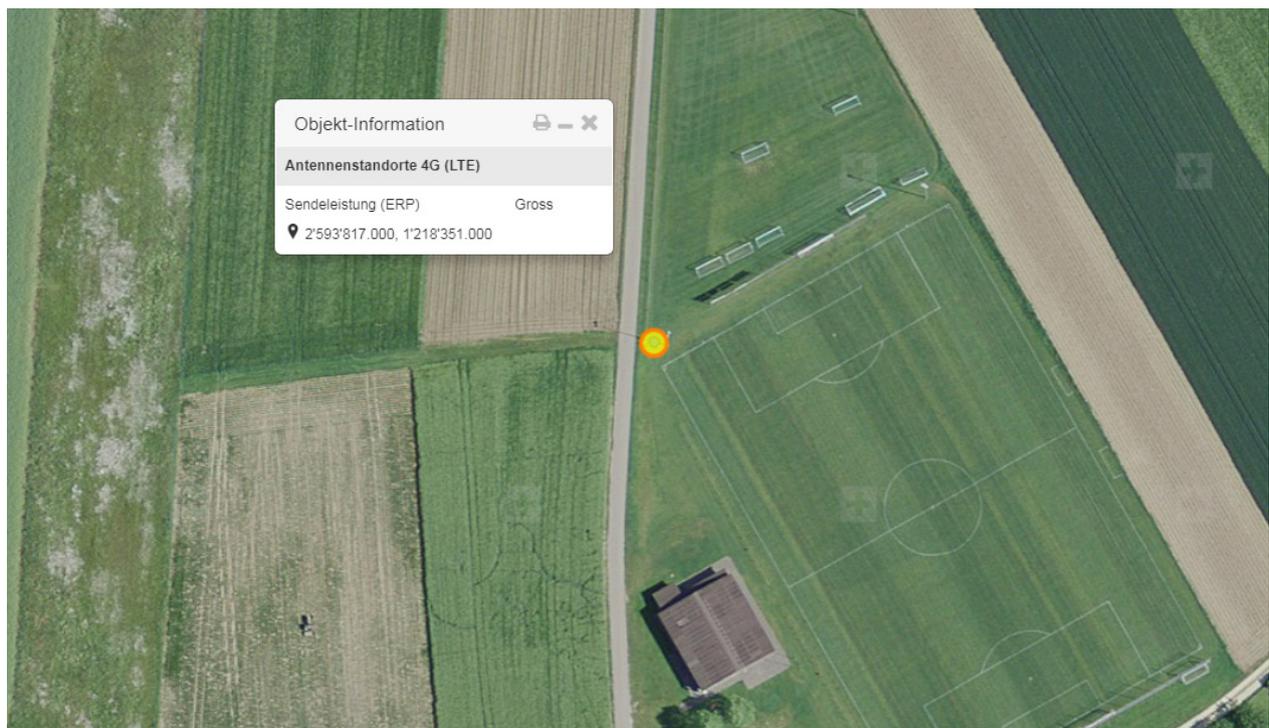


Abbildung 7: Messstandort Lufbild

## 6.2 Angaben Messstandort

Site ID BE699-2  
 Site Name Diessbach bei  
 Büren  
 Longitude 47.11611500  
 Latitude 7.35717580  
 Höhe über Meer 446.94 müM

Band	Sektor	Azimut	Höhe	E/UARFCN	Center Freq.	Cell ID	ERP	El. Tilt	Mech. Tilt
LTE 800 (Band 20)	A	90 °	19.3 müG	6200	796.0 MHz	334	54.6 dBm	0 °	-4 °
	B	190 °	19.3 müG	6200	796.0 MHz	333	54.6 dBm	-2 °	-4 °
	C	290 °	19.3 müG	6200	796.0 MHz	335	54.6 dBm	-10 °	-4 °
LTE 1800 (Band 3)	A	90 °	19.3 müG	1850	1870.0 MHz	494	59.1 dBm	0 °	-4 °
	B	190 °	19.3 müG	1850	1870.0 MHz	493	59.1 dBm	0 °	-4 °
	C	290 °	19.3 müG	1850	1870.0 MHz	489	59.1 dBm	-6 °	-4 °
UMTS 900 (Band 8)	A	90 °	19.3 müG	2963	932.6 MHz	259	57.4 dBm	0 °	-4 °
	B	190 °	19.3 müG	2963	932.6 MHz	181	57.4 dBm	-2 °	-4 °
	C	290 °	19.3 müG	2963	932.6 MHz	199	57.4 dBm	-10 °	-4 °

Tabelle 6: Angaben Messstandort

## 7 Messungen

### 7.1 Messparameter

Folgende Parameter werden messtechnisch geloggt:

#### 7.1.1 RF-Parameter LTE

- Channel Number EARFCN
- Cell ID (PCI)
- RS-RP
- RS-RQ
- RS-CINR

#### 7.1.2 RF Parameter UMTS

- Channel Number UARFCN
- Cell ID (Scrambling Code)
- RS-CP (EC)
- EC-I0
- I0
- SIR

#### 7.1.3 Positions-Parameter

- GPS Timestamp (UTC)
- Latitude
- Longitude
- LV95 Y
- LV95 X
- Absolute Altitude (Höhe über Meer)
- Relative Altitude (Höhe über Grund ab Startposition)
- Heading (Ausrichtung der Drohne)
- Inverted Heading (Ausrichtung der Sendeantenne in Richtung Drohne)

## 7.1.4 Herleitung der Max. ERP

Die ERP (Effective Radiated Power) ist die totale abgestrahlte Leistung pro Band, Dienst und Sektor. Die Max. ERP bezeichnet die abgestrahlte Leistung, wenn der gesamte Kanal (LTE oder UMTS) voll belegt ist.

Die Max ERP wird aus dem gemessenen Empfangspegel (Bsp. LTE: **RS-RP**) unter Berücksichtigung folgender Grössen berechnet:

- Free Space Loss **FSPL** (Freiraumdämpfung zwischen Sendeantenne und Empfangsantenne)
- Kabeldämpfung **CL** (Dämpfung des Messkabels im Messaufbau)
- Antennengewinn **ANTGAIN**
- Faktor **f** zur Umrechnung der Reference Signal Leistung auf die Total Channel Power

Hierzu ergibt sich folgende Formel

$$ERP [dBm] = RS-RP [dBm] - FSPL [dB] + CL [dB] - ANTGAIN [dBd] + f [dB]$$

Wobei der Faktor **f** bei **LTE** aus der Kanalbreite, der Anzahl Ressource Blocks **RB** und der Anzahl Subcarrier **SC** wie folgt berechnet wird:

LTE BW	No of RB's	SC / RB	SCtot	f = 10*LOG10(SCtot)
1.4 MHz	7	12	84	19.24 dB
3 MHz	15	12	180	22.55 dB
5 MHz	25	12	300	24.77 dB
10 MHz	50	12	600	27.78 dB
15 MHz	75	12	900	29.54 dB
20 MHz	100	12	1200	30.79 dB

Tabelle 7: Berechnung ERP

Bei **UMTS** beträgt der Faktor **f** zwischen RSCP und Total Channel Power **10 dB**

## 7.2 Messflüge

Die Flugroute wird unter Berücksichtigung folgender Parameter definiert.

- Art der Messflüge (bei z.B 3D Messflügen muss ein möglichst umfanglicher Bereich abgeflogen werden).
- Umgebung, Hindernisse durch Gebäude, Bäume, etc.
- Montage der Antennensektoren (Azimut, Tilt, Höhe)
- Abgestrahlte Leistung ERP

Um eine optimale Flugroute für die Messungen zu eruieren, wurden etliche Testszenarien mit verschiedenen Flügen durchgeführt. Am Ende wurde eine Flugroute definiert, welche ein Optimum zwischen Anzahl Messpunkten und Flugdauer sicherstellt.

