

## Teil II

# Wie werden HF-Immissionen korrekt gemessen?



Quelle: rohde-schwarz.de



Fachgebiet  
HF- und Mikrowellentechnik  
[www.tu-ilmenau.de/hmt](http://www.tu-ilmenau.de/hmt)

Dr. Chr. Bornkessel

SS2023

Folie II.1

  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

# Überblick Teil II

1. Grundlegende Messarten
2. Arbeiten mit dem Spektrumanalysator
3. Feldverteilung und Konsequenzen
4. Korrekte Messungen:
  - Rundfunk: UKW, DAB, DVB-T
  - Mobilfunk: GSM, TETRA, LTE, 5G
  - Wohnung/Büro: DECT, WLAN
5. Typische Messergebnisse und Einflussfaktoren für die Immission



# 1. Breitband- und Spektralmessungen

## Breitband



Quelle: narda-sts.de

- + einfach (Material und Zeit)
- begrenzte Empfindlichkeit
- Fehlbewertung bei modulierten Signalen möglich
- keine Frequenzselektivität (Hochrechnung schwierig)

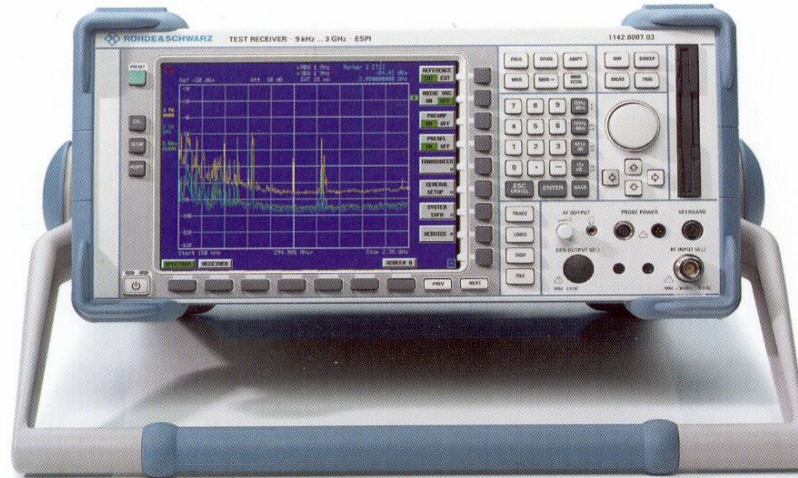
## Spektral



Quelle: rohde-schwarz.de

- nur für erfahrenes Personal
- größerer Aufwand
- + ausreichend empfindlich
- + frequenzselektiv (Hochrechnung möglich)
- + genauest mögliche Messung

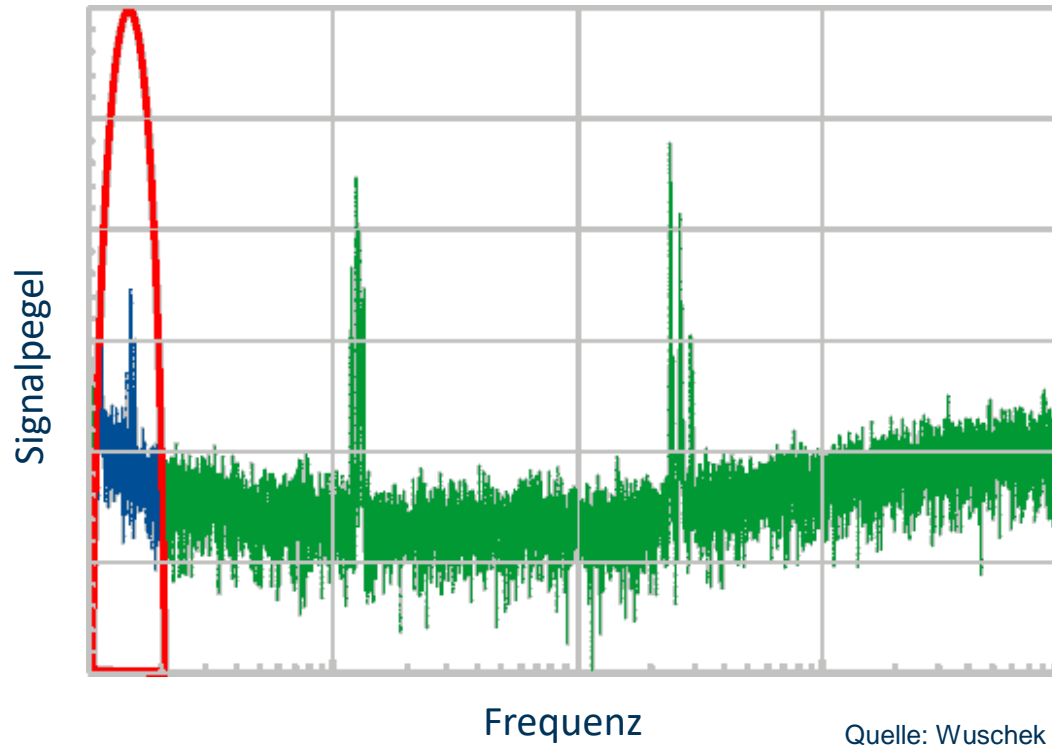
## 2. Der Spektrumanalysator



Quelle: rohde-schwarz.de

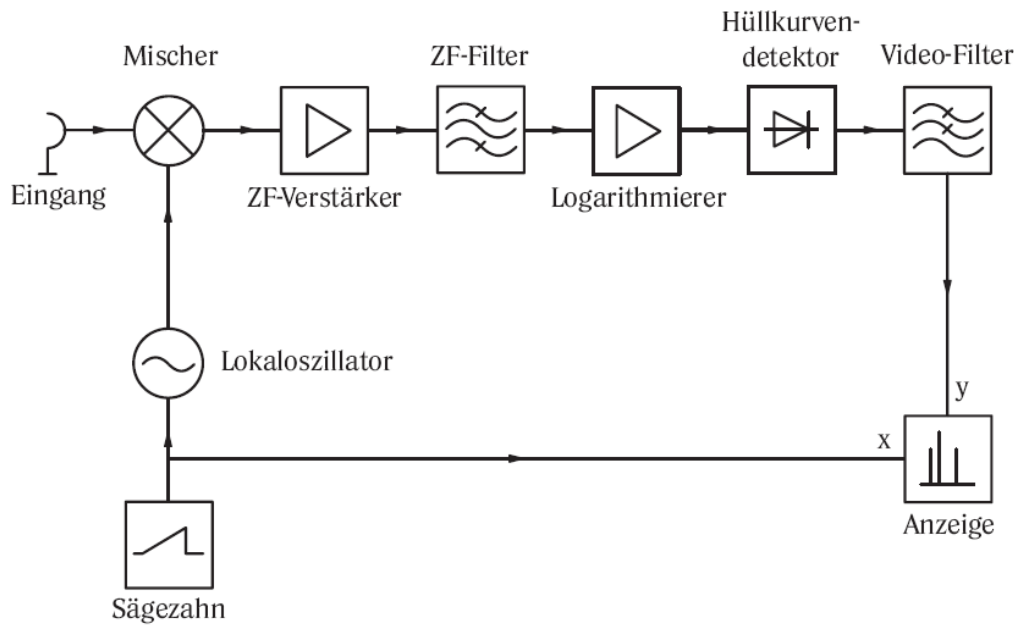
- Das wichtigste Messmittel ist der Spektrumanalysator
- Er gestattet sowohl die Erfassung von (Stör-)Signalen, als auch deren normgerechte Bewertung
- Im HF-Bereich werden Analysatoren meist nach dem Überlagerungsprinzip aufgebaut

# Funktionsweise Spektrumanalysator

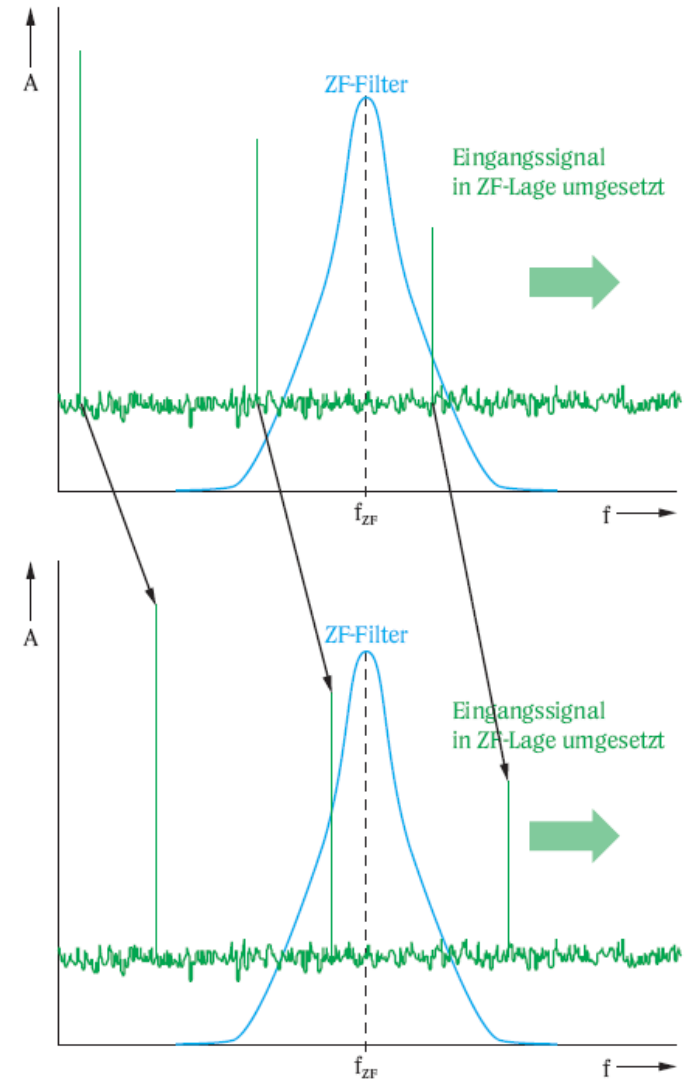


Ein definierter Frequenzbereich wird mit einer wählbaren Auflösung (RBW) "abgesucht".