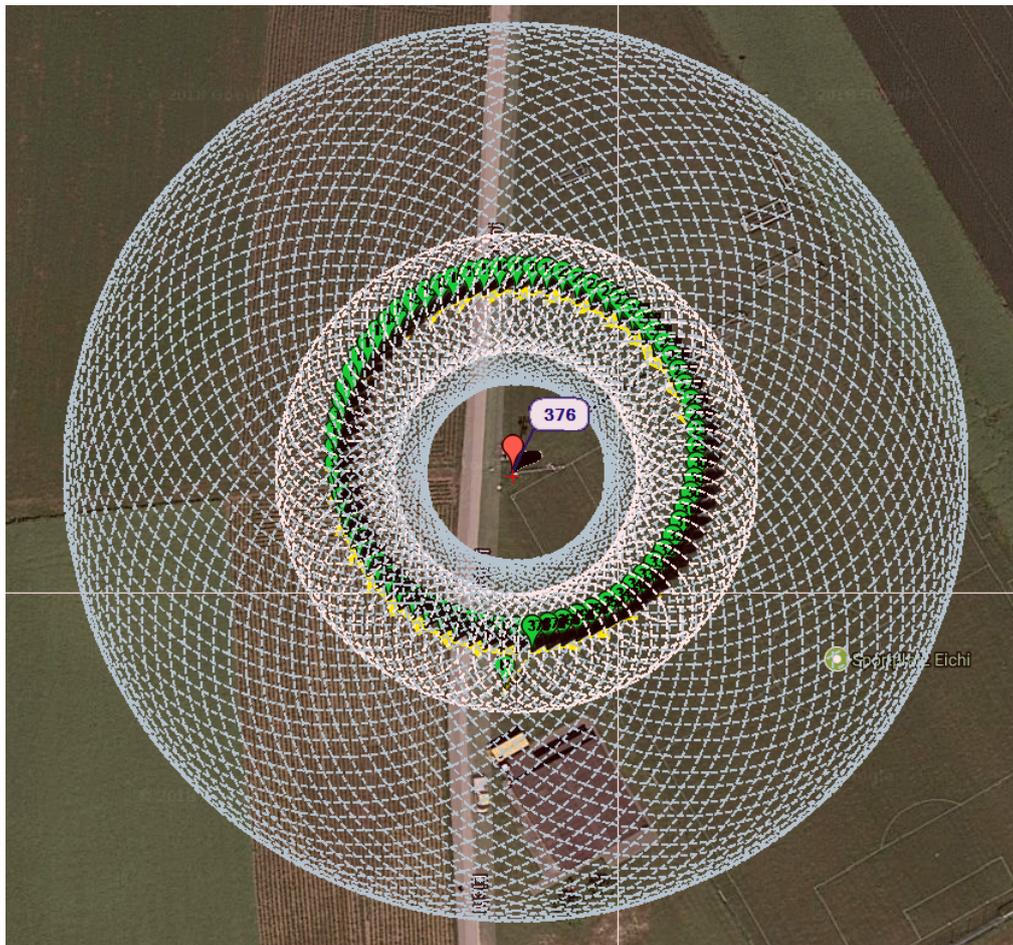


Abbildung 8: Visualisierung des Flugplanes

## 8 Messergebnisse LTE 800

### 8.1 LTE 800 Sektor A

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
6200	334	90°	-4°	0°

Tabella 8: Übersicht LTE800 Sektor A

#### 8.1.1 VRP Sektor A

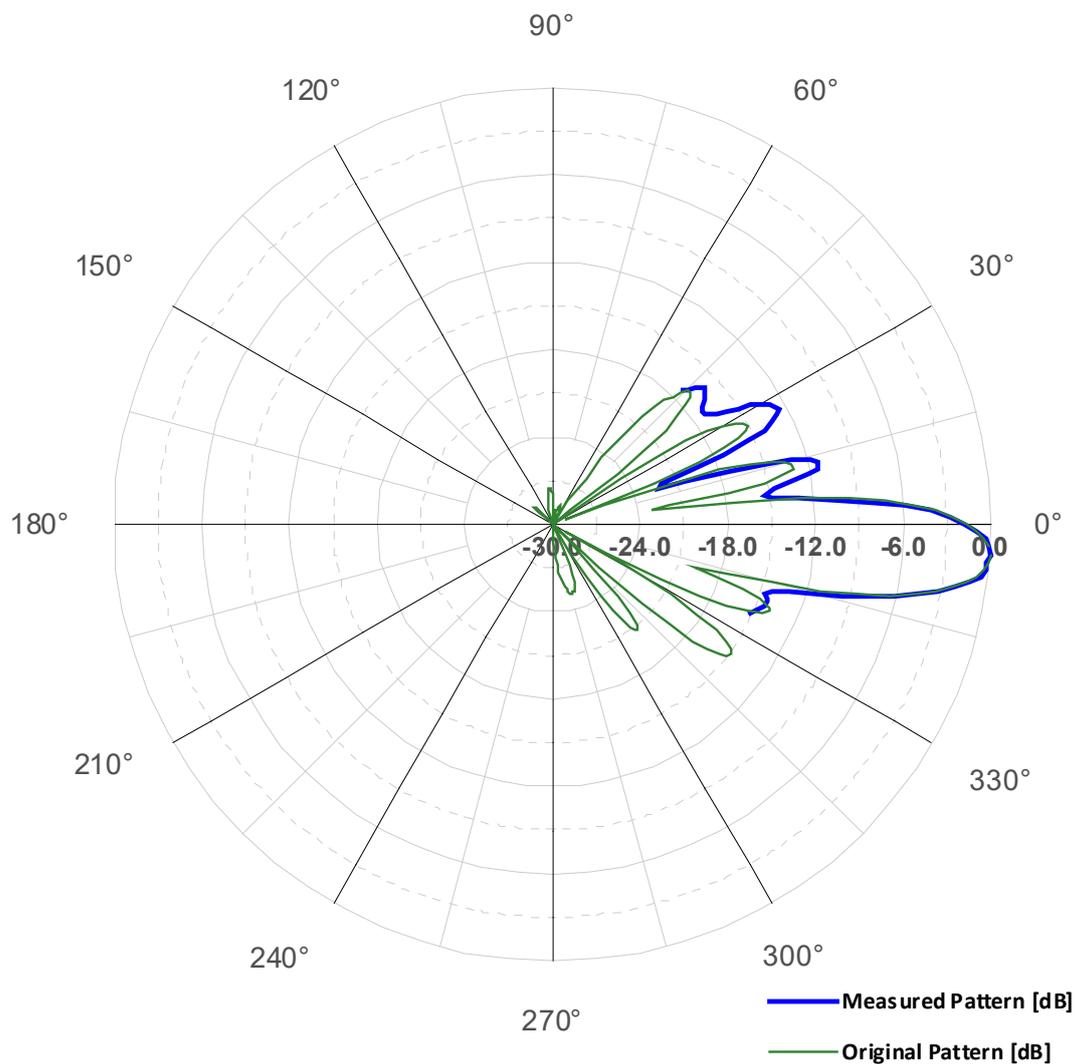


Abbildung 9: LTE800 Sektor A VRP

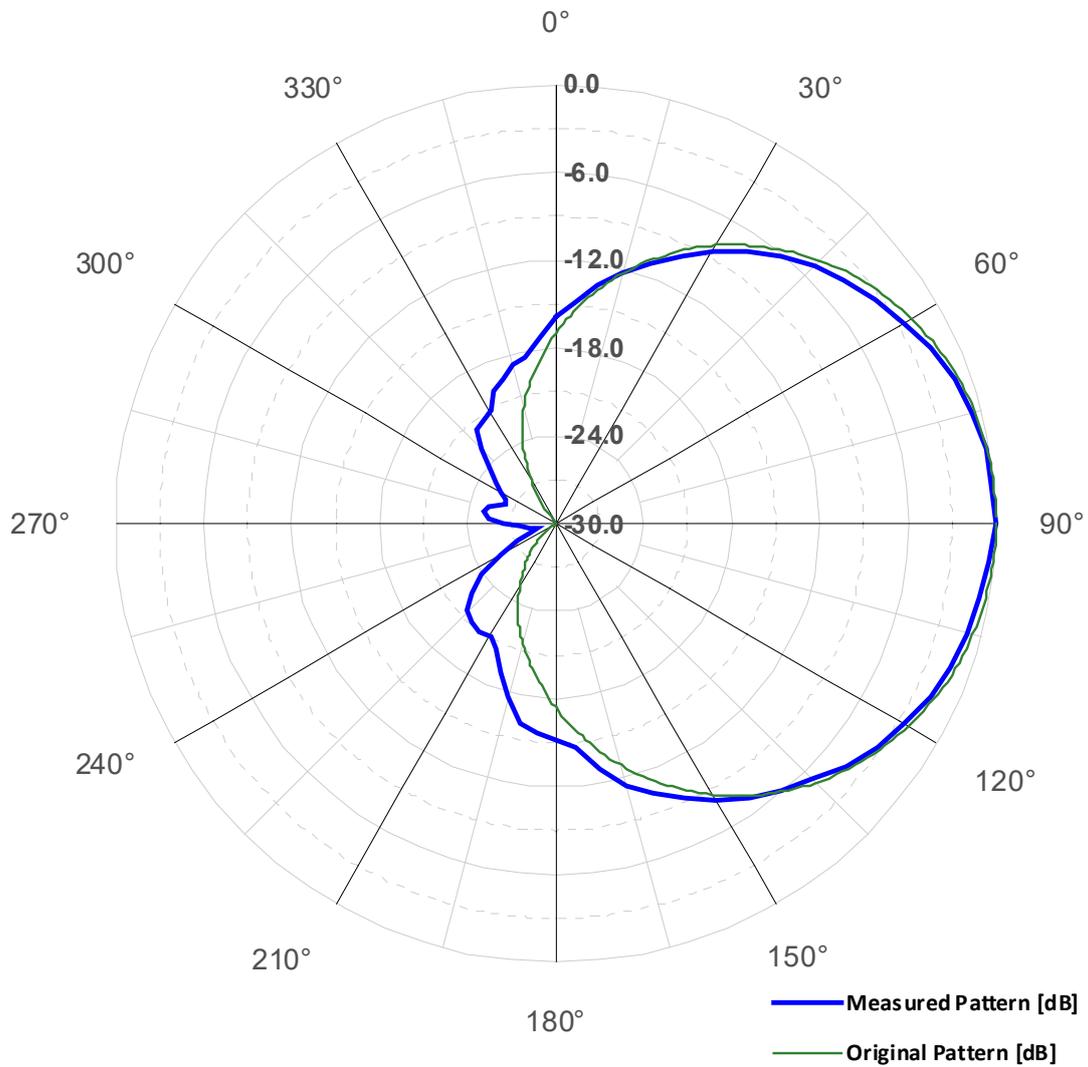


Abbildung 10: LTE800 Sektor A HRP

## 8.2 LTE 800 Sektor B

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
6200	333	190°	-4°	-2°

Tablle 9: Übersicht LTE800 Sektor B

### 8.2.1 VRP Sektor B

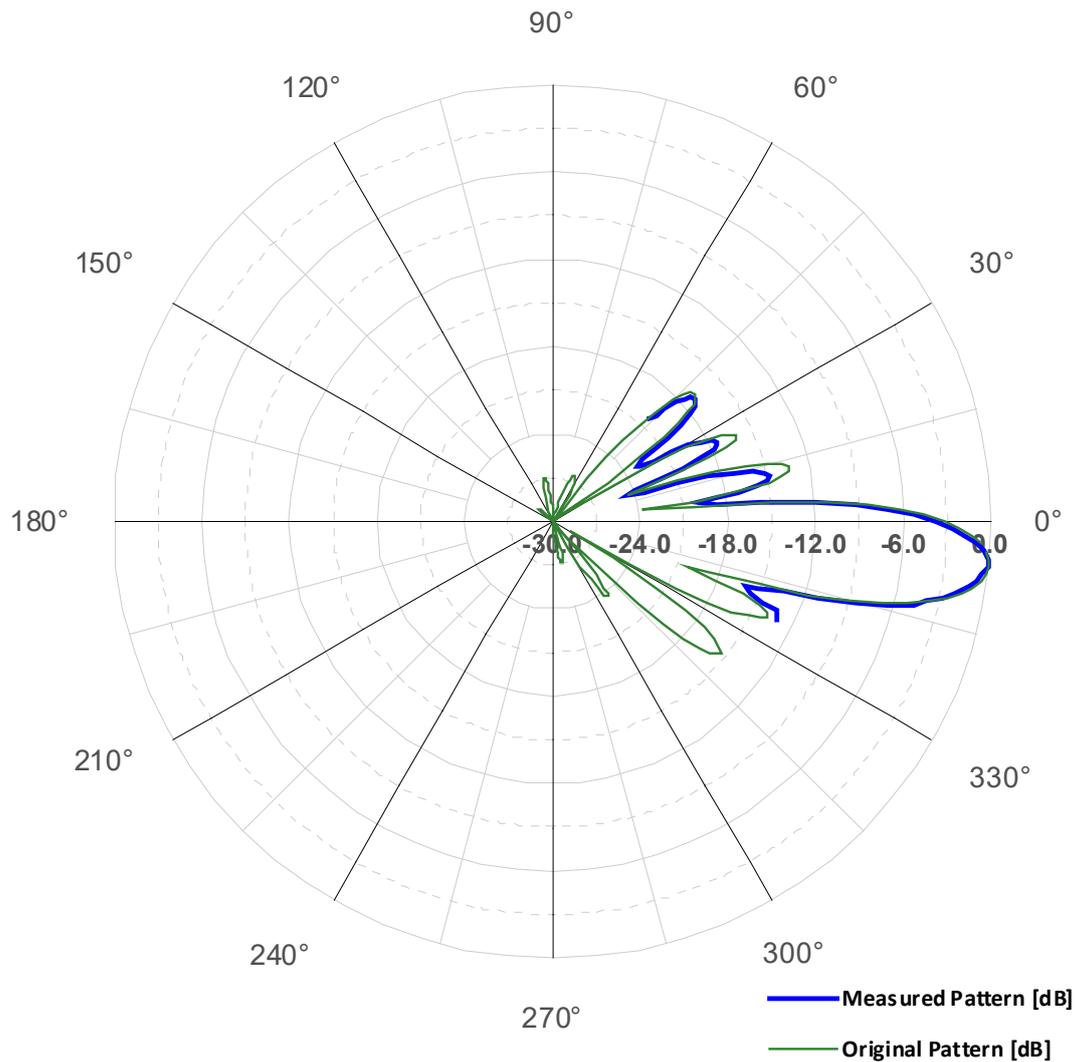


Abbildung 11: LTE800 Sektor B VRP

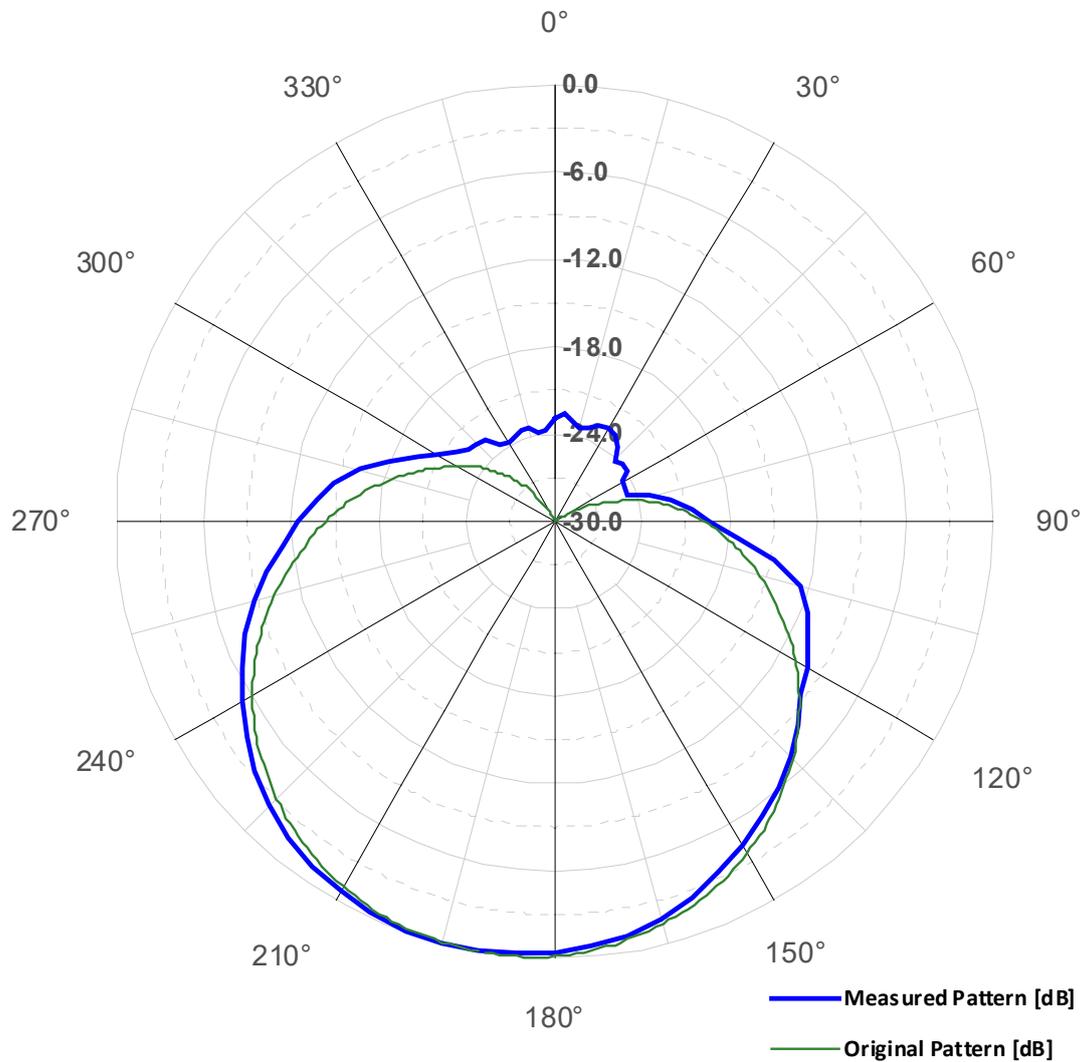


Abbildung 12: LTE800 Sektor B HRP

## 8.3 LTE 800 Sektor C

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
6200	335	290°	-4°	-10°

Tabelle 10: Übersicht LTE800 Sektor C

### 8.3.1 VRP Sektor C

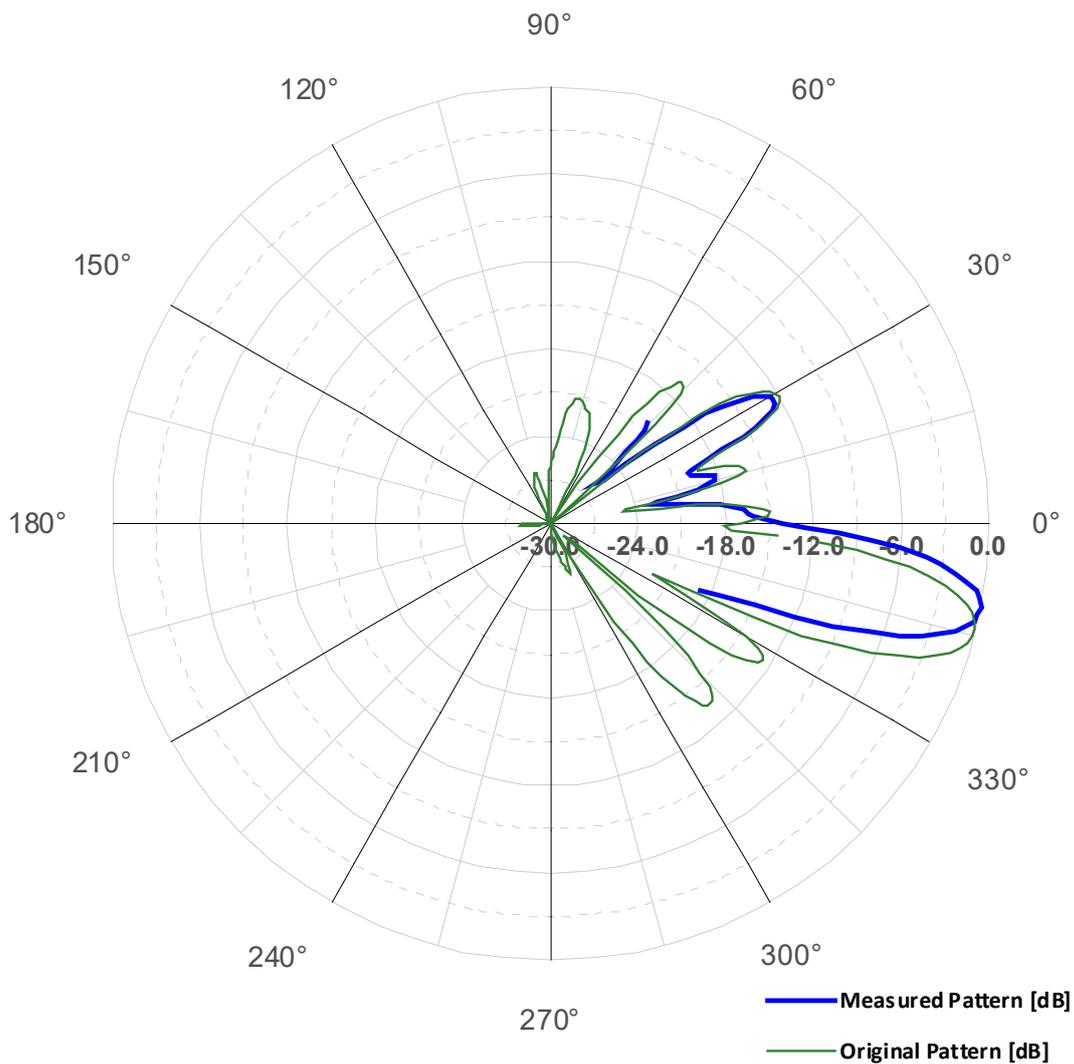


Abbildung 13: LTE800 Sektor C VRP

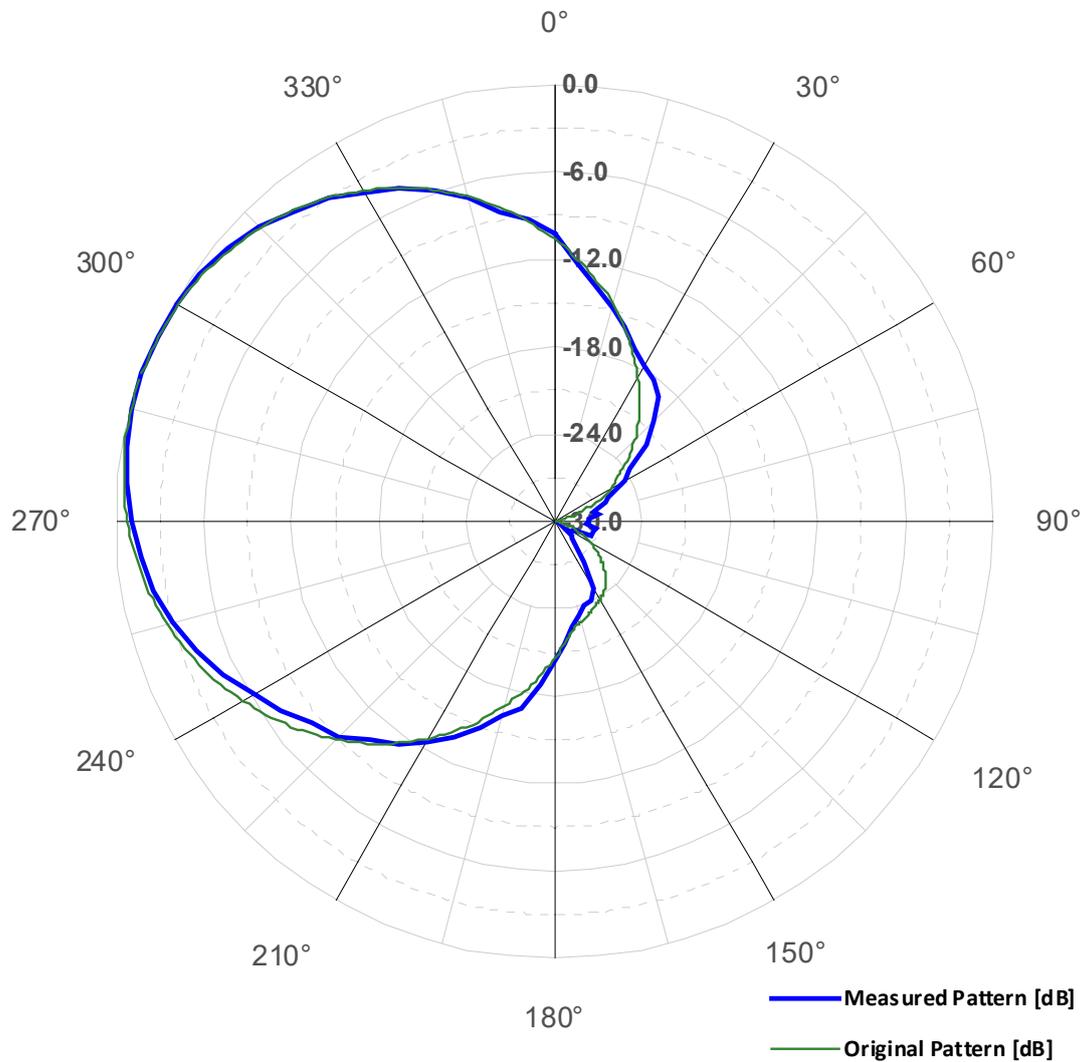


Abbildung 14: LTE800 Sektor C HRP

## 8.4 LTE 800 ERP

Sektor	ERP gemessen	ERP gem. Betreiber	Delta
A	53.58 dBm	54.6 dBm	-1.02 dB
B	53.74 dBm	54.6 dBm	-0.86 dB
C	54.37 dBm	54.6 dBm	-0.23 dB

Tabelle 11: ERP LTE800



## 8.5 Kommentare Messergebnisse LTE 800

### 8.5.1 Sektor A

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein.

Antennenrückseitig wurden leicht höhere Werte gemessen, dies kann durch Streuungen und Reflektionen verursacht sein, welche mit der omnidirektionalen, isotropen Messantenne detektiert werden.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 8.5.2 Sektor B

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein.

Antennenrückseitig wurden leicht höhere Werte gemessen, dies kann durch Streuungen und Reflektionen verursacht sein, welche mit der omnidirektionalen, isotropen Messantenne detektiert werden.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 8.5.3 Sektor C

Der Öffnungswinkel des VRP-Patterns stimmt sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

Bei der Elevation wurde eine Abweichung von 3° festgestellt.

Bei Nachmessungen mit unterschiedlich eingestellten elektrischen Elevationen konnten die erwähnten Abweichungen verifiziert, respektive reproduziert werden. Die Abweichungen vergrösserten sich mit zunehmender Elevation.

Allenfalls kann das erwähnte Verhalten durch die Alterung der Antenne erklärt werden. Eine schlüssige Erklärung wird jedoch erst möglich, wenn die Antenne ersetzt wird. Ein Ersatz ist gemäss Sunrise im Rahmen eines Standortumbaus in den nächsten Jahren geplant.

Die gemessenen Elevationsabweichungen beeinflussen die berechneten Orte mit empfindlicher Nutzung marginal, da Letztere sich in entgegengesetzter Richtung der Antennen Abstrahlrichtung befinden.

## 9 Messergebnisse LTE 1800

### 9.1 LTE 1800 Sektor A

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
1850	494	90°	-4°	0°

Tabelle 12: Übersicht LTE1800 Sektor A

#### 9.1.1 VRP Sektor A

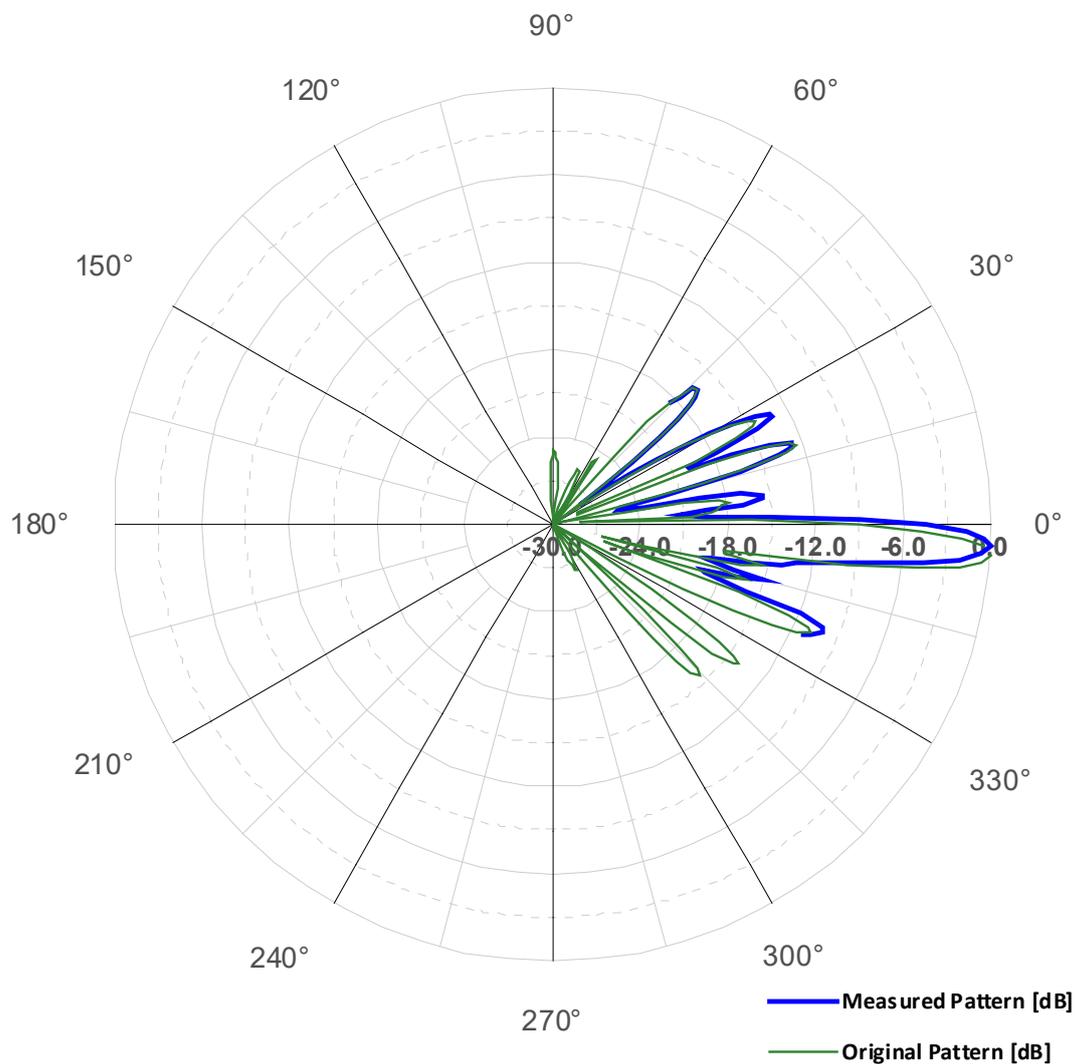


Abbildung 15: LTE1800 Sektor A VRP

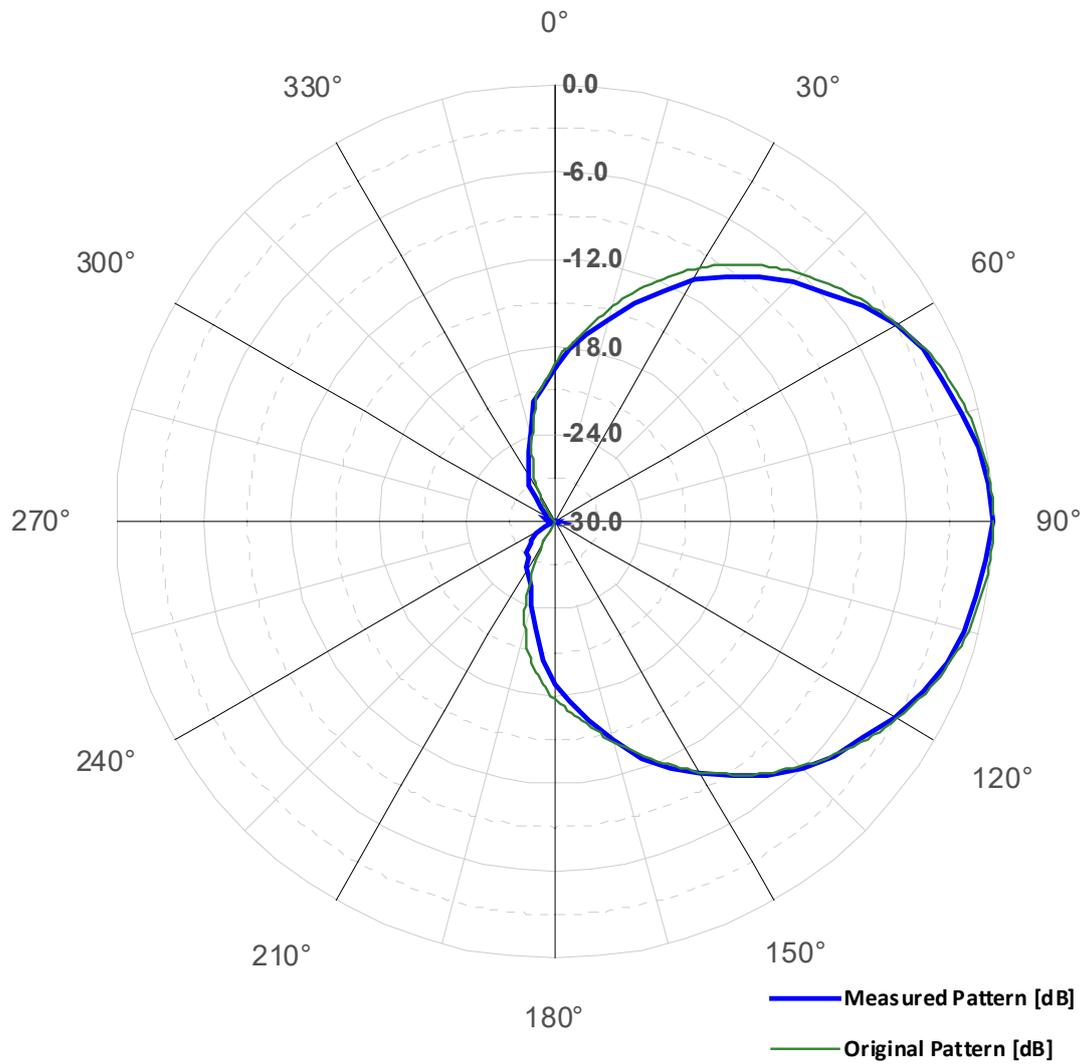


Abbildung 16: LTE1800 Sektor A HRP

## 9.2 LTE 1800 Sektor B

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
1850	493	190°	-4°	0°

Tabelle 13: Übersicht LTE1800 Sektor B

### 9.2.1 VRP Sektor B

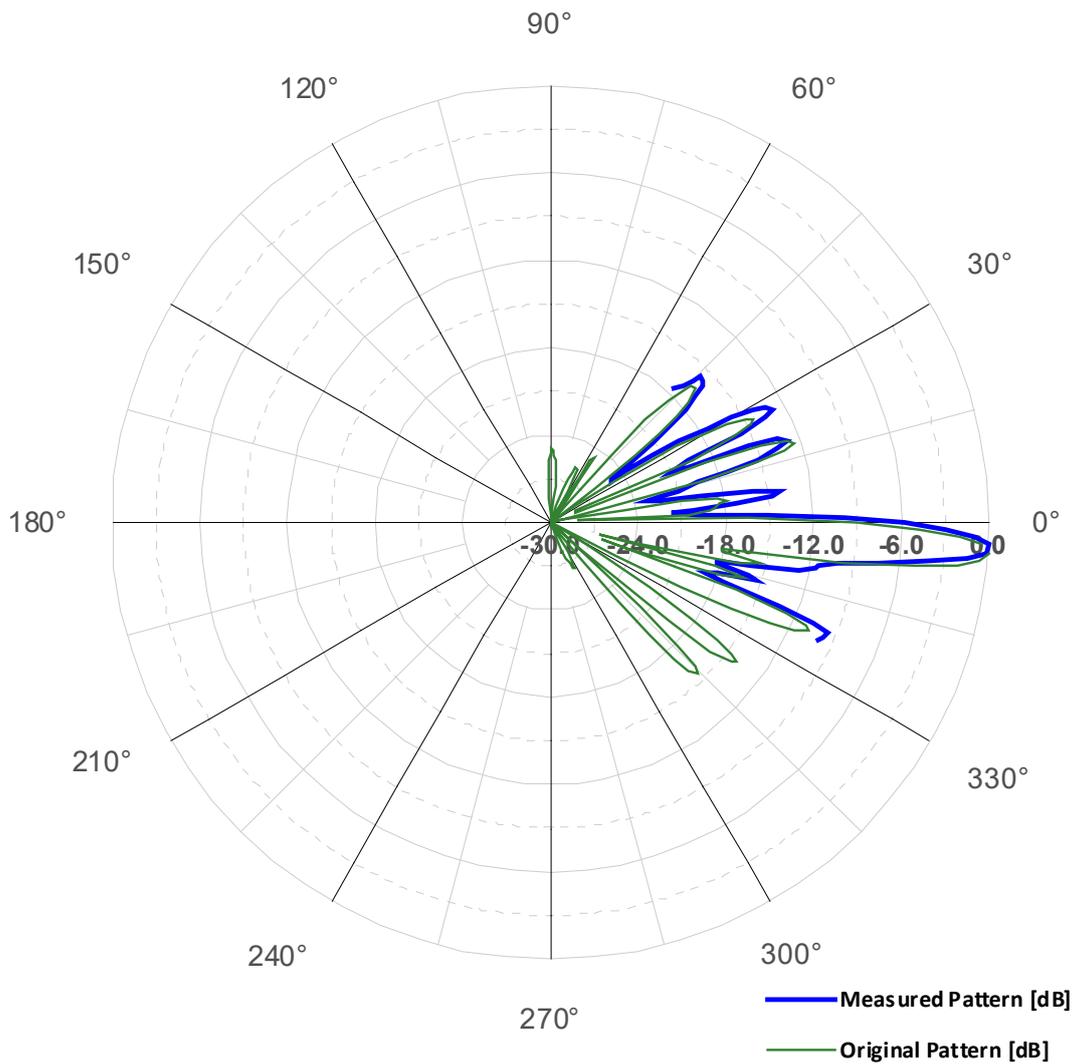


Abbildung 17: LTE1800 Sektor B VRP

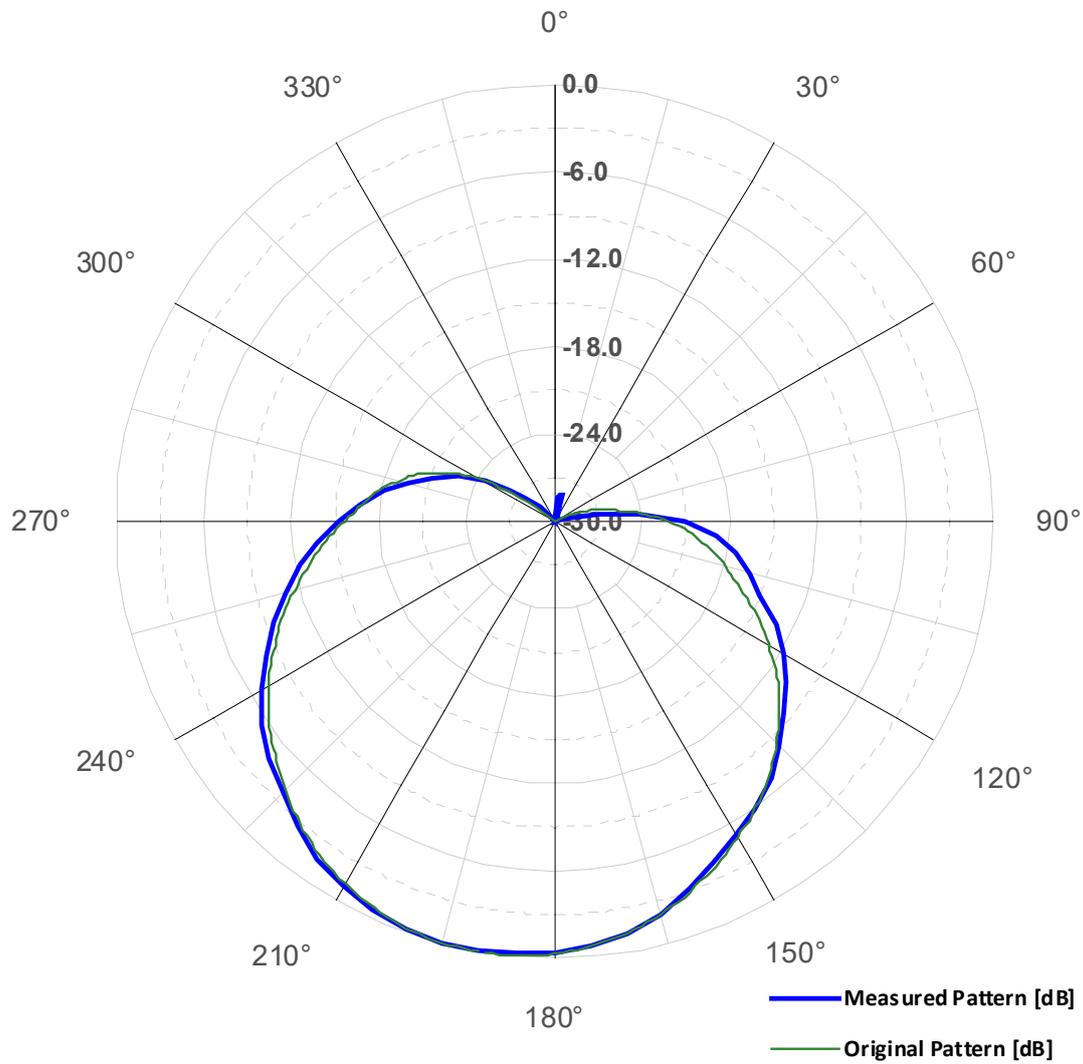


Abbildung 18: LTE1800 Sektor B HRP

## 9.3 LTE 1800 Sektor C

EARFCN	PCI	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
1850	489	290°	-4°	-6°