# Spektrumanalysator mit Überlagerungsprinzip



Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse

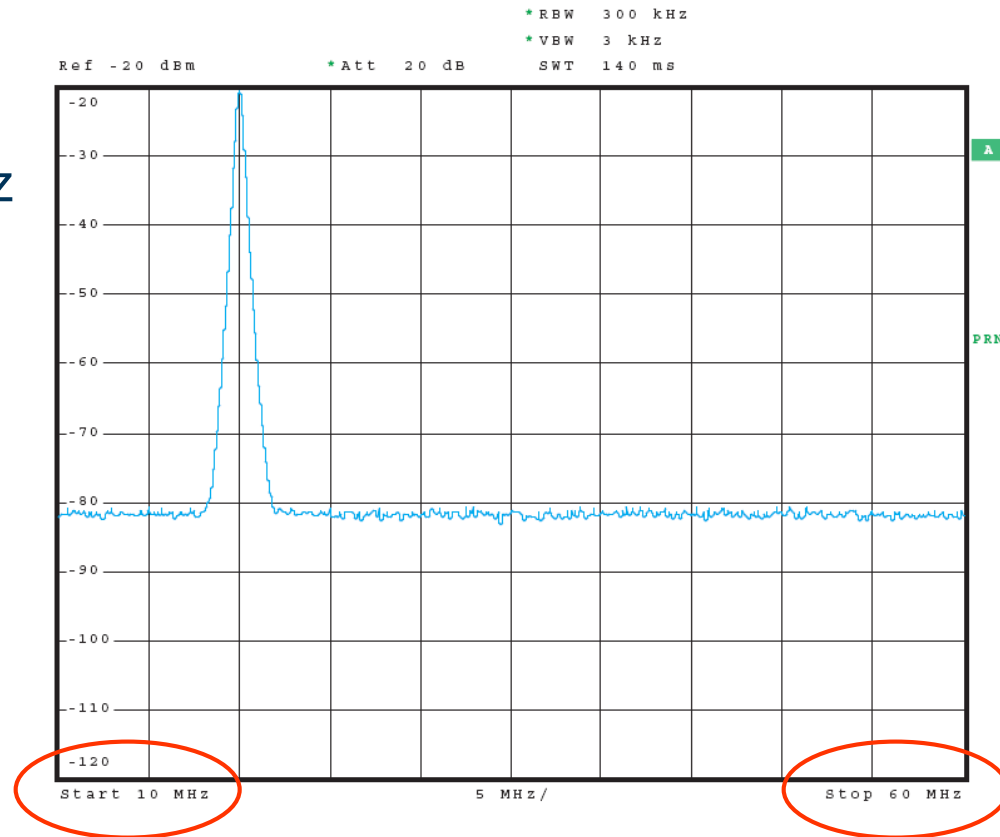


# Einstellung des Frequenzbereichs

Der darzustellende Frequenzbereich kann durch

- Start- oder Stopp-Frequenz (niedrigste bzw. höchste darzustellende Frequenz), oder
- Mittenfrequenz (Center Frequency) und den Darstellbereich (Span), zentriert um die Mittenfrequenz,

eingestellt werden.



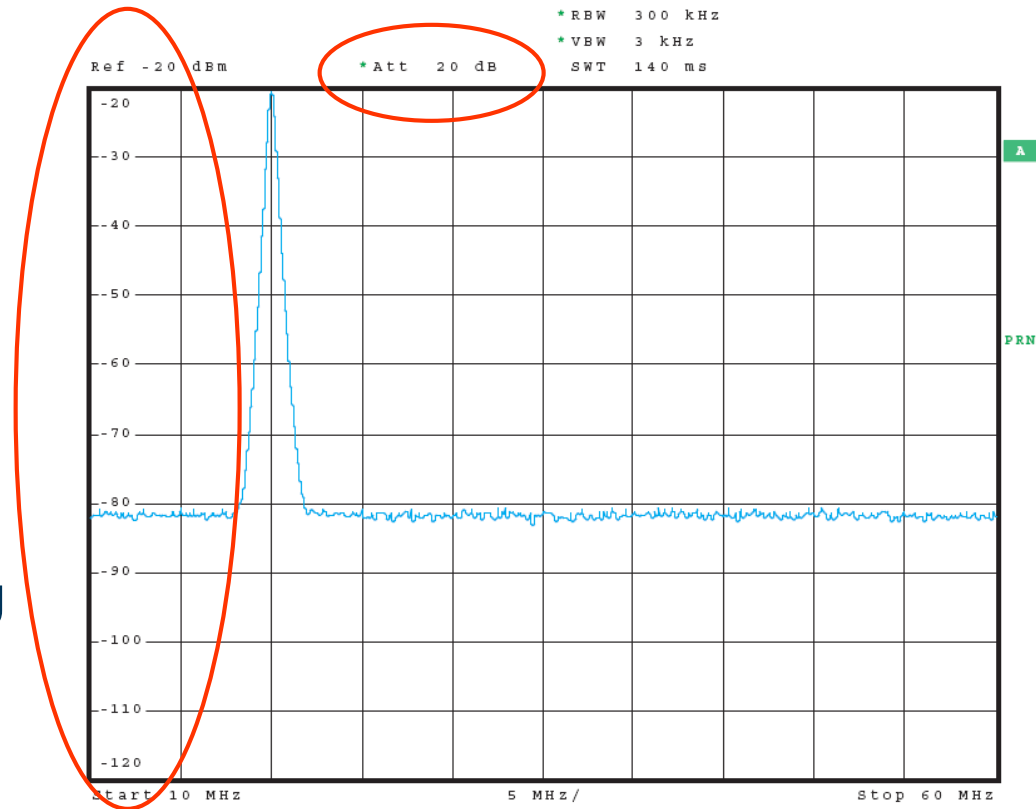
Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse

# Einstellung des Pegelbereichs

Die Einstellung erfolgt über

- den maximal darzustellenden Pegel (Reference Level) und den
- Darstellbereich

Die Einstellungen sind auch von der gewählten Dämpfung der eingangsseitigen Eichleitung abhängig.



Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse

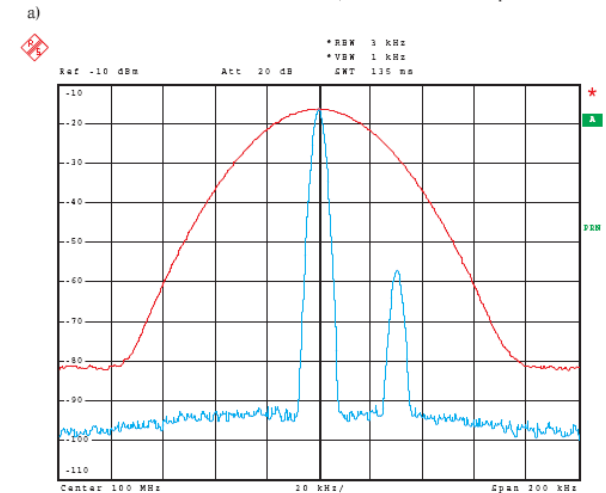
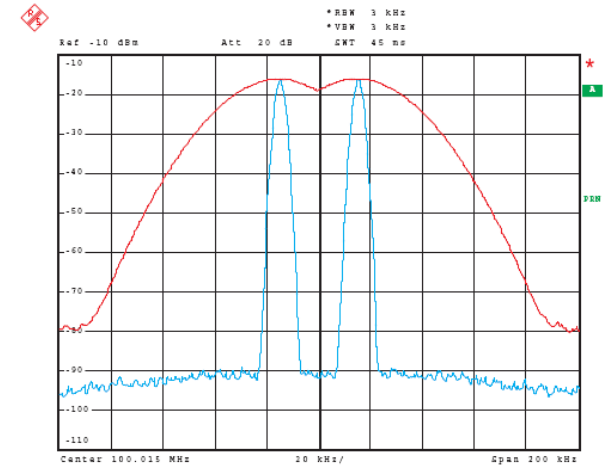




# Auflösebandbreite (RBW)

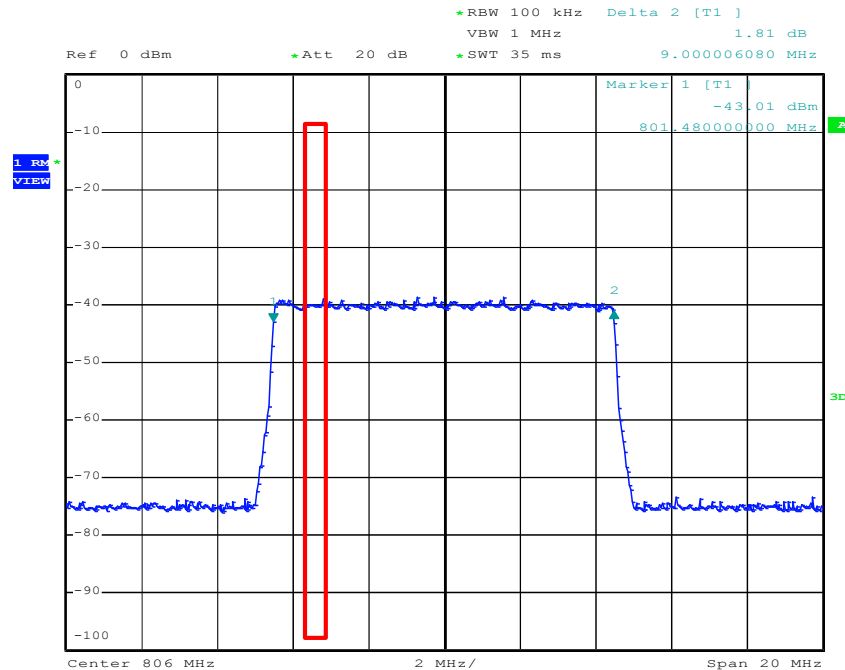
- Die Auflösungsbandbreite legt die 3-dB-Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters fest, mit der die Signale im Analysator gemessen werden.
- Die RBW muss immer mindestens so groß sein wie die Bandbreite des zu messenden Signals, da ansonsten das Signal unterbewertet wird.
- Bei zu großer RBW besteht die Gefahr der Überbewertung, da eventuell vorhandene Nachbarkanäle einbezogen werden.