Tabelle 14: Übersicht LTE1800 Sektor C

### 9.3.1 VRP Sektor C

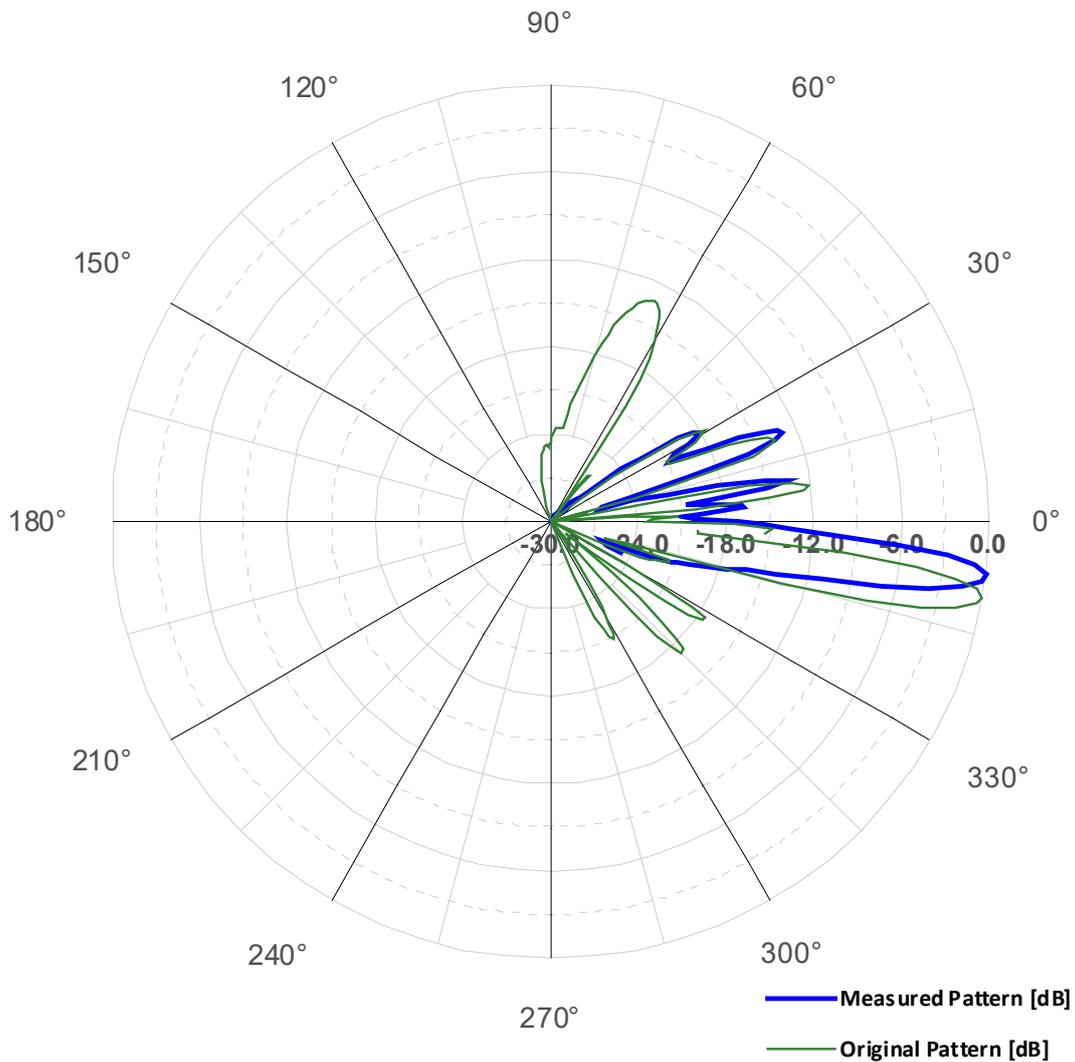


Abbildung 19: LTE1800 Sektor C VRP

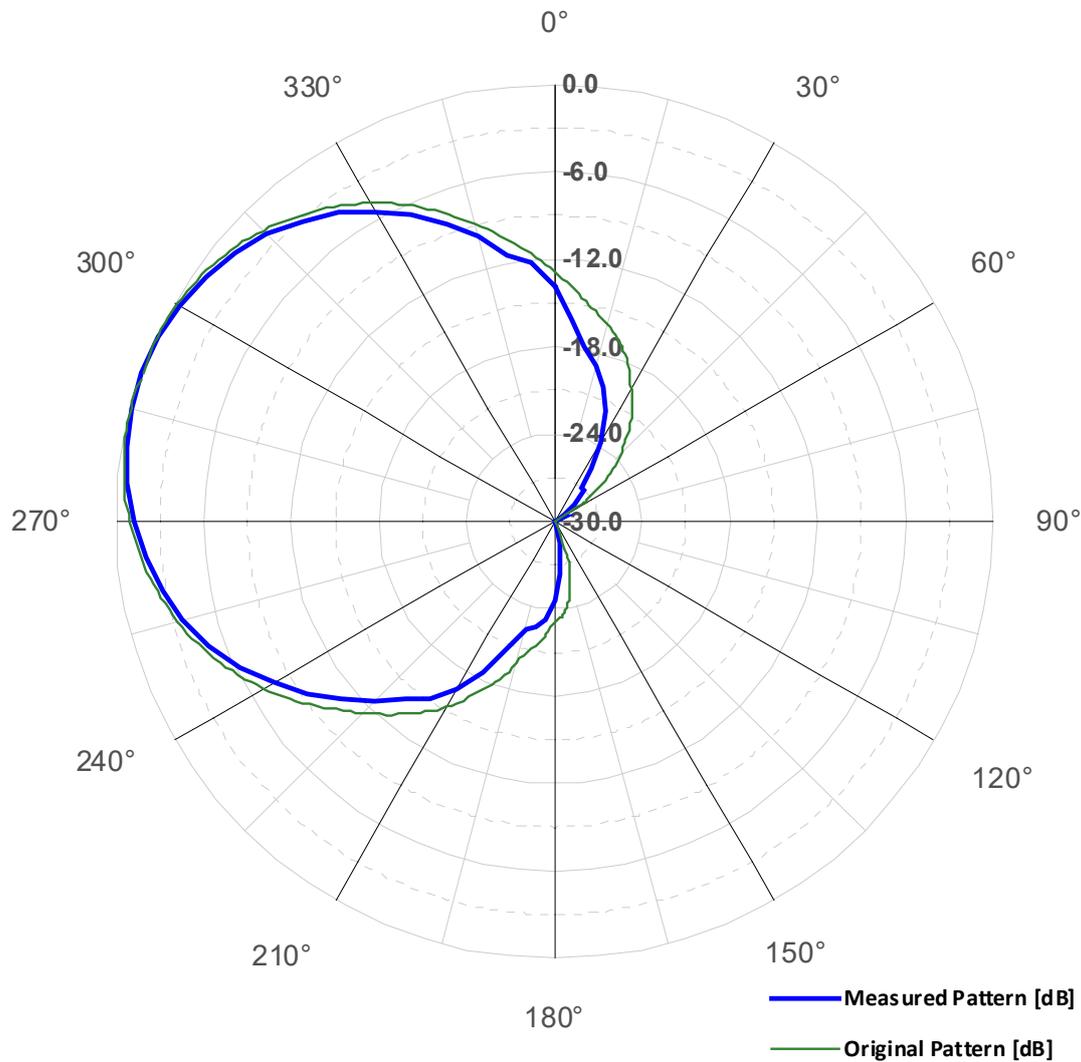


Abbildung 20: LTE1800 Sektor C HRP

## 9.4 LTE 1800 ERP

Sektor	ERP gemessen	ERP gem. Betreiber	Delta
A	58.34 dBm	59.1 dBm	-0.76 dB
B	57.29 dBm	59.1 dBm	-1.81 dB
C	58.92 dBm	59.1 dBm	-0.18 dB

Tabelle 15: ERP LTE1800

## 9.5 Kommentare Messergebnisse LTE 1800

### 9.5.1 Sektor A

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 9.5.2 Sektor B

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 9.5.3 Sektor C

Der Öffnungswinkel des VRP-Patterns stimmt sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen eine gute Übereinstimmung auf.

Bei der Elevation wurde eine Abweichung von 3° festgestellt.

Bei Nachmessungen mit unterschiedlich eingestellten elektrischen Elevationen konnten die erwähnten Abweichungen verifiziert, respektive reproduziert werden. Die Abweichungen vergrösserten sich mit zunehmender Elevation.

Allenfalls kann das erwähnte Verhalten durch die Alterung der Antenne erklärt werden. Eine schlüssige Erklärung wird jedoch erst möglich, wenn die Antenne ersetzt wird. Ein Ersatz ist gemäss Sunrise im Rahmen eines Standortumbaus in den nächsten Jahren geplant.

Die gemessenen Elevationsabweichungen beeinflussen die berechneten Orte mit empfindlicher Nutzung marginal, da Letztere sich in entgegengesetzter Richtung der Antennen Abstrahlrichtung befinden.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

## 10 Messergebnisse UMTS 900

### 10.1 UMTS 900 Sektor A

UARFCN	SC	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
2963	259	90°	-4°	0°

Tabelle 16: Übersicht UMTS900 Sektor A

#### 10.1.1 VRP Sektor A

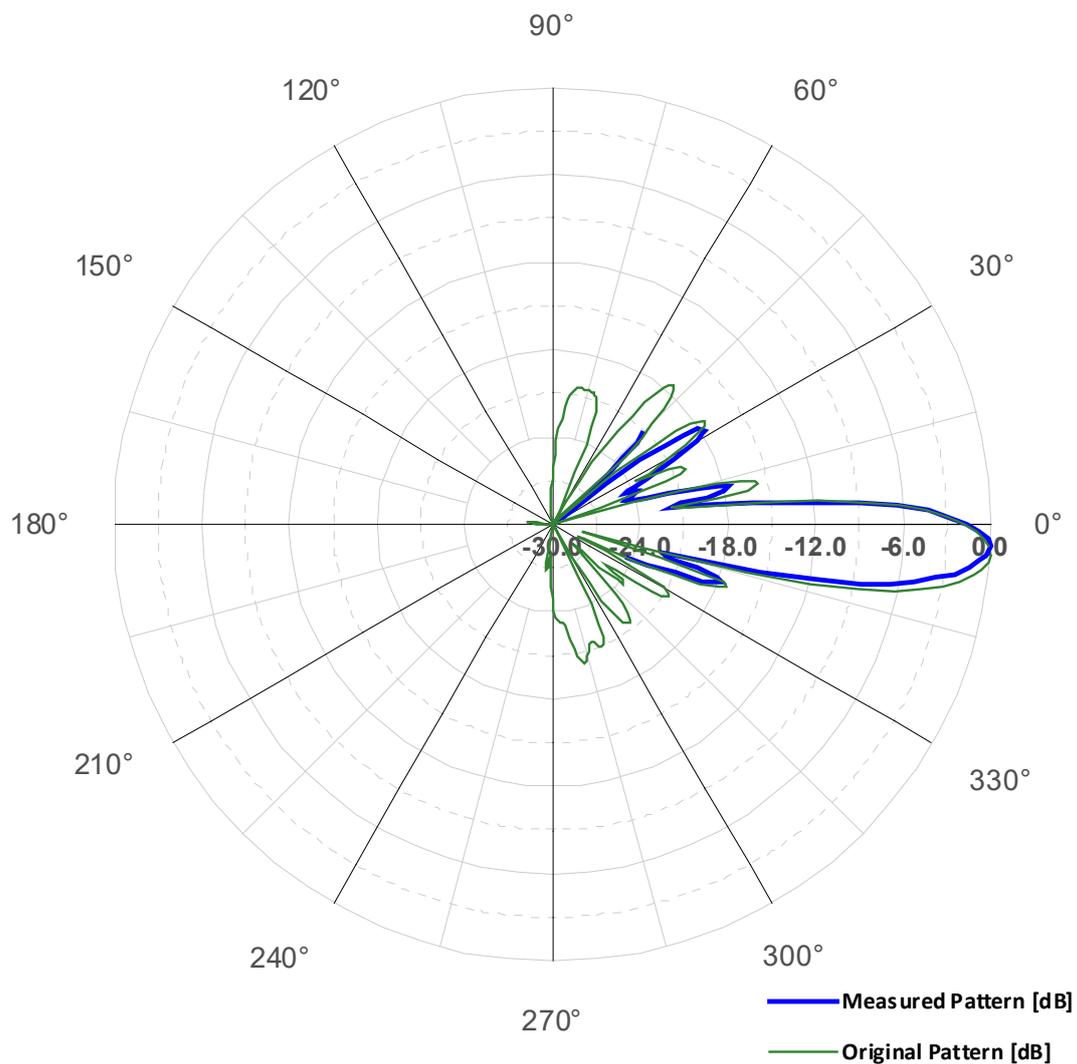


Abbildung 21: UMTS900 Sektor A VRP

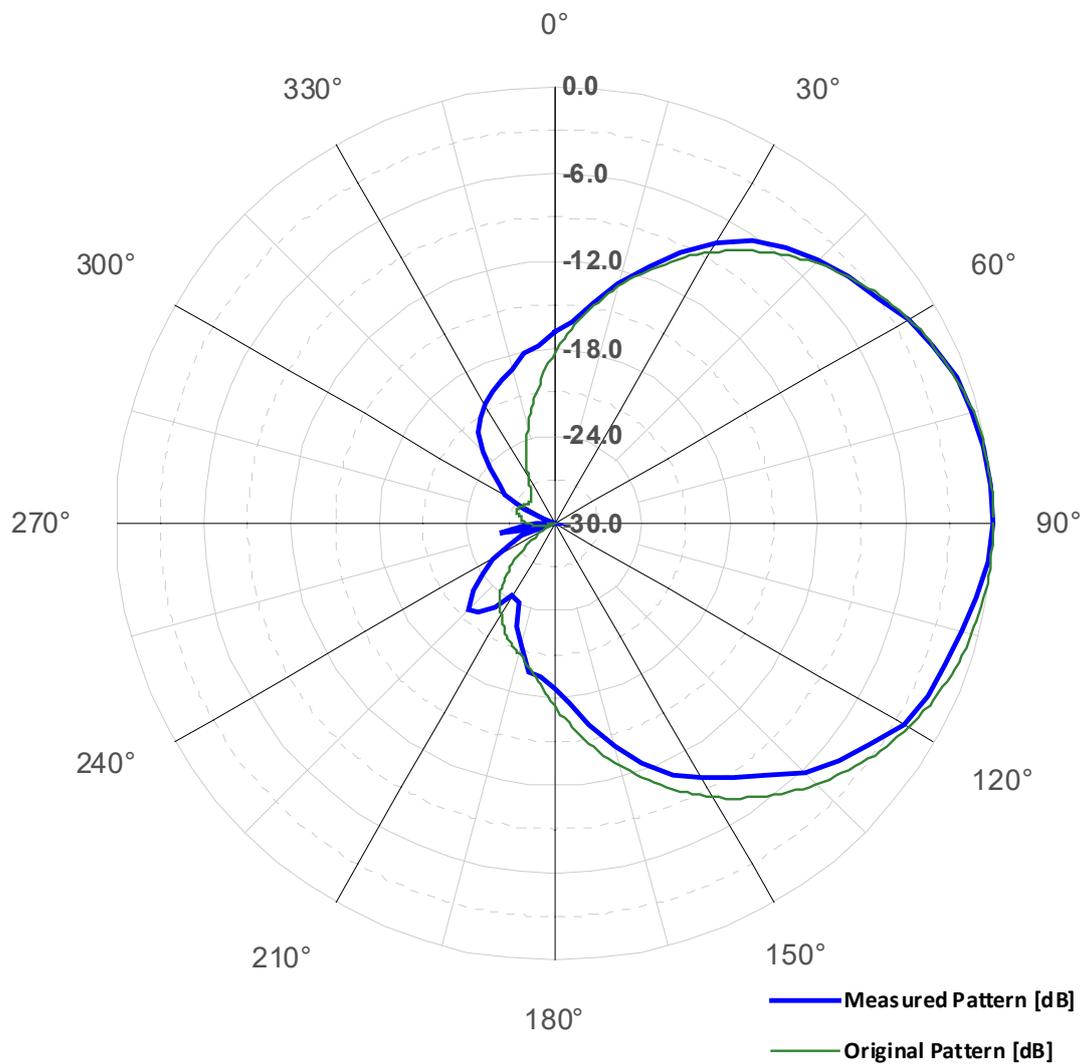


Abbildung 22: UMTS 900 Sektor A HRP

## 10.2 UMTS 900 Sektor B

UARFCN	SC	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
2963	181	190°	-4°	-2°