2 Sinusträger,  
blau - RBW = 3 kHz,  
rot - RBW = 30 kHz



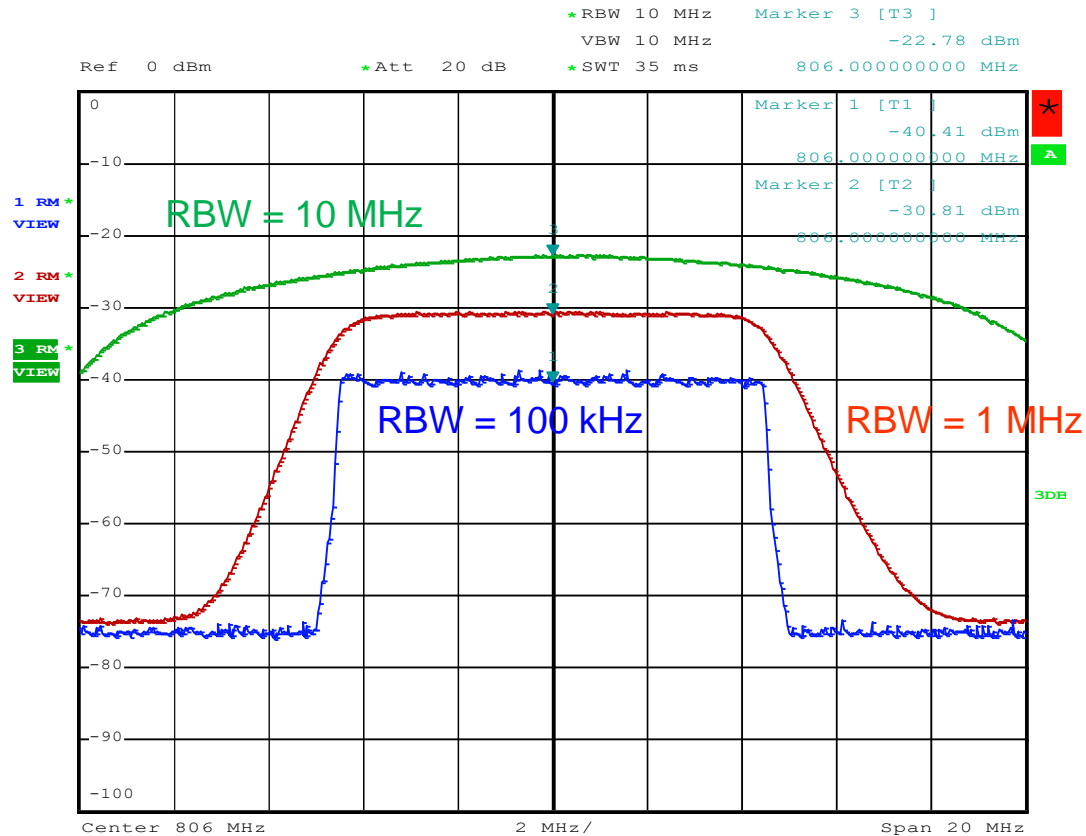
b) Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektralanalyse

# Einfluss der RBW: LTE-Signal, 9 MHz



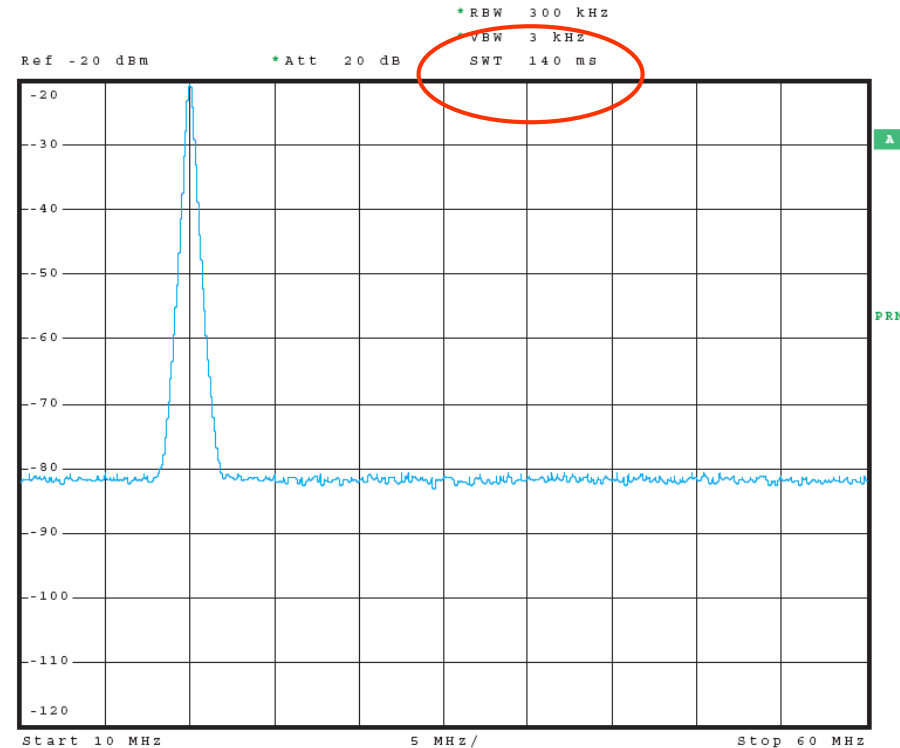
- RBW=100 kHz:
  - Exposition wird stark unterschätzt
  - Signalform wird gut reproduziert → Übersichtsmessungen

# Korrekte RBW: LTE-Signal, 9 MHz



# Sweepzeit (Sweep Time, SWT)

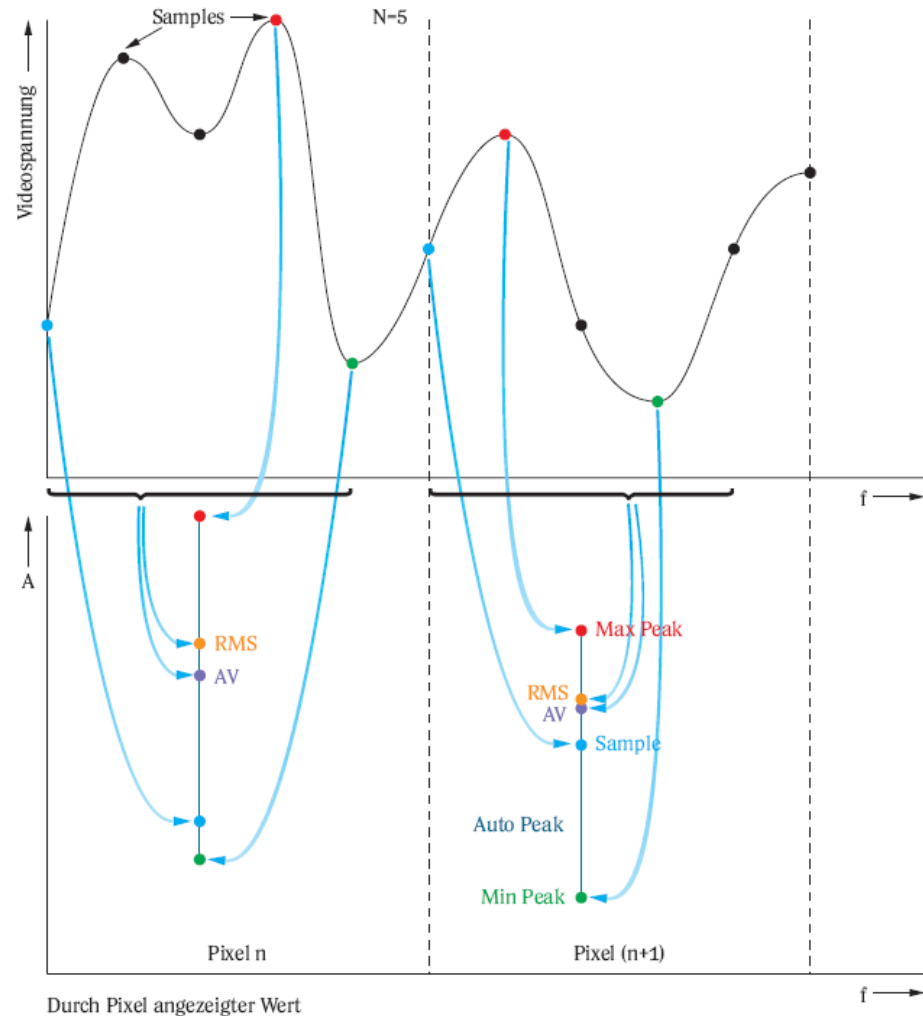
- Die Zeit, die benötigt wird, um das gesamte eingestellte Frequenzspektrum aufzunehmen, wird als Sweep Time bezeichnet.
- Bei einer zu kleinen SWT hat das ZF-Filter nicht genügend Zeit einzuschwingen (Amplituden- und Frequenzfehler).
- Ungeeignete Kombinationen zwischen RBW, Span und SWT werden oft automatisch erkannt ("uncal").



Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse

# Detektoren

- Moderne Spektrumanalysatoren verwenden zur Anzeige LCD-Displays.
- Bei diesen ist die Auflösung in x- (Frequenz-) und y- (Pegel)-Richtung begrenzt.
- Vor allem bei der Darstellung großer Frequenzbereiche enthält ein Pixel die Information eines großen Teilbereiches (d.h. viele Messwerte, sog. Samples oder Bins).
- Welcher Messwert durch das Pixel dargestellt wird, hängt vom gewählten Detektor ab.

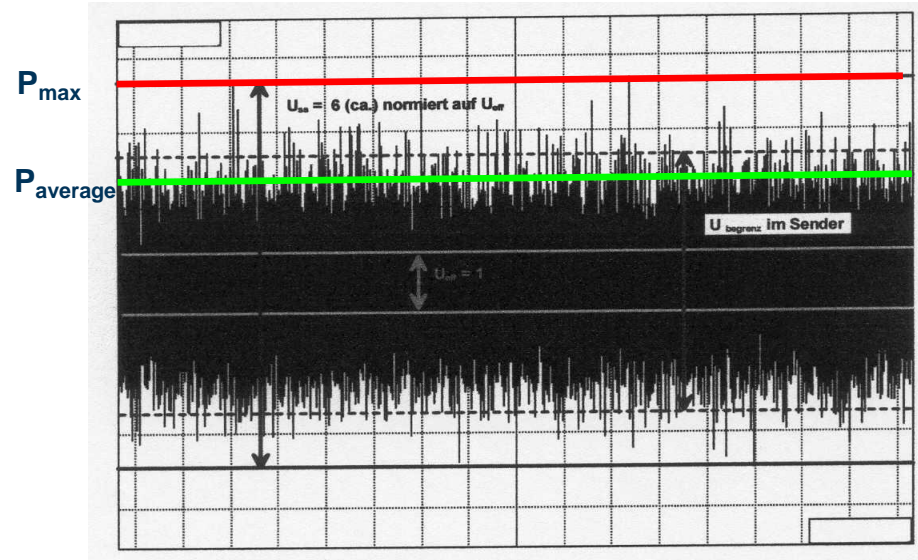


Durch Pixel angezeigter Wert

Quelle: Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse

# RMS-Detektion

- Die Grenzwerte sind als zeitliche Effektivwerte definiert (thermisches Äquivalent).
- Dies erfordert insbesondere bei digital modulierten Signalen (zeitlich stark schwankende Hüllkurve) den RMS-Detektor. Bei Peak-Detektor Fehlbewertung in Höhe des Crestfaktors möglich.
- RMS-Detektor erfordert ausreichende Sweepzeit (mind. ca. 100 ms), da RMS-Detektion durch *Berechnung* realisiert wird.

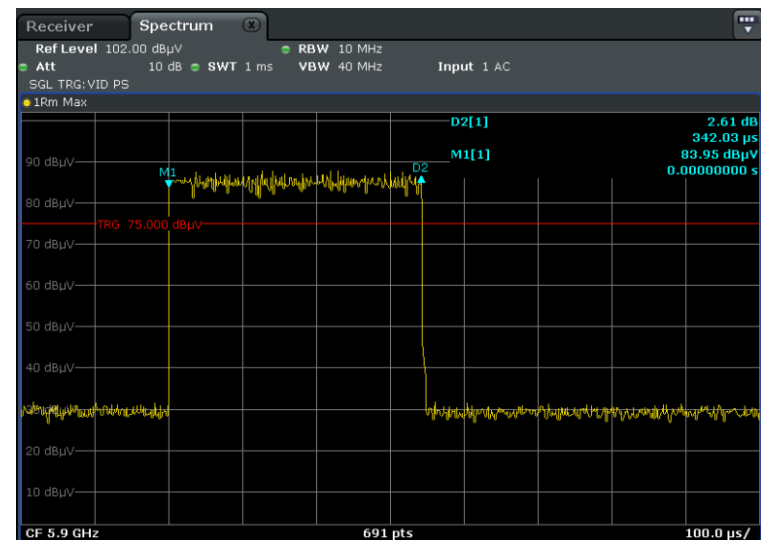


- Beispiel: UMTS-Signal (Zeitbereich)
- Crestfaktor  $C = P_{\max} / P_{\text{average}}$

# RMS-Detektion: Wahl der Sweepzeit

Die Sweepzeit darf nicht

- **zu klein** gewählt werden, da ansonsten nicht genügend Samples für eine RMS-Mittelung zur Verfügung stehen
- **zu groß** gewählt werden, da *bei gepulsten Signalen* ansonsten in die Pausen hinein“gemittelt“ wird. (Verweilzeit pro Pixel = Sweepzeit/Anzahl Horizontalpixel darf nur maximal so groß wie Pulsbreite sein!)



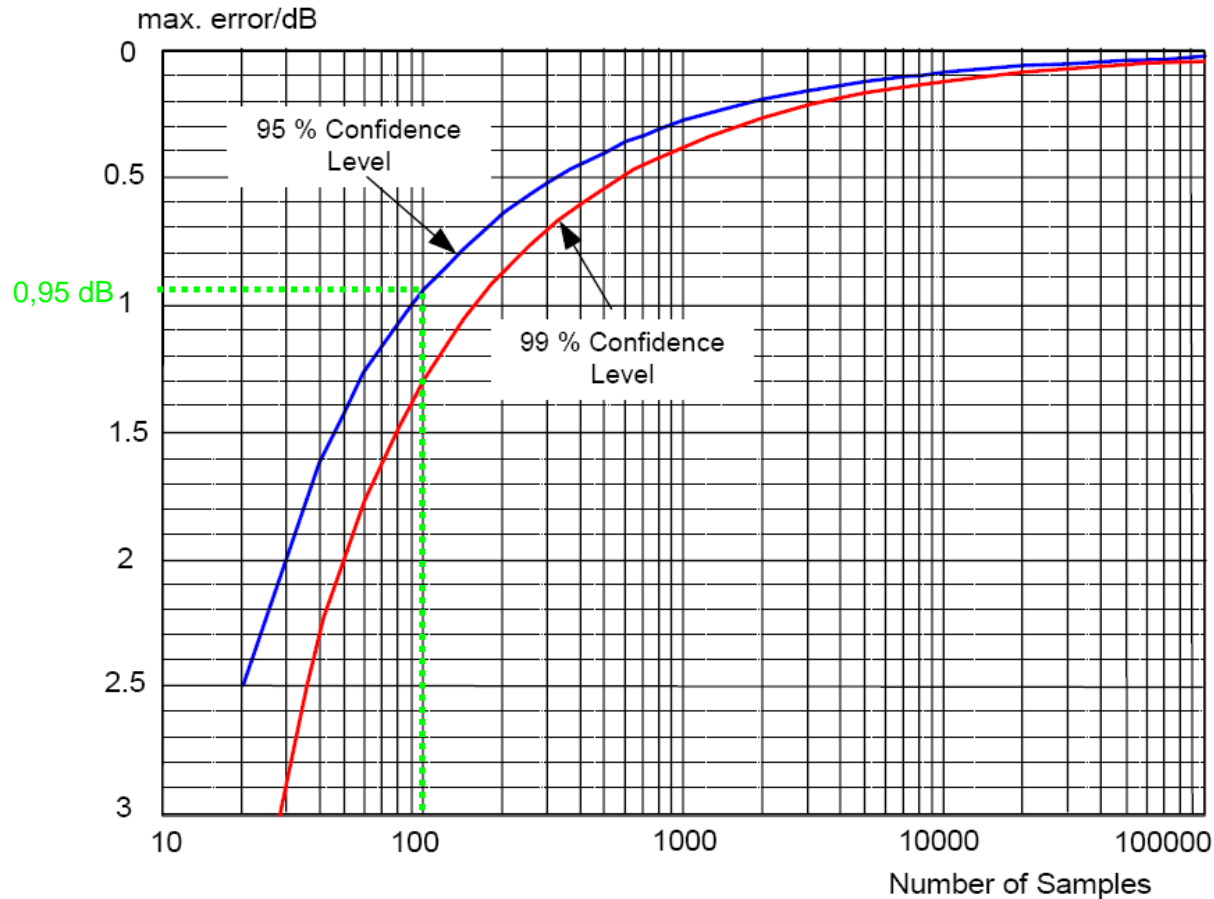
Beispiel: ITS-G5 Bakensignal (Quelle: Schilling, TU Ilmenau)

# RMS-Detektion: Anzahl der Samples

- Entscheidend für die Genauigkeit der RMS-Bestimmung ist die Anzahl der unabhängigen Samples pro Pixel
- Diese ergibt sich aus der Verweilzeit pro Pixel und der Einschwingzeit (settling time) des Auflösefilters:  
Einschwingzeit =  $1/\text{RBW}$  → bei  $\text{RBW}=1 \text{ MHz}$  ist Einschwingzeit  $1 \mu\text{s}$
- Beispiel DECT: Pulsbreite im Standby ca.  $100 \mu\text{s}$ 
  - Sei Anzahl der Horizontalpixel 1001 Punkte,  $\text{RBW}=1 \text{ MHz}$
  - Max. Sweepzeit = Verweilzeit pro Pixel x Punkteanzahl  
=  $100 \mu\text{s} \times 1001 \text{ Punkte} = 100 \text{ ms}$  (Verweilzeit = Pulsbreite)
  - Anzahl der unabhängigen Samples pro Pixel  
= Verweilzeit pro Pixel / Einschwingzeit =  $100 \mu\text{s} / 1 \mu\text{s} = 100$
  - Mit dieser Anzahl kann Fehler der Messung bestimmt werden (siehe nächste Folie)



# RMS-Detektion: Wieviel Samples sind genug?



Wiederholgenauigkeit einer RMS-Kanalleistungsmessung an einem Rauschsignal (Crestfaktor 10 dB), Quelle: Rohde & Schwarz

# Kalibrierte Messungen



$$E \text{ [dB}\mu\text{V/m]} = U_{\text{Display}} \text{ [dB}\mu\text{V]} + K_{\text{Antenne}} \text{ [dB/m]} + a_{\text{Kabel}} \text{ [dB]}$$

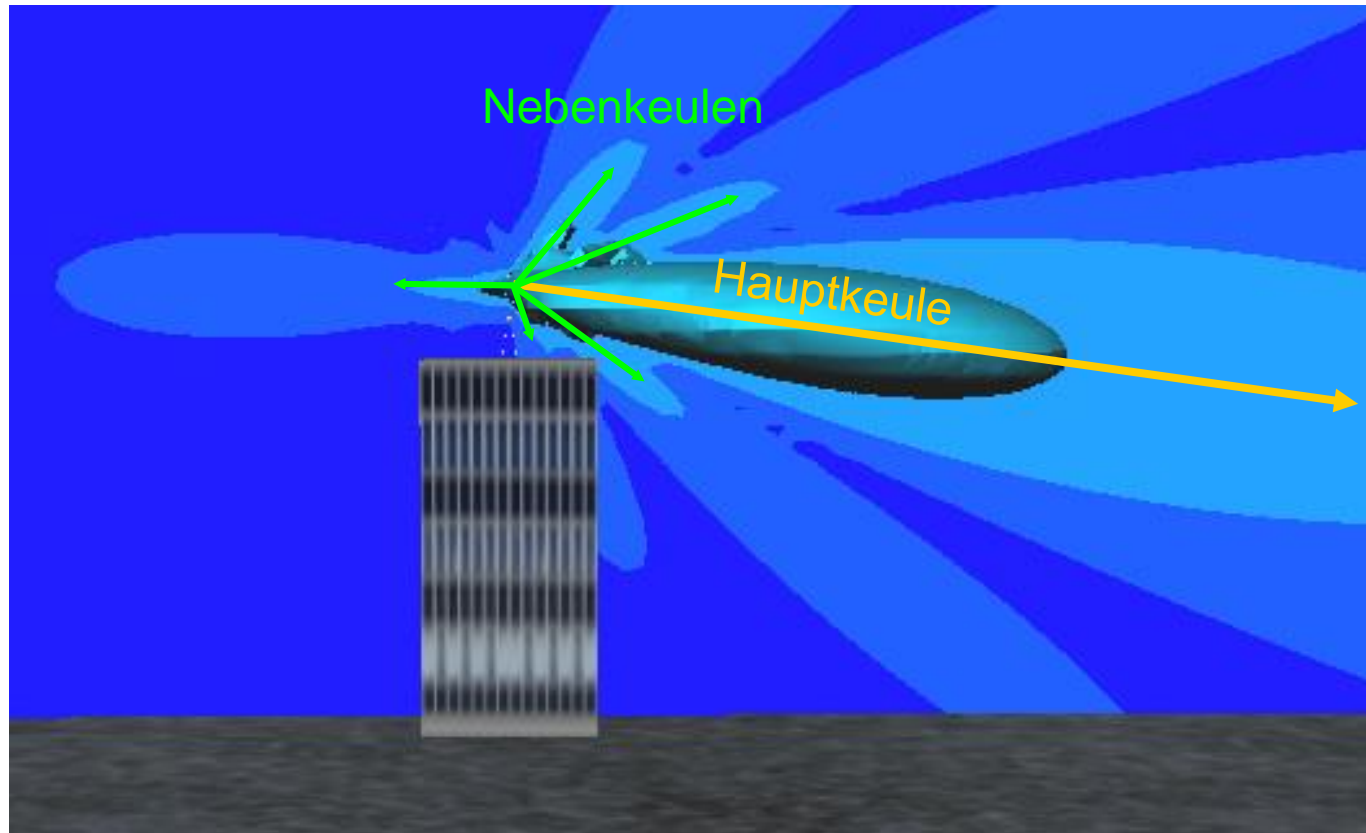
- $U_{\text{Display}}$  = vom Analysator angezeigter Wert
- $K_{\text{Antenne}}$  = Antennenfaktor (Kalibrierbericht)
- $a_{\text{Kabel}}$  = Kabeldämpfung (Kalibrierbericht)
- Bei modernen Analysatoren wird die Feldstärkeberechnung aus der gemessenen Spannung automatisch vorgenommen.