Tabelle 17: Übersicht UMTS900 Sektor B

### 10.2.1 VRP Sektor B

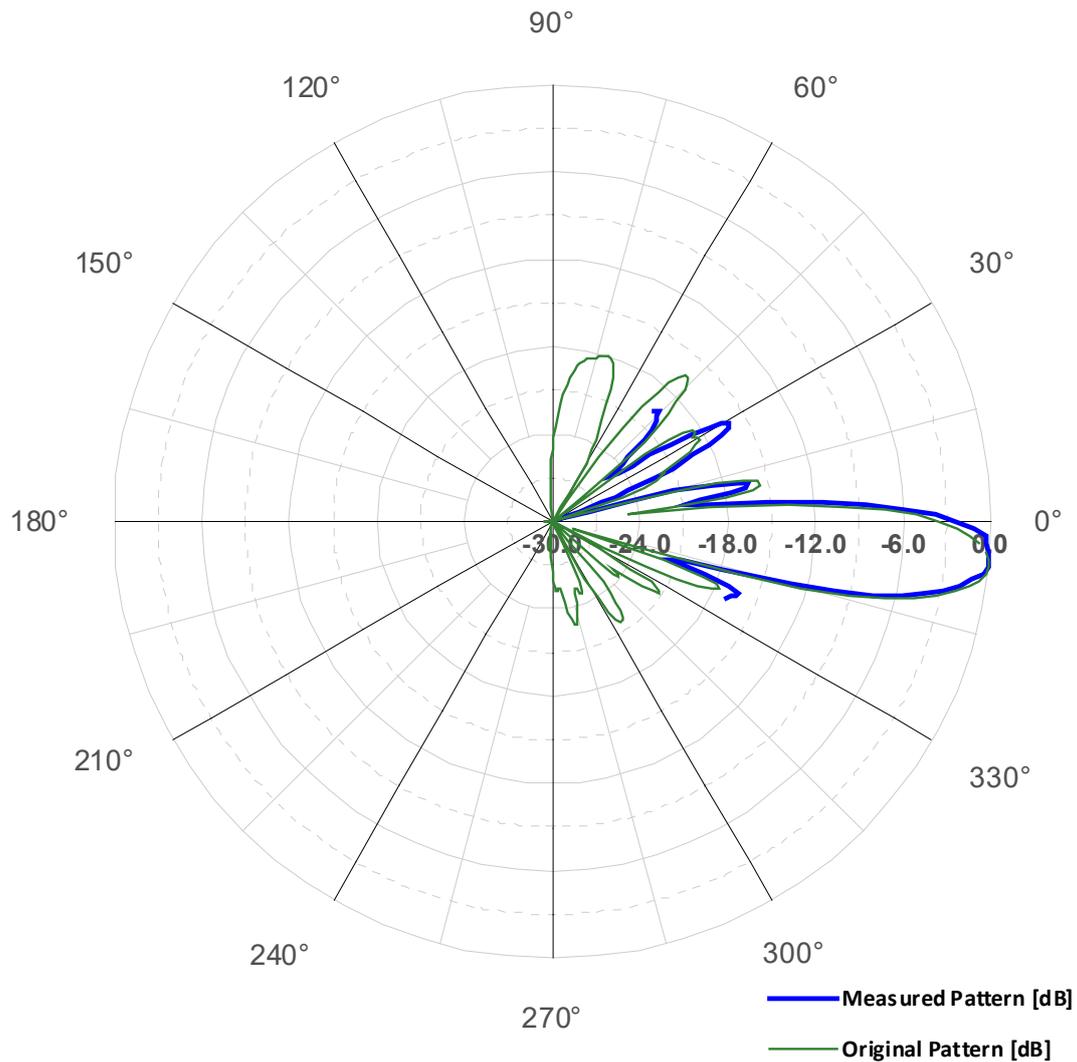


Abbildung 23: UMTS 900 Sektor B VRP

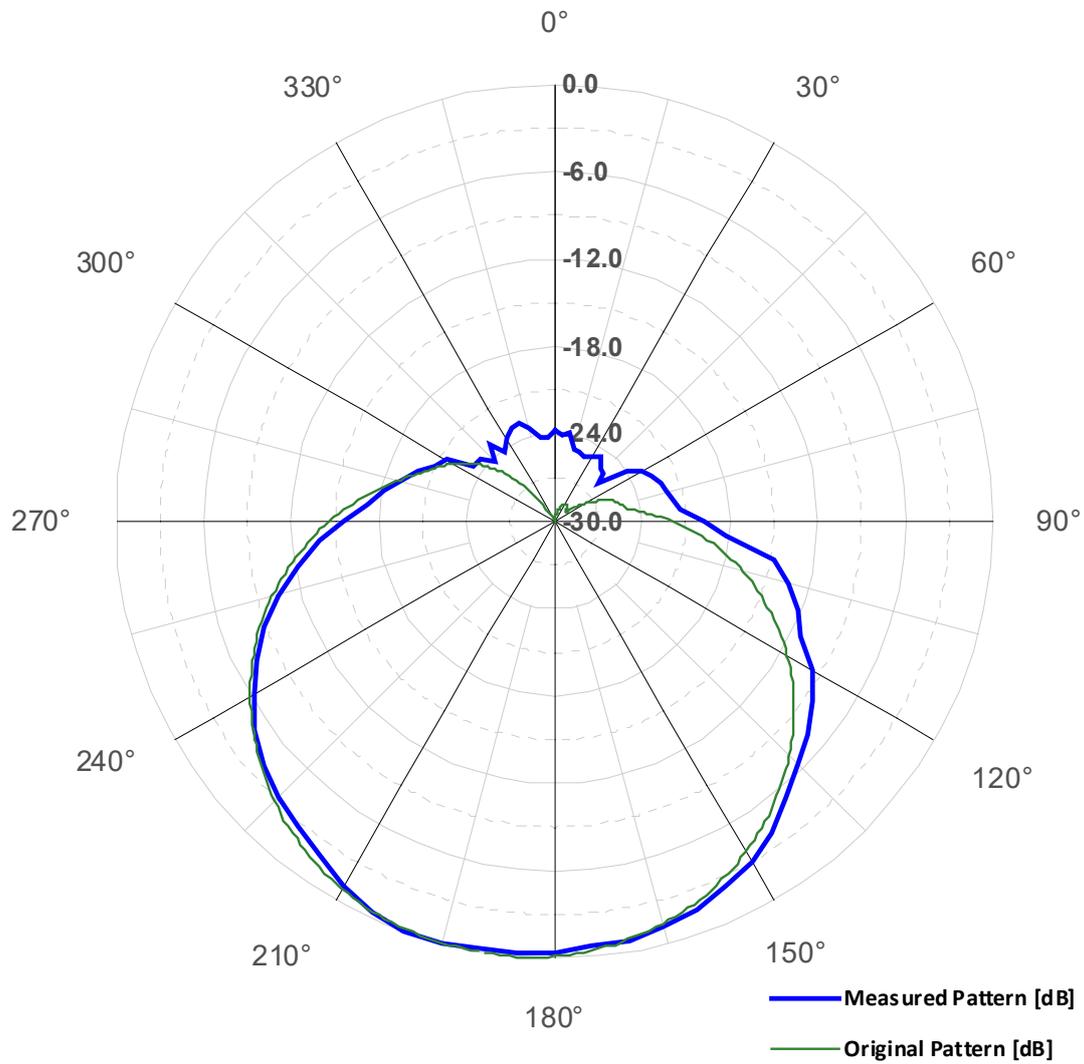


Abbildung 24: UMTS 900 Sektor B HRP

## 10.3 UMTS 900 Sektor C

UARFCN	SC	Azimut	Tilt mech.	Tilt el.
2963	199	290°	-4°	-10°

Tabelle 18: Übersicht UMTS900 Sektor C

### 10.3.1 VRP Sektor C

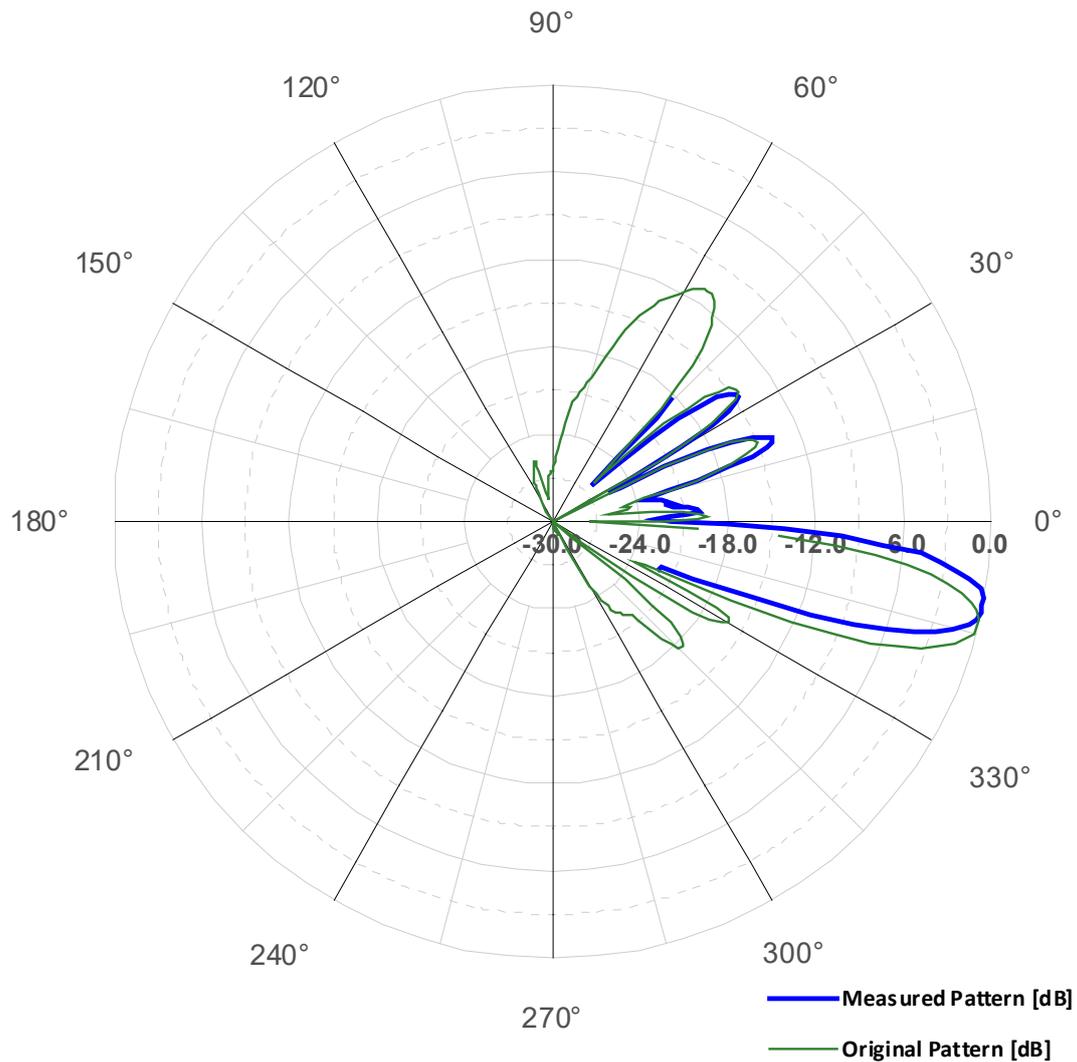


Abbildung 25: UMTS 900 Sektor C VRP

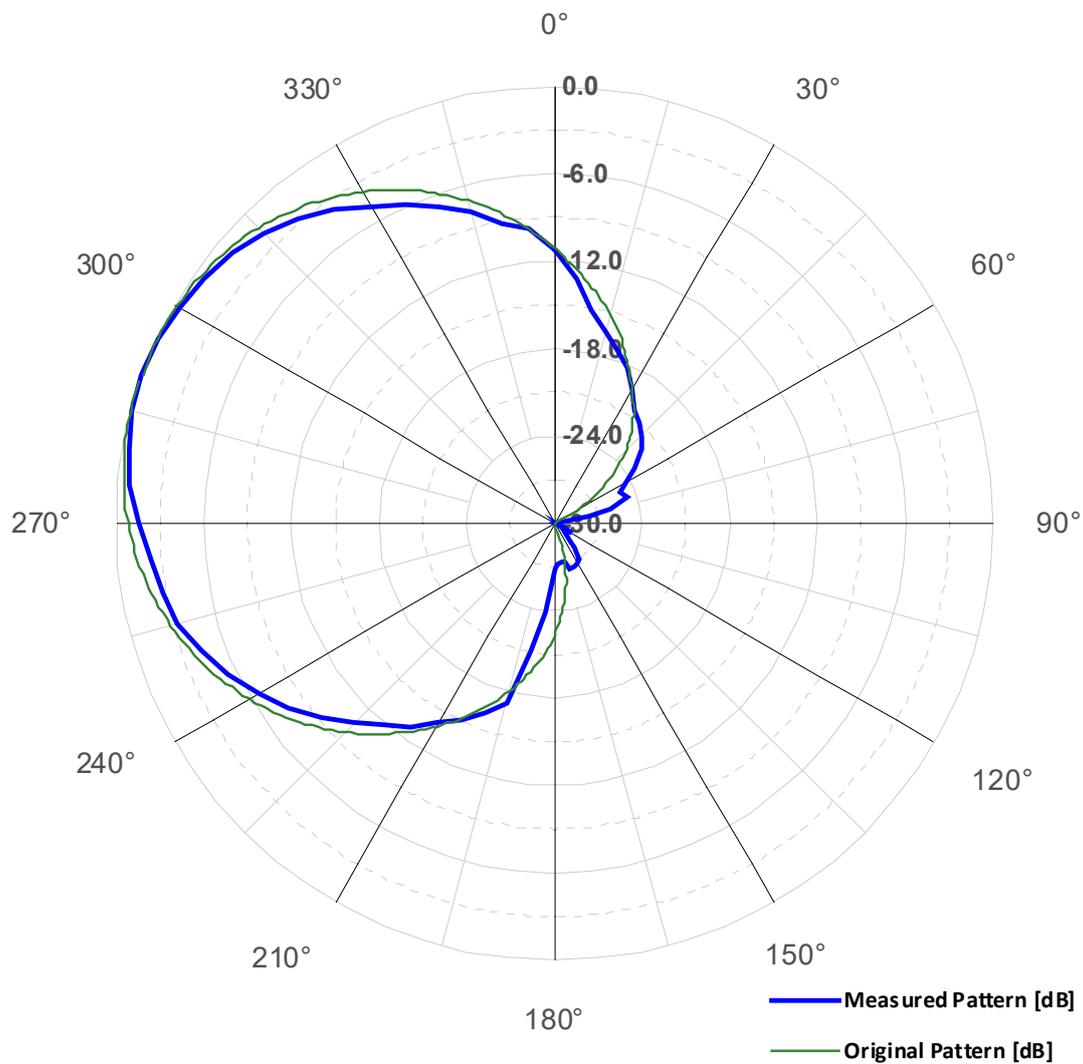


Abbildung 26: UMTS 900 Sektor C HRP

## 10.4 UMTS 900 ERP

Sektor	ERP gemessen	ERP gem. Betreiber	Delta
A	57.41 dBm	57.4 dBm	0.01 dB
B	57.31 dBm	57.4 dBm	-0.09 dB
C	57.03 dBm	57.4 dBm	-0.37 dB

Tabelle 19: ERP UMTS900

## 10.5 Kommentare der Messergebnisse UMTS 900

### 10.5.1 Sektor A

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Antennenrückseitig wurden leicht höhere Werte gemessen, dies kann durch Streuungen und Reflektionen verursacht sein, welche mit der omnidirektionalen, isotropen Messantenne detektiert werden.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 10.5.2 Sektor B

Öffnungswinkel und Elevation des VRP-Patterns stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Antennenrückseitig wurden leicht höhere Werte gemessen, dies kann durch Streuungen und Reflektionen verursacht sein, welche mit der omnidirektionalen, isotropen Messantenne detektiert werden.