# 3. Feldverteilung und Konsequenzen

- Örtliche Feldstärkevariation
- Zeitliche Feldstärkevariation
- Anforderungen an Messverfahren
- Vorstellung und Bewertung von Messmethodiken
- Einfluss des Messpersonals auf die gemessene Exposition

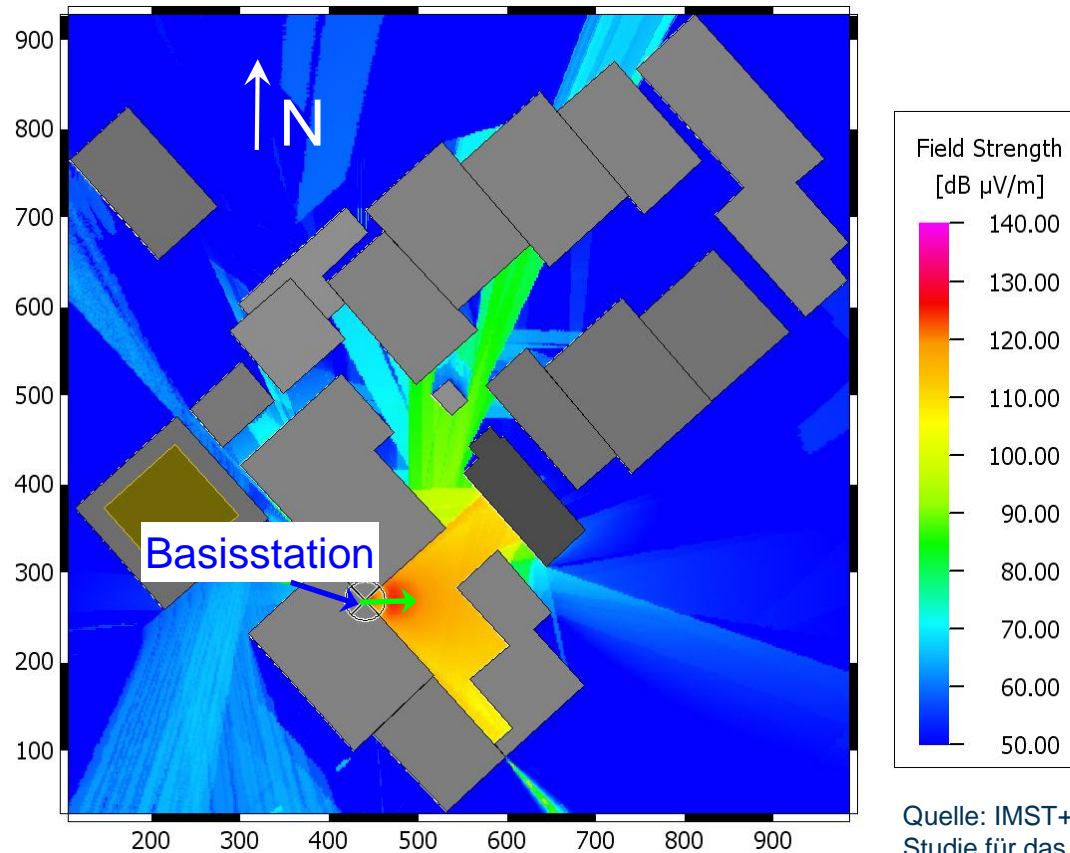


# Großskalige örtliche Variation: Antenne



- Variationen von einigen 10 dB in Abhängigkeit vom Ort

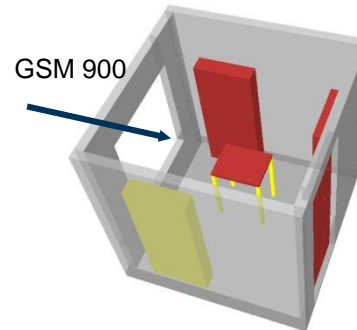
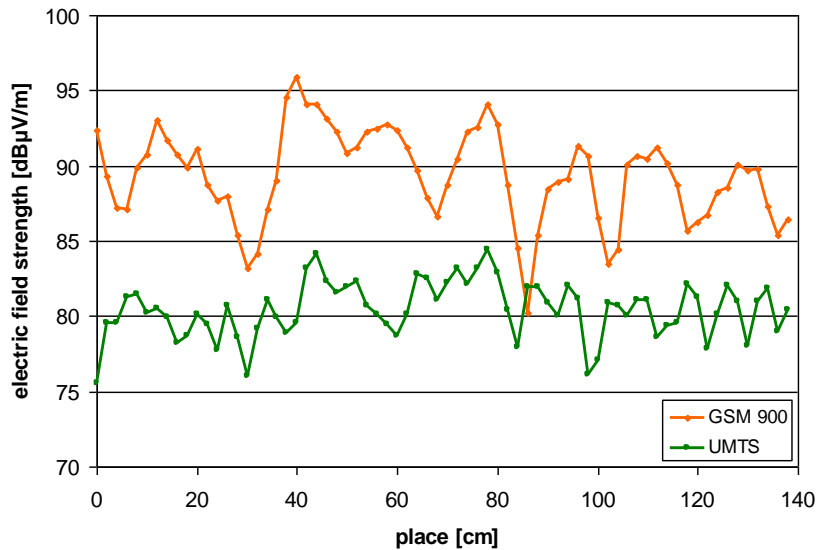
# Großskalige örtliche Variation: Abschattung



- Variationen von einigen 10 dB, aber Reflexion und Beugung beachten!

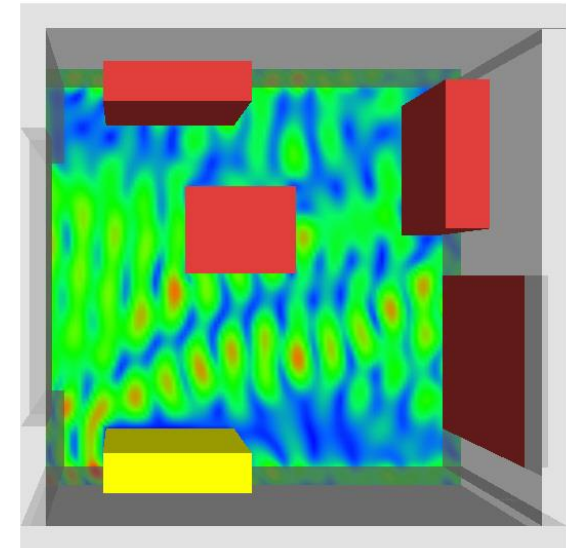
# Kleinskalige örtliche Variation: Fading

Messung: GSM 900 und UMTS



Quelle: IMST+EM-Institut,  
Exposition durch UMTS,  
Studie für das BfS, 2006

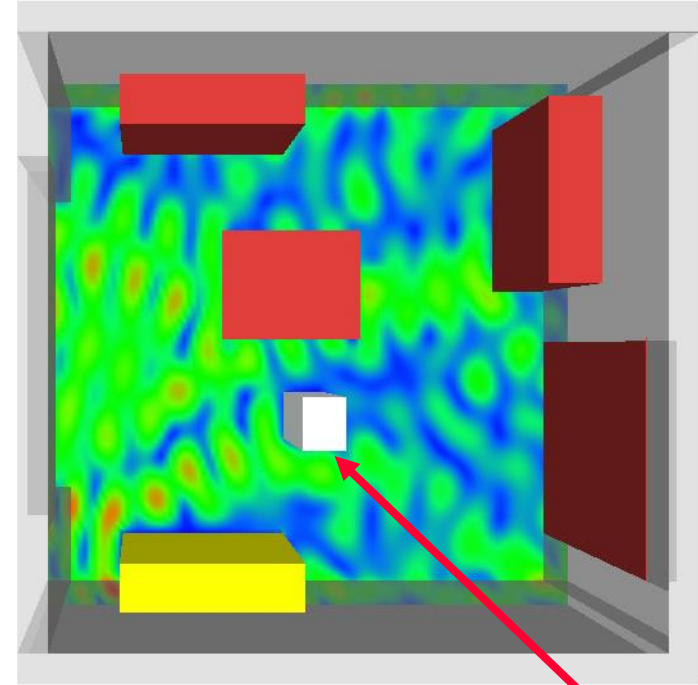
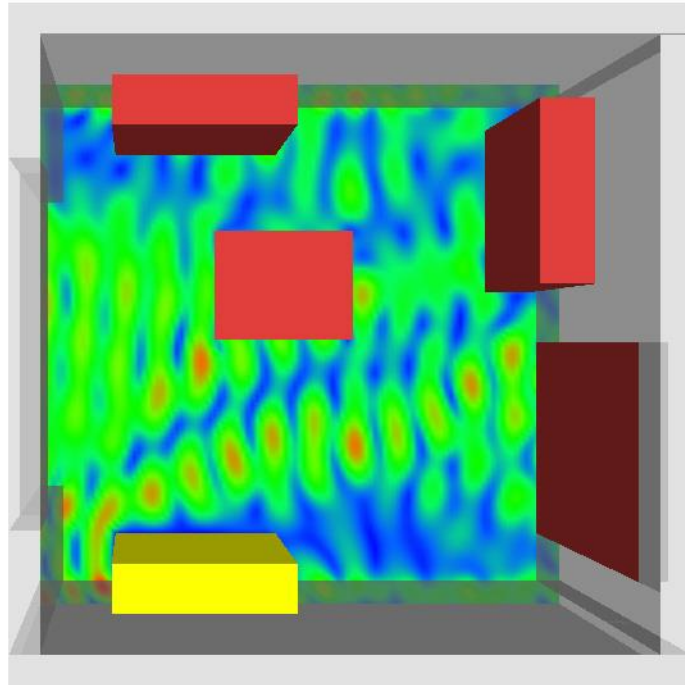
Simulation: GSM 900



- Kleinskalige Schwankungen (fast fading) vor allem innerhalb von Räumen durch Mehrwegeausbreitung, teilweise bis zu 20 dB
- Auch in Outdoor-Szenarien (UKW-Radio an Ampel)

→ Messungen an einem Punkt sind nicht repräsentativ!