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

### 10.5.3 Sektor C

Der Öffnungswinkel des VRP-Patterns stimmt sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein. Die Position der Nebenkeulen weisen eine gute Übereinstimmung auf.

Bei der Elevation wurde eine Abweichung von 3° festgestellt.

Bei Nachmessungen mit unterschiedlich eingestellten elektrischen Elevationen konnten die erwähnten Abweichungen verifiziert, respektive reproduziert werden. Die Abweichungen vergrösserten sich mit zunehmender Elevation.

Allenfalls kann das erwähnte Verhalten durch die Alterung der Antenne erklärt werden. Eine schlüssige Erklärung wird jedoch erst möglich, wenn die Antenne ersetzt wird. Ein Ersatz ist gemäss Sunrise im Rahmen eines Standortumbaus in den nächsten Jahren geplant.

Die gemessenen Elevationsabweichungen beeinflussen die berechneten Orte mit empfindlicher Nutzung marginal, da Letztere sich in entgegengesetzter Richtung der Antennen Abstrahlrichtung befinden.

Öffnungswinkel und Azimut des HRP Pattern stimmen sehr gut mit dem Herstellerdiagramm überein

Die gemessene ERP stimmt mit den Providerangaben sehr gut überein.

## 11 3D-Diagramme

Nachfolgend werden die einzelnen Sektoren sowie die Summen (alle 3 Sektoren) der gemessenen Kanäle als 3D-Diagramme dargestellt. Die Diagramme würden mit Hilfe der Firma PreHCM Services erstellt.

Die Messdaten können auch in einem elektronischen Format zur Verfügung gestellt werden, so dass diese in ein Funkplanungs- oder NIS Berechnungstool eingelesen werden können, um entsprechende Nachberechnungen mit realen Daten durchzuführen.

### 11.1 Legende

	0.0 dB
	-5.0 dB
	-10.0 dB
	-15.0 dB
	-20.0 dB
	-25.0 dB
	-30.0 dB
	-35.0 dB
	-40.0 dB
	-45.0 dB
	-50.0 dB