# Anwesenheit von Personen

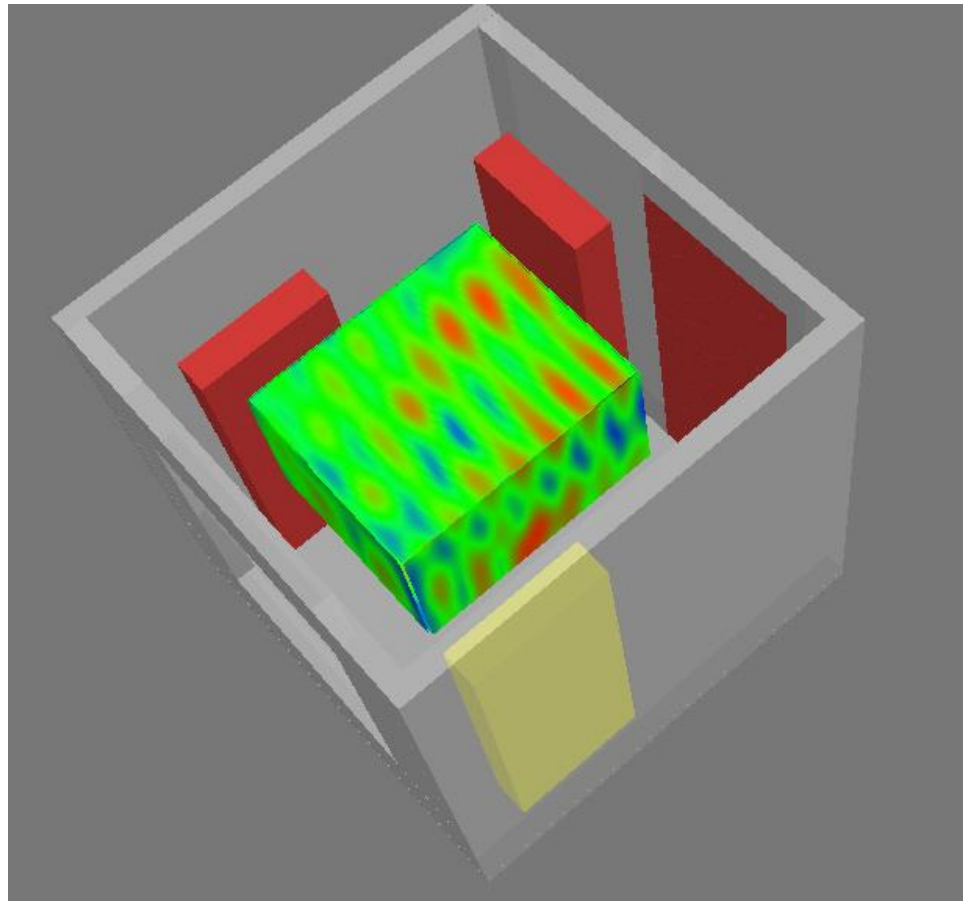


Quelle: IMST, Exposition durch GSM-Basisstationen, Studie für das BfS, 2005

Person

- Veränderung der Immission nicht nur im Bereich der Person

# Räumliche Mittelwertbildung?

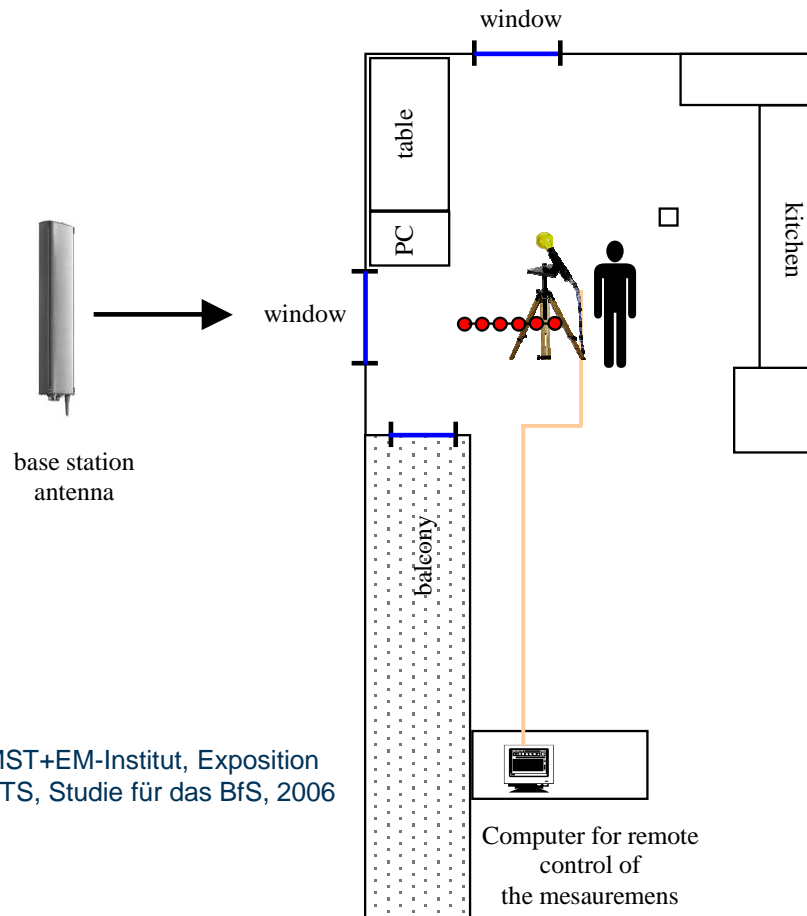


## Berechnungsbeispiel

- Maximale Feldstärke:  
**2,0 V/m**
- Mittlere Feldstärke im gesamten Volumen:  
**1,0 V/m**
- Mittlere Feldstärke über 5 Punkte in einer Ebene 1,6 m über dem Boden:  
**0,6 V/m**



# Maximumsuche: Prescan?

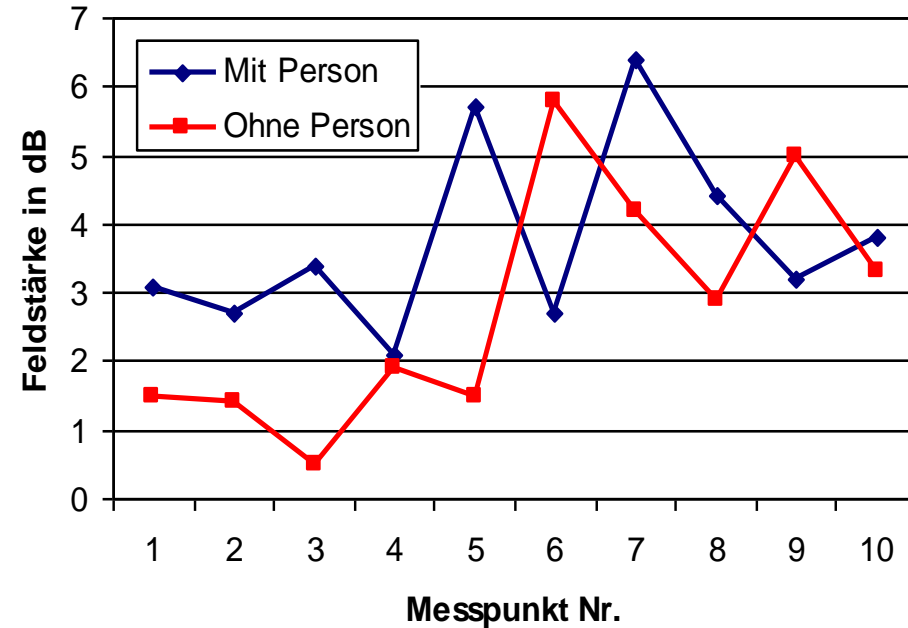
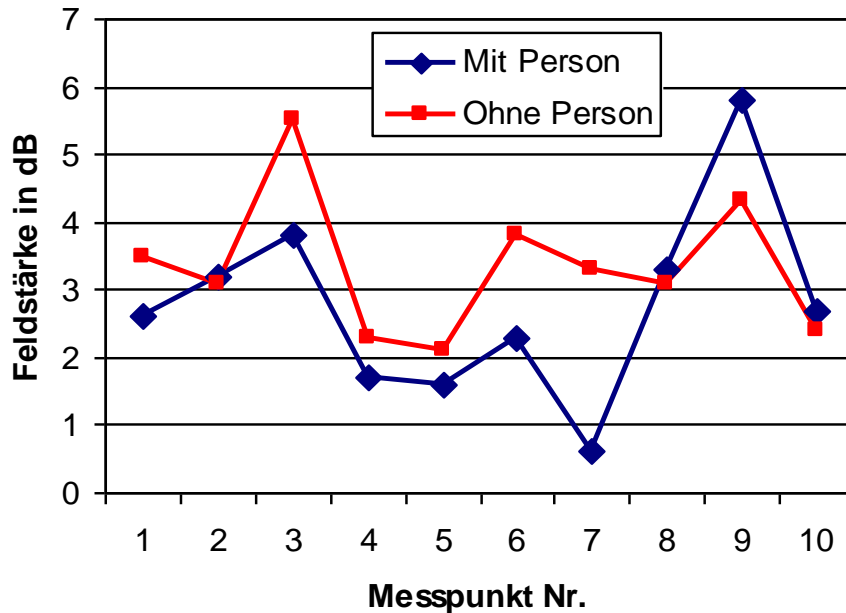


Quelle: IMST+EM-Institut, Exposition durch UMTS, Studie für das BfS, 2006



- Messungen an 10 Punkten auf einer Linie mit und ohne Person

# Ergebnisse der Prescanuntersuchungen

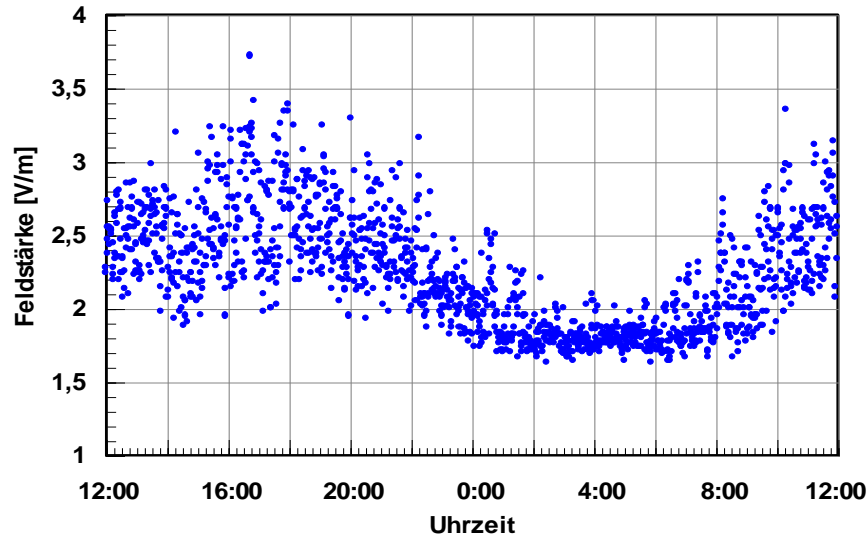


Quelle: IMST+EM-Institut, Exposition durch UMTS, Studie für das BfS, 2006

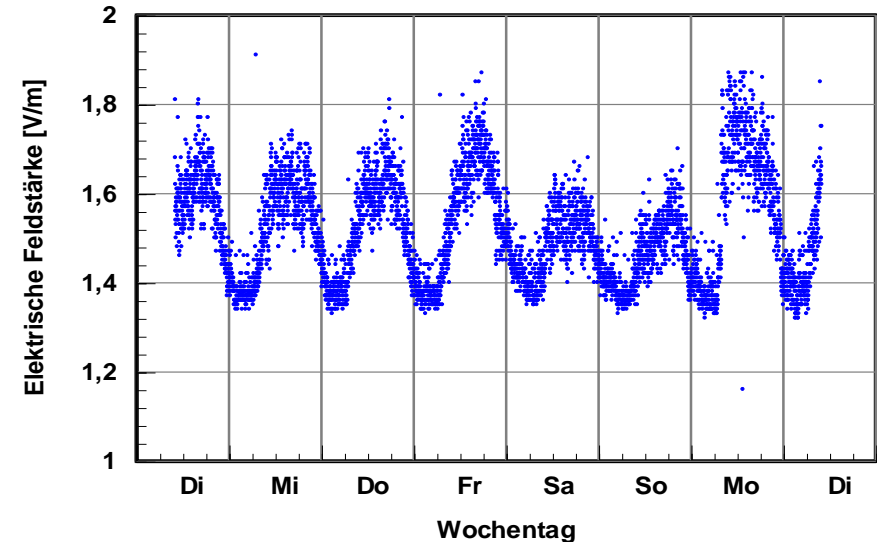
- Ort des Maximums ändert sich, aber Pegel nahezu unverändert
- Prescan zur Maximumsuche fragwürdig

# Zeitliche Schwankungen

Messung: GSM 24 Stunden



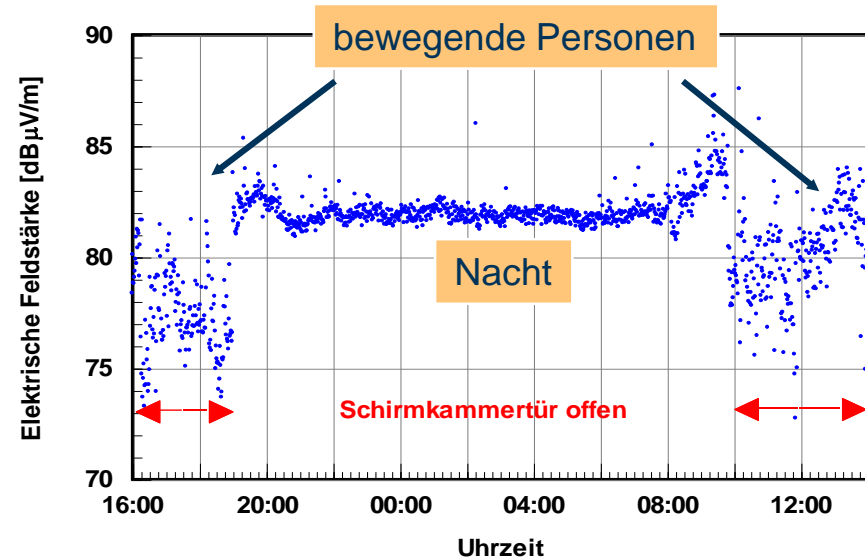
Messung: GSM 7 Tage



Quelle: IMST, Exposition durch GSM-Basisstationen, Studie für das BfS, 2005

- Groß- und kleinskalige zeitliche Schwankungen (Verkehrsauslastung)
  - Messungen an einem festen Zeitpunkt sind nicht repräsentativ!
  - Messungen in einem beliebigen 6-Minuten Intervall nicht repräsentativ!

# Zeitliche Variation des Funkkanals



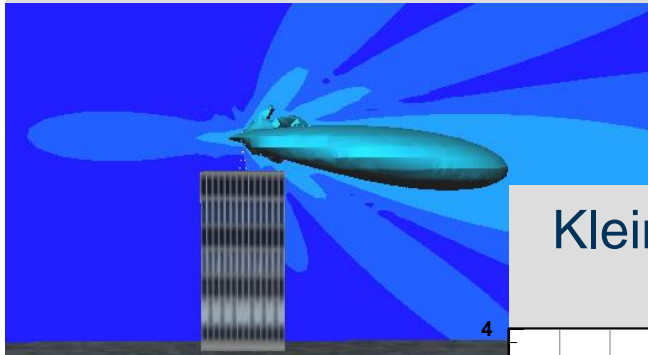
Quelle: IMST, Exposition durch GSM-Basisstationen, Studie für das BfS, 2005

- Zeitliche Änderungen im Ausbreitungspfad zwischen Sender und Messpunkt, z.B. durch sich bewegende Personen oder Autos

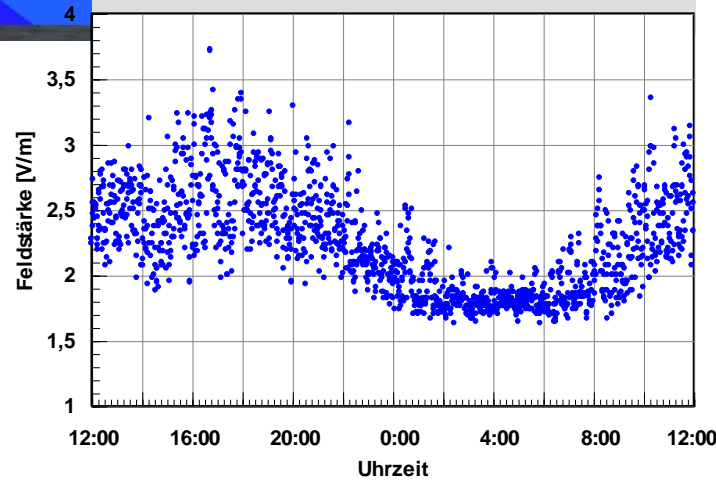
→ Messungen an nur einem Punkt zu einer Zeit nicht repräsentativ!

# Die Immissionen durch Basisstationen schwanken ...

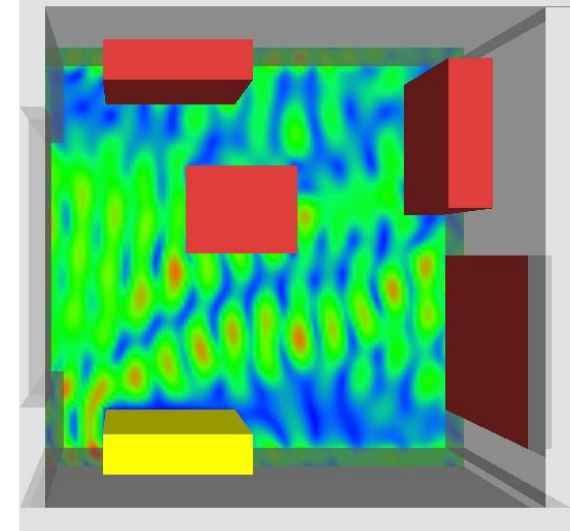
Großskalig örtlich



Klein- und großskalig zeitlich



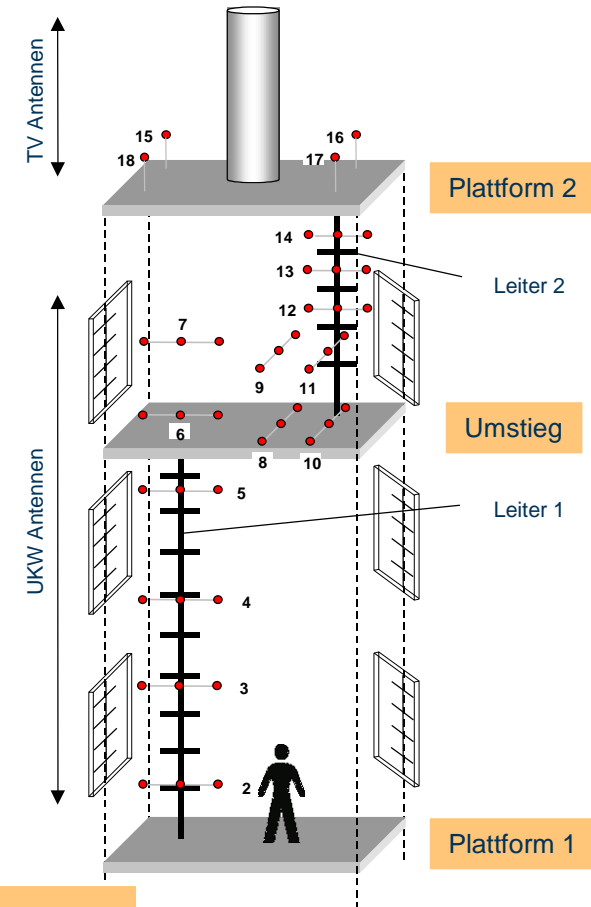
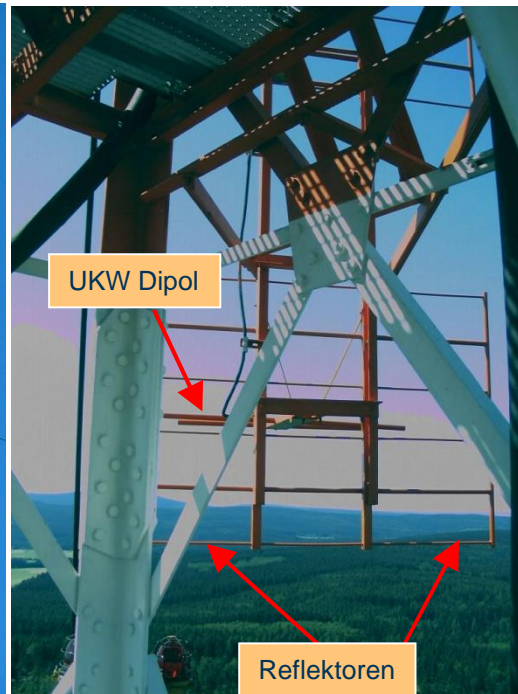
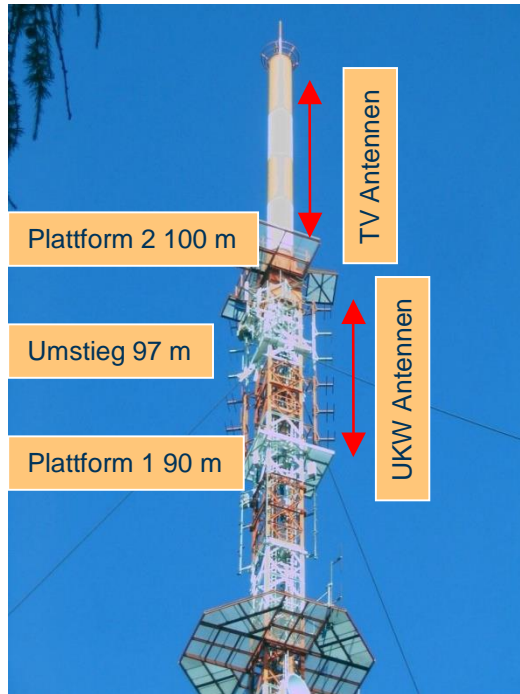
Kleinskalig örtlich