### 11.2 LTE 800

#### 11.2.1 Sektor A

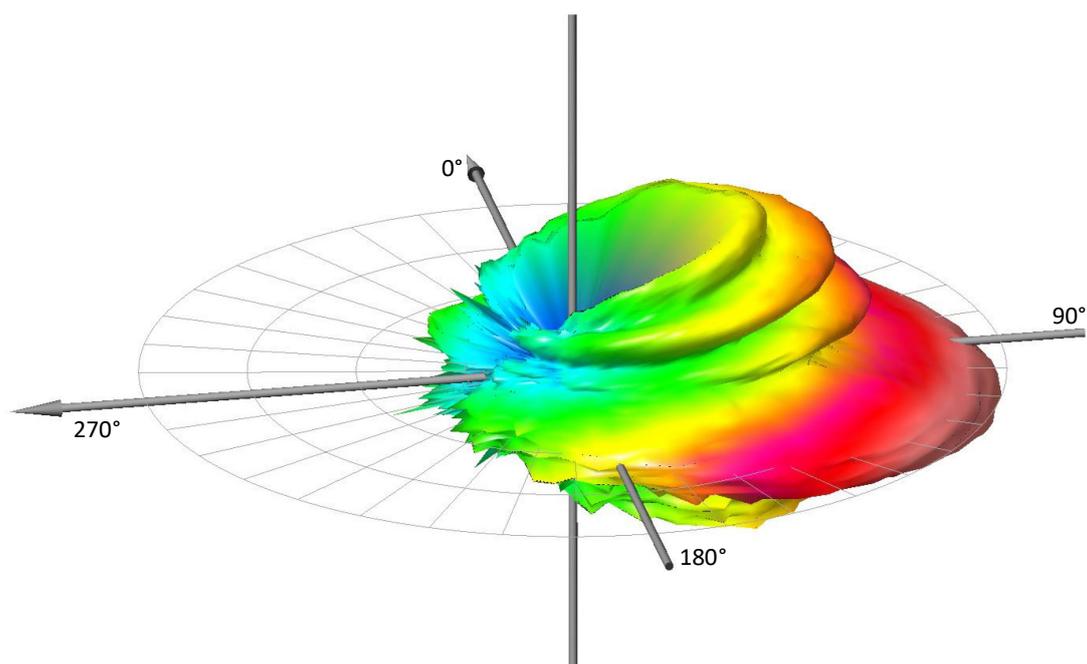


Abbildung 27: 3D-Diagramm LTE800 Sektor A

## 11.2.2 Sektor B

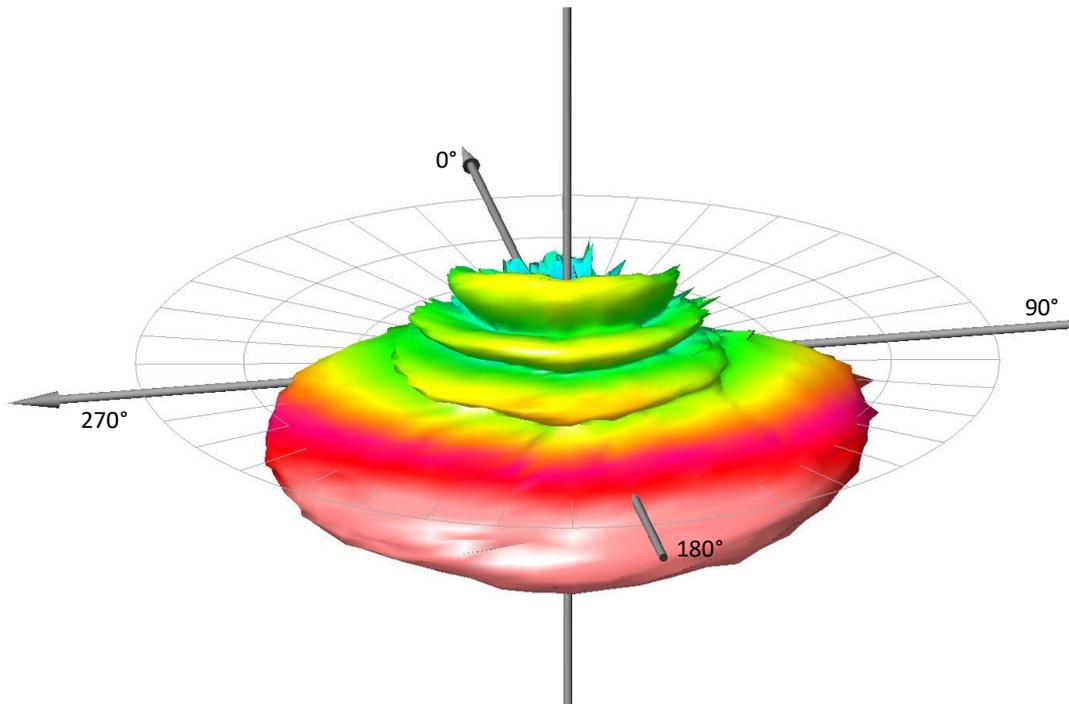


Abbildung 28: 3D-Diagramm LTE800 Sektor B

## 11.2.3 Sektor C

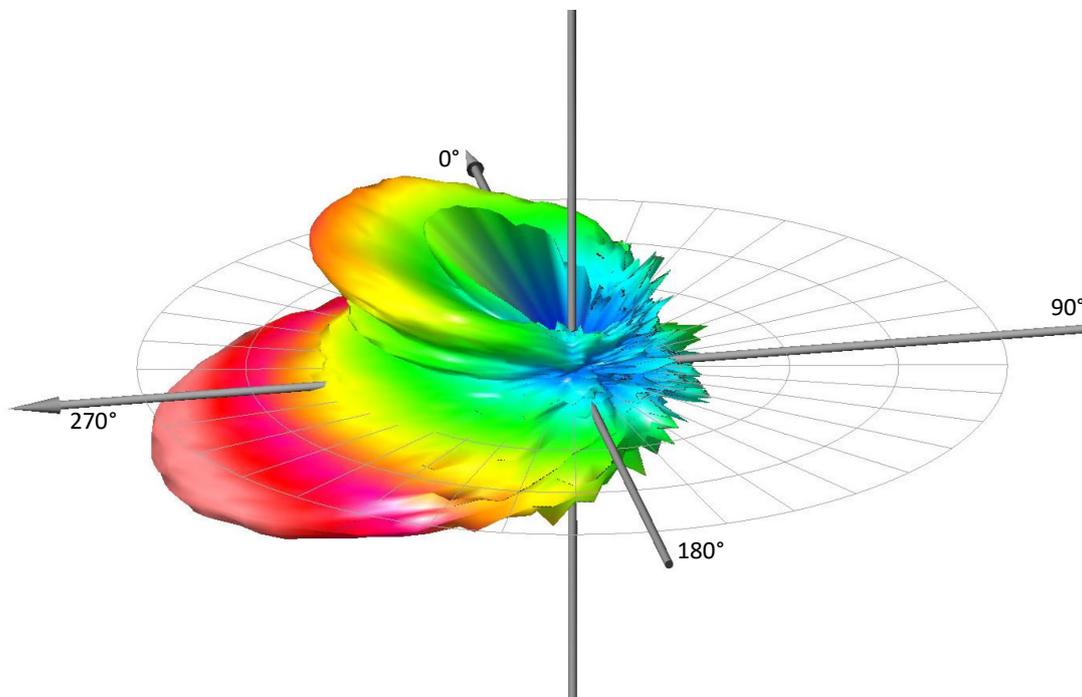


Abbildung 29: 3D-Diagramm LTE800 Sektor C

## 11.2.4 Summendiagramm Sektor A, B, C

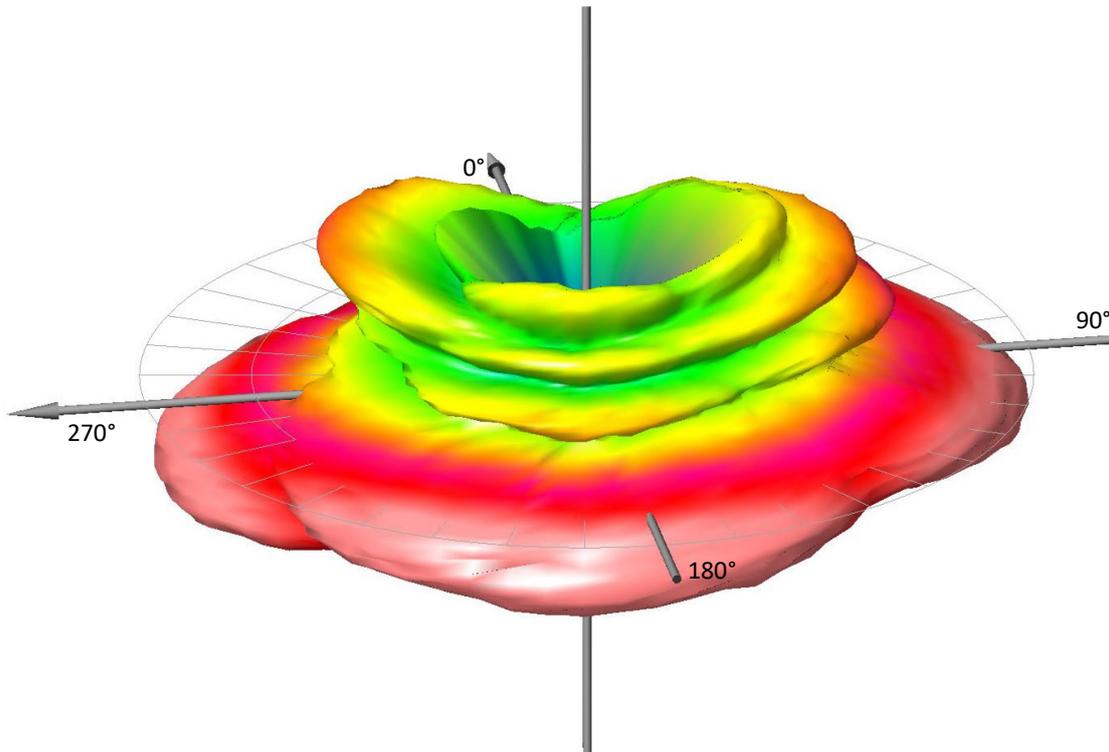


Abbildung 30: 3D-Diagramm LTE800 Summe Ansicht 1

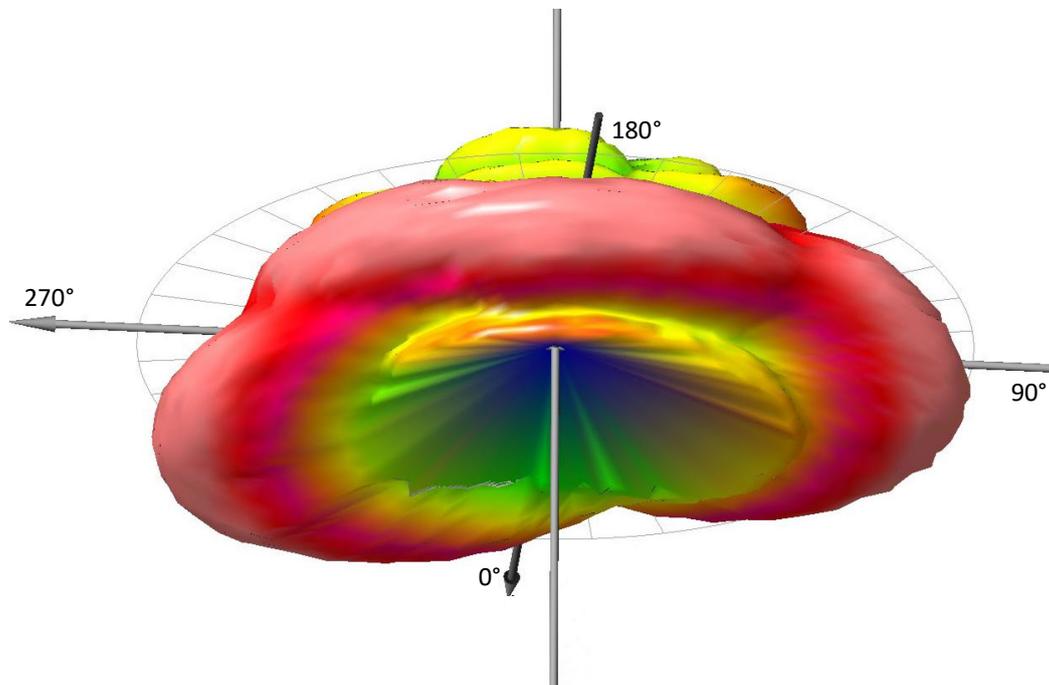


Abbildung 31: 3D-Diagramm LTE800 Summe Ansicht 2

## 11.3 LTE 1800

### 11.3.1 Sektor A

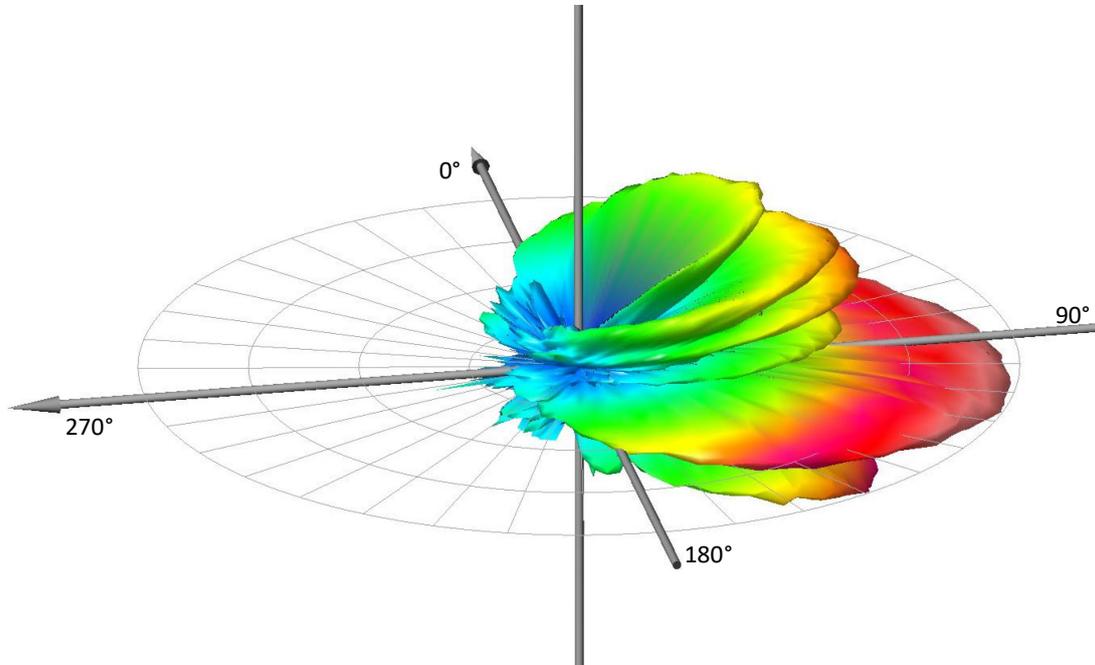


Abbildung 32: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor A

### 11.3.2 Sektor B

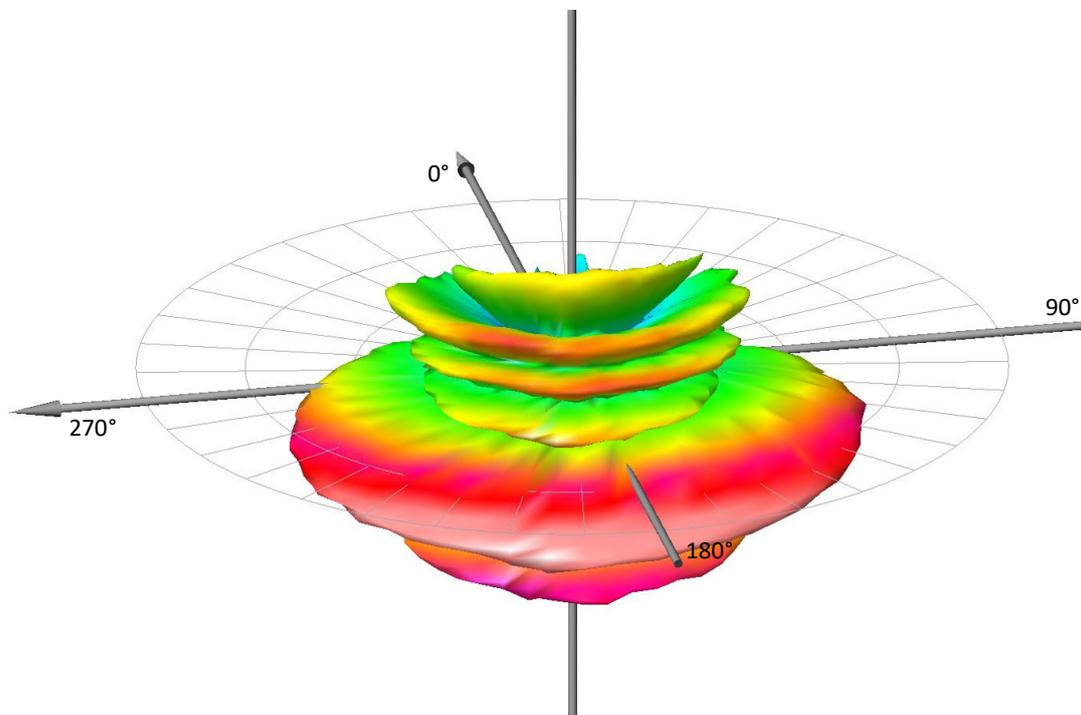


Abbildung 33: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor B

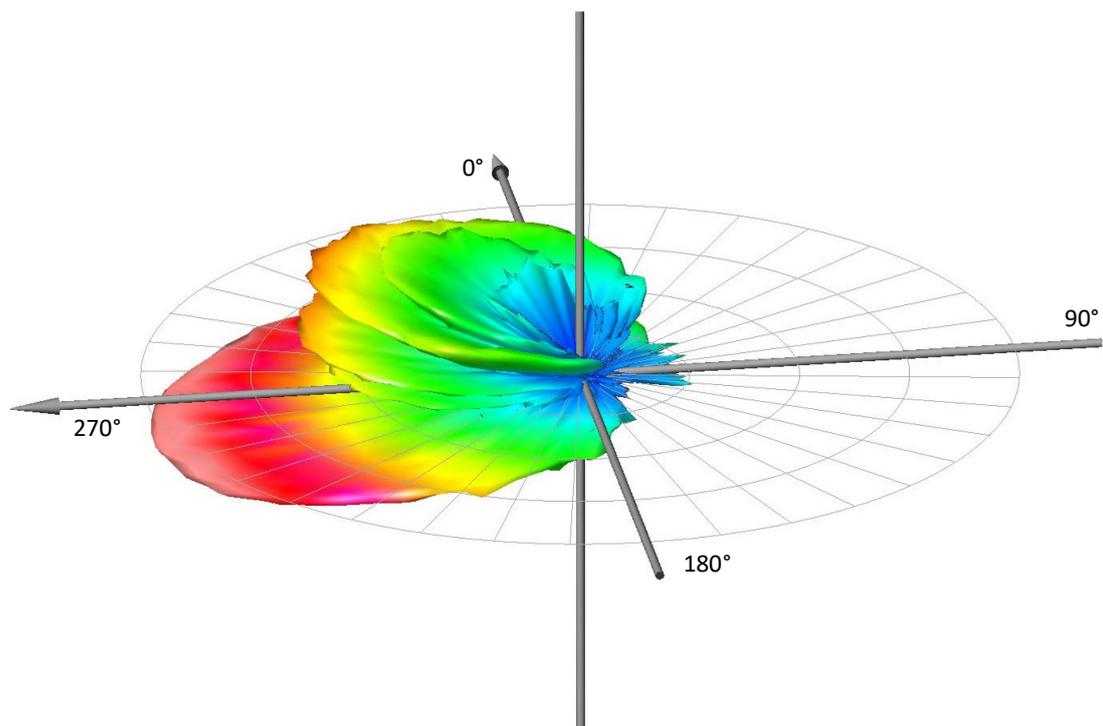


Abbildung 34: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor C

## 11.3.4 Summendiagramm Sektor A, B, C

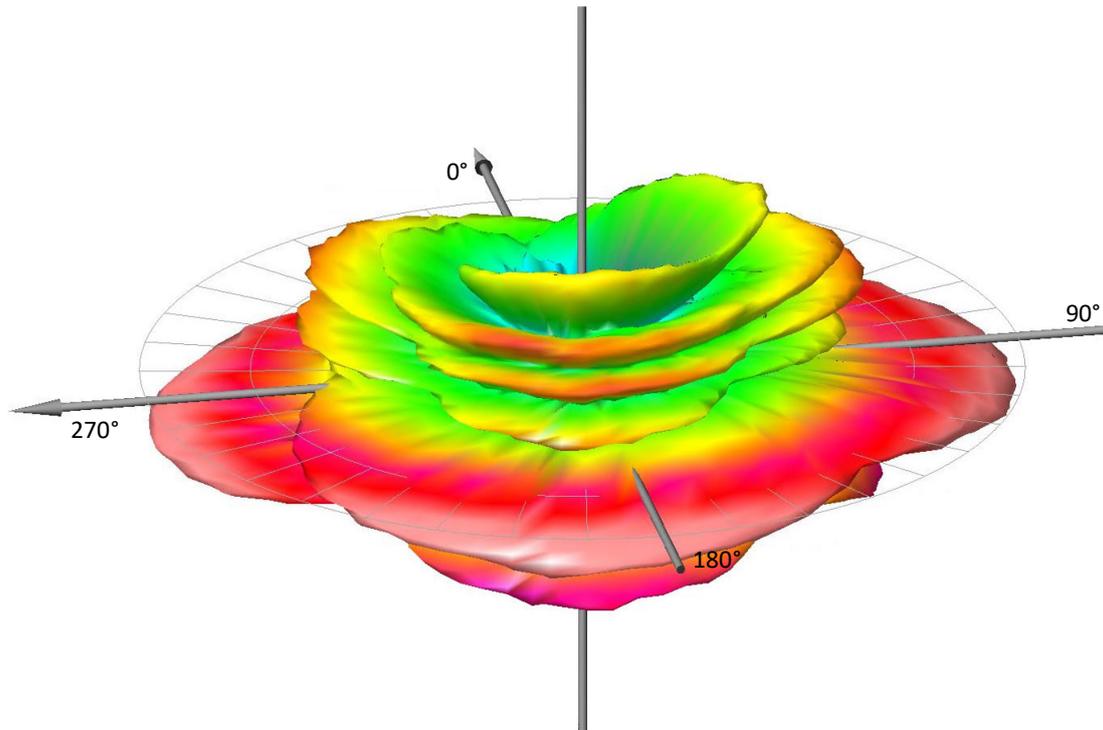


Abbildung 35: 3D-Diagramm LTE1800 Summe Ansicht 1

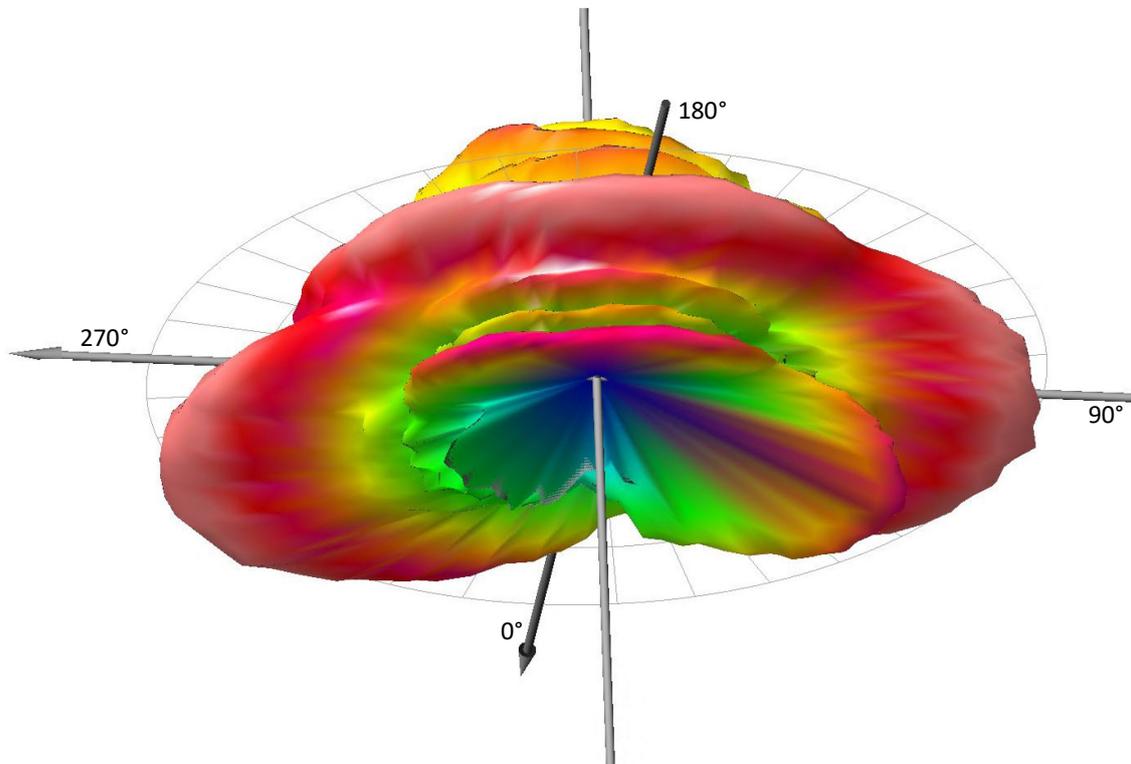


Abbildung 36: 3D-Diagramm LTE1800 Summe Ansicht 2

## 11.4 UMTS 900

### 11.4.1 Sektor A

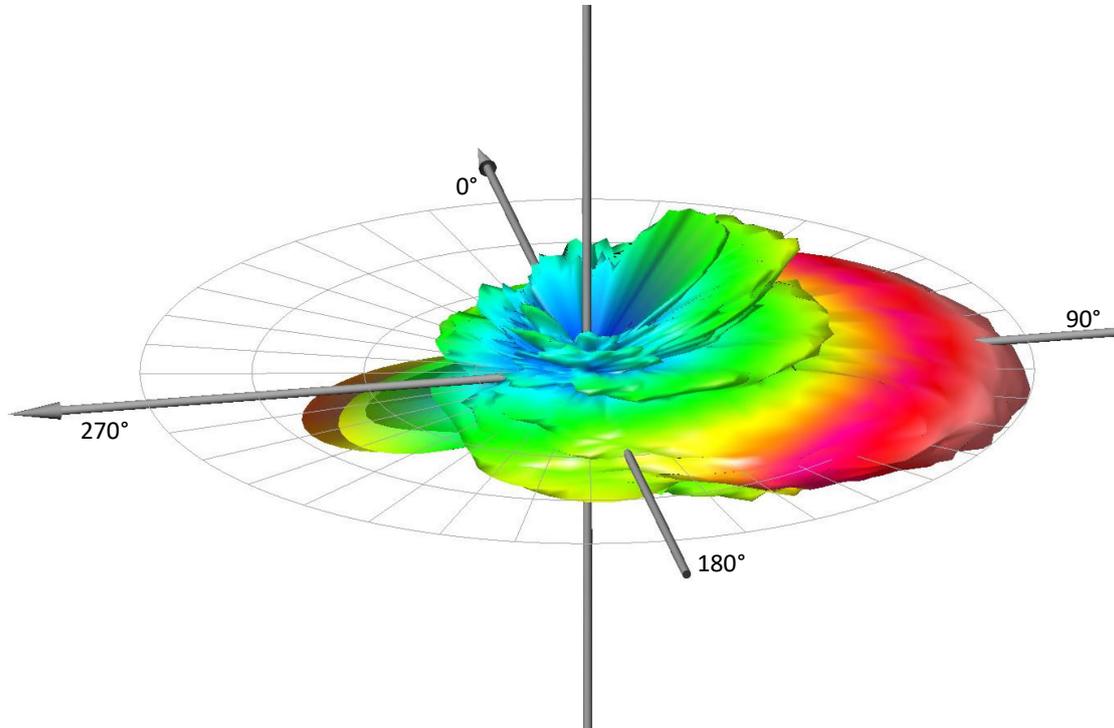


Abbildung 37: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor A

### 11.4.2 Sektor B

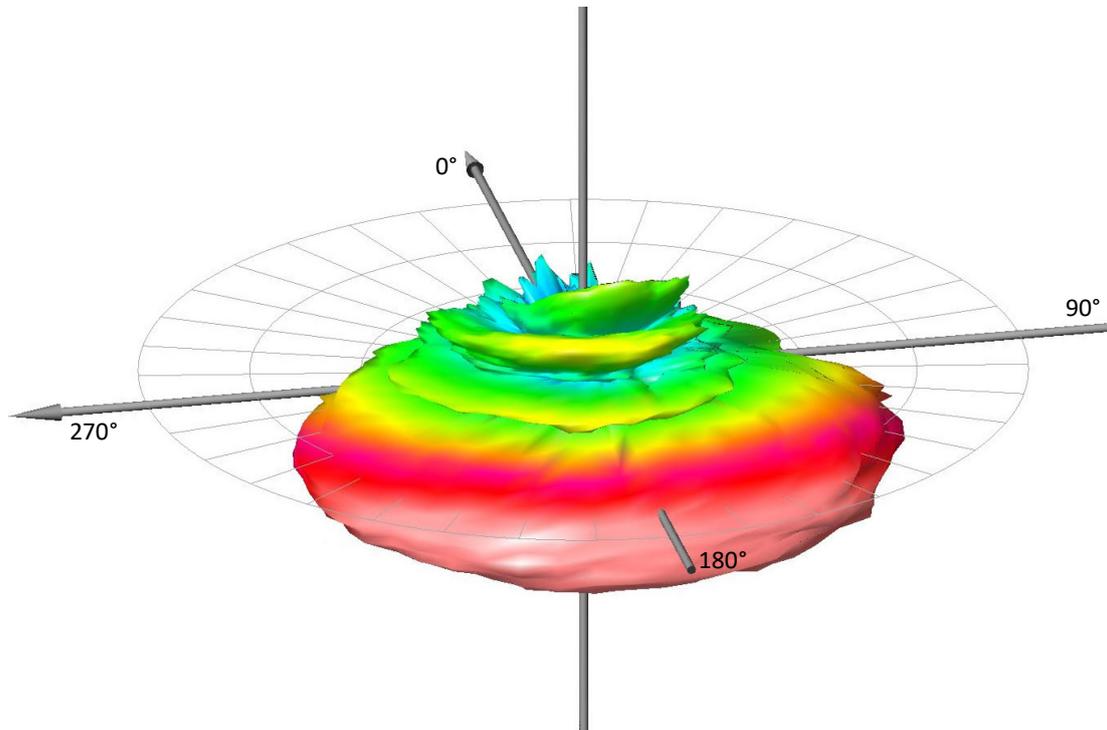


Abbildung 38: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor B

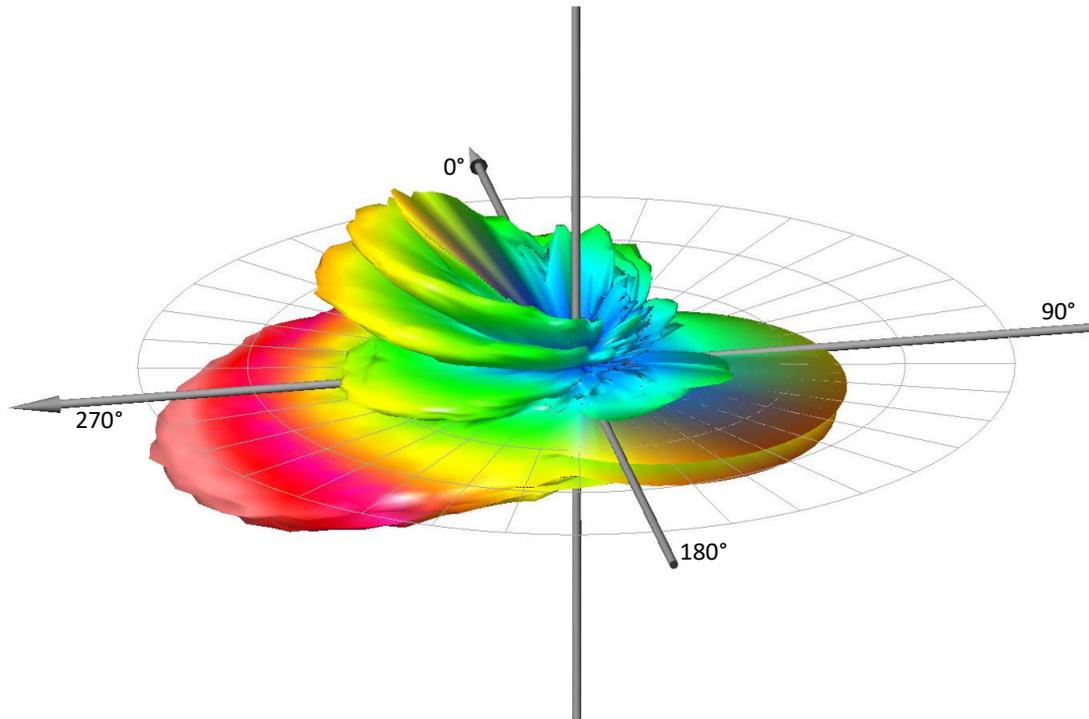


Abbildung 39: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor C

## 11.4.4 Summendiagramm Sektor A, B, C

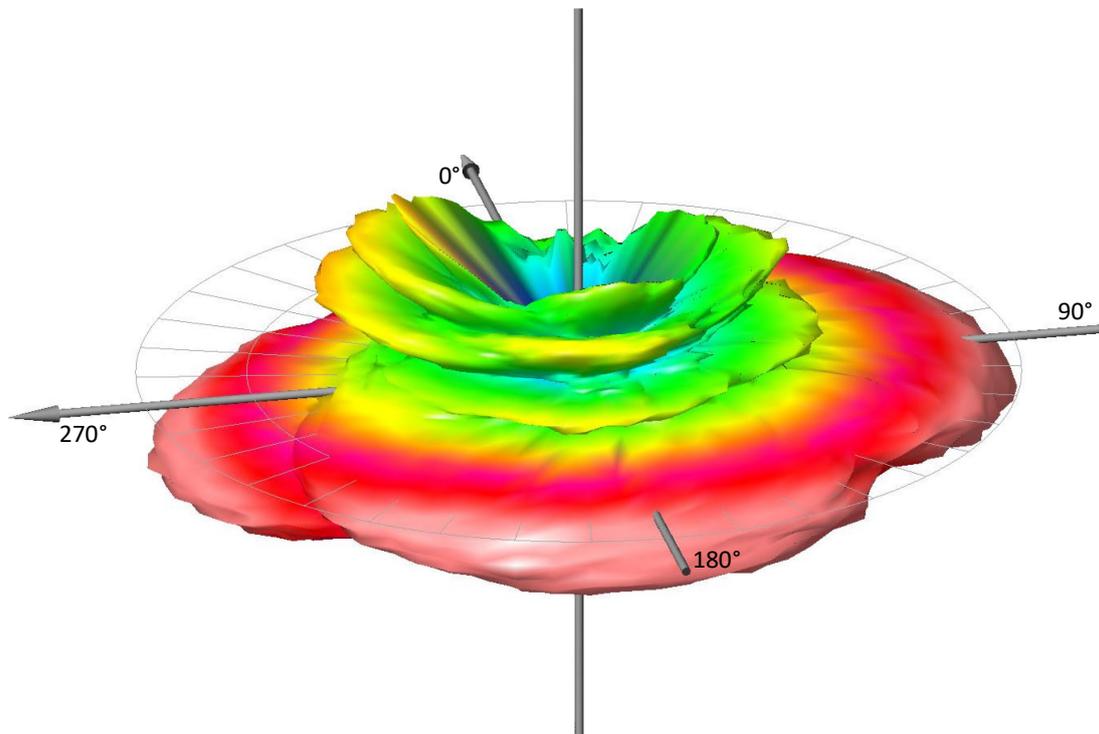


Abbildung 40: 3D-Diagramm UMTS900 Summe Ansicht 1

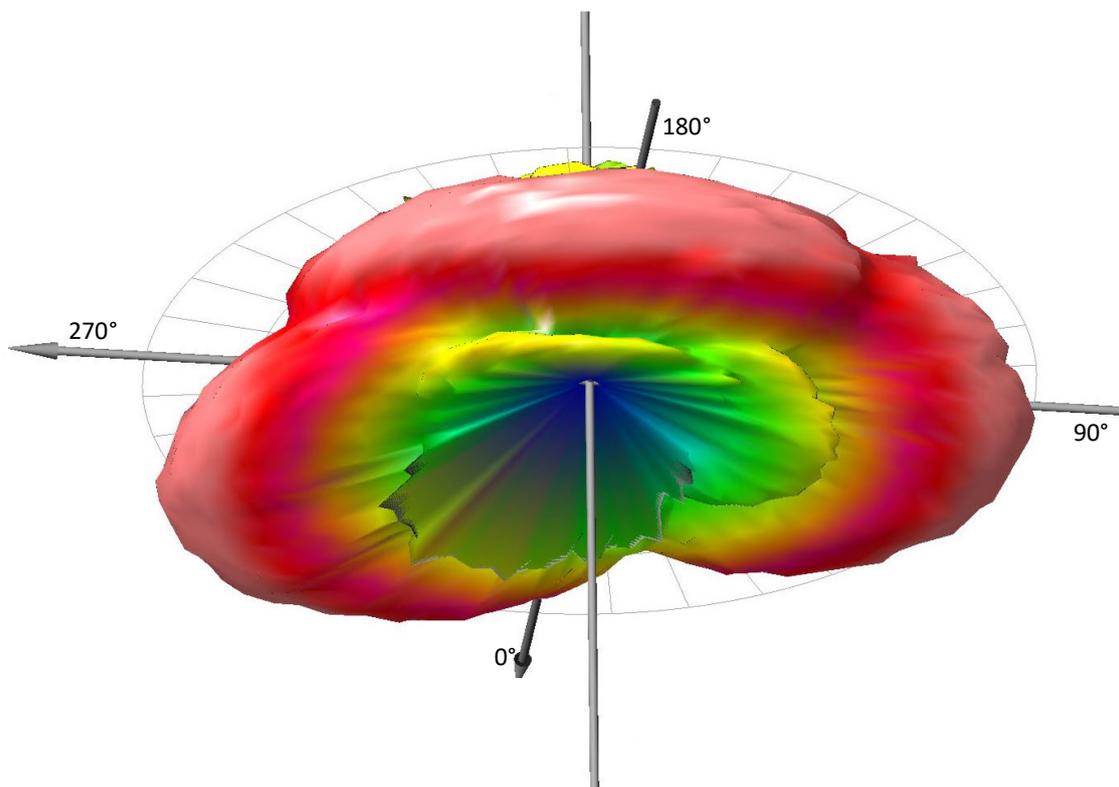


Abbildung 41: 3D-Diagramm UMTS900 Summe Ansicht 2

## 12 Erkenntnisse

Die Ergebnisse dieser Pilotstudie können wie folgt zusammengefasst werden.

- Dreidimensionale Antennendiagramme konnten mit Hilfe der Fa. PreHCM Services dargestellt werden.
- Vertikale- und horizontale Antennendiagramme wurden erstellt und mit den Herstellerdiagrammen verglichen.
- Die Sendeleistungen ERP wurden verifiziert und werden in folgender Tabelle zusammengefasst

Band	Sektor	ERP gemessen	ERP gem. Betreiber	Delta
LTE800	A	53.58 dBm	54.6 dBm	-1.02 dB
	B	53.74 dBm	54.6 dBm	-0.86 dB
	C	54.37 dBm	54.6 dBm	-0.23 dB
LTE1800	A	58.34 dBm	59.1 dBm	-0.76 dB
	B	57.29 dBm	59.1 dBm	-1.81 dB
	C	58.92 dBm	59.1 dBm	-0.18 dB
UMTS900	A	57.41 dBm	57.4 dBm	0.01 dB
	B	57.31 dBm	57.4 dBm	-0.09 dB
	C	57.03 dBm	57.4 dBm	-0.37 dB

**Tabelle 20: Zusammenfassung ERP**

- Mittels isotroper Messantenne konnten alle abgestrahlten Polarisierungen erfasst werden.
- Messunsicherheiten wurden in Zusammenarbeit mit METAS definiert.

Die Messdaten können auch in einem elektronischen Format zur Verfügung gestellt werden, so dass diese in ein Funkplanungs- oder NIS Berechnungstool eingelesen werden können, um entsprechende Nachberechnungen mit realen Daten durchzuführen.

## 13 Verzeichnisse

### 13.1 Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BCCH	Broadcast Control Channel
CL	Cable Loss
CPICH	Common Pilot Channel
dB	Dezibel
dBd	Dezibel referenziert zu Dipol
dBm	Dezibel-Milliwatt
D-GPS	Differential-GPS
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
EC/I0	Energy per Chip to Interference Ratio
ERP	Effective Radiated Power
FSPL	Free Space Loss
GPS	Global Positioning System
HRP	Horizontal Radiation Pattern
LTE	Long Term Evolution
NIS	Nicht Ionisierende Strahlung
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PCI	Physical Cell Identity
RB	Ressource Block
RS	Reference Signal
RS-CINR	Reference Signal Carrier to Interference and Noise Ratio
RS-CP	Reference Signal Code Power
RS-RP	Reference Signal Received Power
RS-RQ	Reference Signal Received Quality
RTK	Real Time Kinematic
SC	Sub-Carrier
SDR	Software Defined Radio
SIR	Signal to Interference Ratio
UARFCN	UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTC	Coordinated Universal Time
VRP	Vertical Radiation Pattern

Tabelle 21: Abkürzungsverzeichnis

## 13.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messdrohne	8
Abbildung 2: Messaufbau	9
Abbildung 3: SDR Scanner	10
Abbildung 4: Messantenne	11
Abbildung 5: RTK GPS	12
Abbildung 6: Darstellung der Messungen	13
Abbildung 7: Messstandort Luftbild	15
Abbildung 8: Visualisierung des Flugplanes	19
Abbildung 9: LTE800 Sektor A VRP	20
Abbildung 10: LTE800 Sektor A HRP	21
Abbildung 11: LTE800 Sektor B VRP	22
Abbildung 12: LTE800 Sektor B HRP	23
Abbildung 13: LTE800 Sektor C VRP	24
Abbildung 14: LTE800 Sektor C HRP	25
Abbildung 15: LTE1800 Sektor A VRP	28
Abbildung 16: LTE1800 Sektor A HRP	29
Abbildung 17: LTE1800 Sektor B VRP	30
Abbildung 18: LTE1800 Sektor B HRP	31
Abbildung 19: LTE1800 Sektor C VRP	32
Abbildung 20: LTE1800 Sektor C HRP	33
Abbildung 21: UMTS900 Sektor A VRP	36
Abbildung 22: UMTS 900 Sektor A HRP	37
Abbildung 23: UMTS 900 Sektor B VRP	38
Abbildung 24: UMTS 900 Sektor B HRP	39
Abbildung 25: UMTS 900 Sektor C VRP	40
Abbildung 26: UMTS 900 Sektor C HRP	41
Abbildung 27: 3D-Diagramm LTE800 Sektor A	44
Abbildung 28: 3D-Diagramm LTE800 Sektor B	45
Abbildung 29: 3D-Diagramm LTE800 Sektor C	45
Abbildung 30: 3D-Diagramm LTE800 Summe Ansicht 1	46
Abbildung 31: 3D-Diagramm LTE800 Summe Ansicht 2	46
Abbildung 32: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor A	47
Abbildung 33: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor B	47
Abbildung 34: 3D-Diagramm LTE1800 Sektor C	48
Abbildung 35: 3D-Diagramm LTE1800 Summe Ansicht 1	49
Abbildung 36: 3D-Diagramm LTE1800 Summe Ansicht 2	49
Abbildung 37: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor A	50
Abbildung 38: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor B	50
Abbildung 39: 3D-Diagramm UMTS900 Sektor C	51
Abbildung 40: 3D-Diagramm UMTS900 Summe Ansicht 1	52
Abbildung 41: 3D-Diagramm UMTS900 Summe Ansicht 2	52

## 13.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung ERP	5
Tabelle 2: Technische Daten SDR Scanner	10
Tabelle 3: Technische Daten Messantenne	11
Tabelle 4: Messunsicherheiten LTE 800 / UMTS900	14
Tabelle 5: Messunsicherheiten LTE 1800	14
Tabelle 6: Angaben Messstandort	16
Tabelle 7: Berechnung ERP	18
Tabelle 8: Übersicht LTE800 Sektor A	20
Tabelle 9: Übersicht LTE800 Sektor B	22
Tabelle 10: Übersicht LTE800 Sektor C	24
Tabelle 11: ERP LTE800	25
Tabelle 12: Übersicht LTE1800 Sektor A	28
Tabelle 13: Übersicht LTE1800 Sektor B	30
Tabelle 14: Übersicht LTE1800 Sektor C	32
Tabelle 15: ERP LTE1800	33
Tabelle 16: Übersicht UMTS900 Sektor A	36
Tabelle 17: Übersicht UMTS900 Sektor B	38
Tabelle 18: Übersicht UMTS900 Sektor C	40
Tabelle 19: ERP UMTS900	41
Tabelle 20: Abkürzungsverzeichnis	54