# Maximalwert oder Mittelung?

- Antwort generell von Aufgabenstellung abhängig
- Die 26. BImSchV fordert:
  - Messungen sind bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen (bzw. andernfalls sind Messwerte entsprechend hochzurechnen)
  - Messungen sind am Einwirkungsort mit der stärksten Immission durchzuführen
  - Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf Basis der maximal gemessenen Werte am Messort
- ICNIRP erlaubt auch Mittelung über den Körperdimensionen der exponierten Person  
(aber Grenzwert für lokale Exposition darf nicht überschritten werden!!)

# Messungen für den Arbeitsschutz



- Messqualität entscheidet über die Gesundheit und das Leben von Arbeitern!

→ Örtliche und zeitliche Maximierung obligatorisch!

# Bestimmung der Grenzwertausschöpfung



- Sendeanlage muss Expositionsgrenzwerte in allen allgemein zugänglichen Bereichen und bei allen Betriebsarten einhalten

→ Örtliche und zeitliche Maximierung obligatorisch!



# Messung an „sensiblen Orten“



Schulen

→ Maximumsuche sinnvoll  
(Risikokommunikation)

Kindergärten



# Messung für epidemiologische Studien



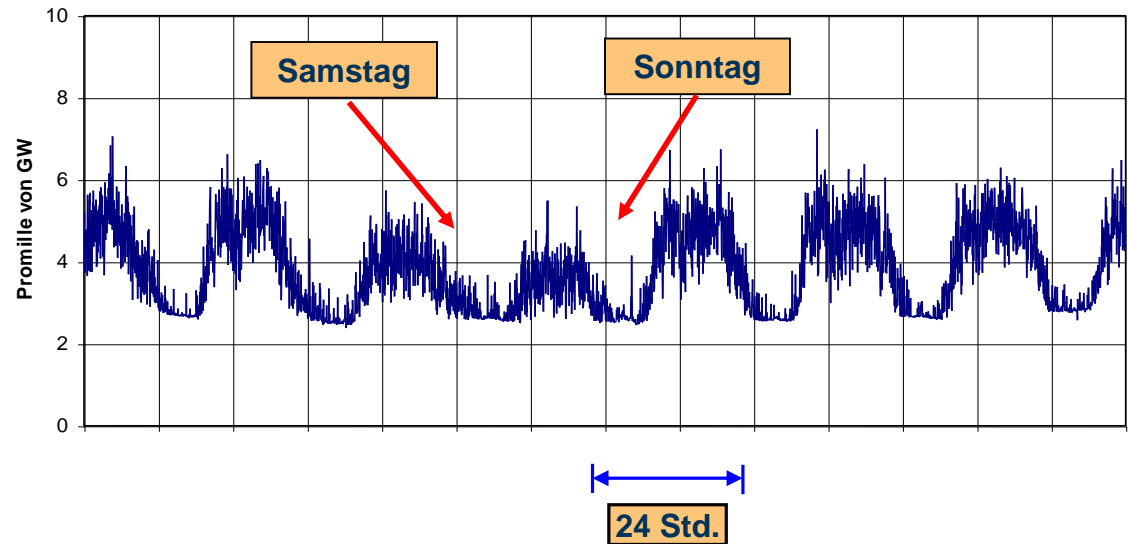
Studie Wuschek et al., 2003:  
"Großräumige Ermittlung von Funkwellen  
in Baden-Württemberg"



- Erfassung der mittleren Exposition und Bestimmung des Anteils verschiedener Quellen zur Gesamtexposition

→ Örtliche und zeitliche Mittelung sinnvoll

# Langzeitmessungen



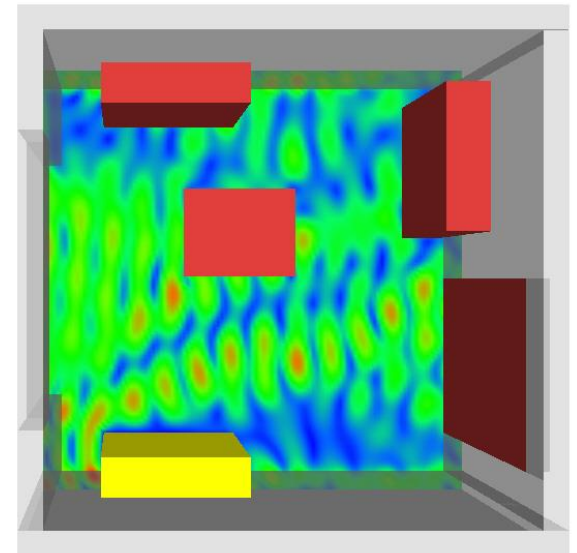
Quelle: Wuschek et al. "Langzeitmessungen im Kanton Schwyz (Schweiz)"

- Zeitliches Expositionsverhalten an einem festen Punkt

→ Weder zeitliche noch örtliche Maximierung sinnvoll

# Maximumsuche im Messvolumen

- Derzeit gibt es drei etablierte Methoden zur Bestimmung des lokalen Maximums:
  - Schwenkmethode
  - Drehmethode
  - Punktrastermethode



# Schwenkmethode



- Volumenabtastung mit handgeführter Antenne
- Variation von Vorzugs- und Polarisationsrichtung der Antenne
- Bis ca. 1,75 m Höhe
- >50 cm Abstand zu Wänden
- Maxhold-Funktion
- Maximalwert im Messvolumen

Zeitaufwand: typisch 2 Minuten

# Drehmethode



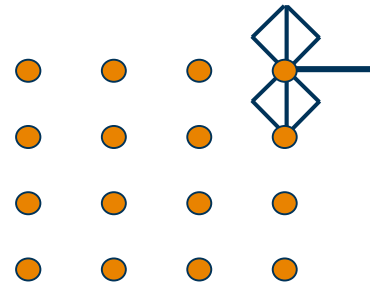
Zeitaufwand: einige 10 Minuten

- Messantenne beschreibt Kreis mit  $>1$  m Durchmesser
- 4 Polarisationen der Antenne (H, V,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$ )
- 3 Höhen (0,75 / 1,25 / 1,75 m)
- $>50$  cm Abstand zu Wänden
- Maxhold-Funktion
- Maximalwert auf Zylinder

# Punktrastermethode



Zeitaufwand: Stunden



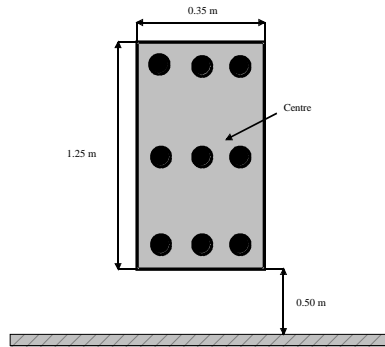
Quelle: Narda STS



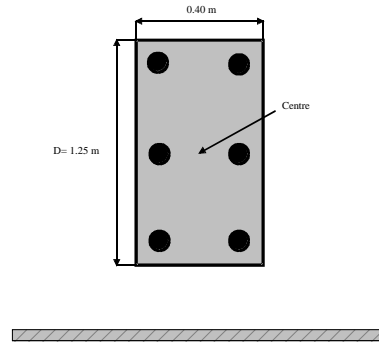
- Abtastung eines Punktrasters
- Unterschiedliche Rastergeometrien möglich
- Isotrope Messung (keine Richtantennen einsetzbar)
- Maximalwert oder Mittelwert

# Vorgeschlagene Rastergeometrien

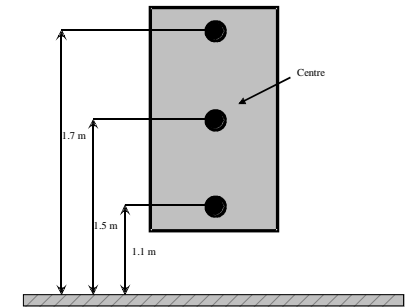
ANFR/DR-15 Frankreich



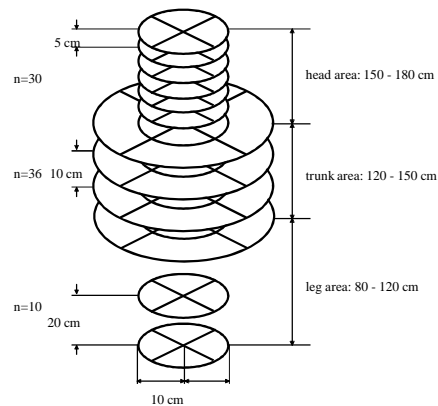
prEN 50400 CENELEC



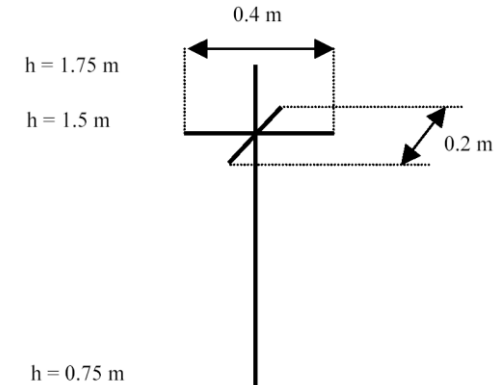
CEPT



SICTA Schweiz



Netzbetreiber Schweiz





# Vergleich der Methoden



## Ziel:

Vergleich der verschiedenen  
Maximierungstechniken,  
Erfahrungen bezüglich Reproduzierbarkeit

## Durchführung:

BUWAL

(Schweizer Bundesamt für Umwelt,  
Wald und Landschaft)

METAS

(Schweizer Bundesamt für Metrologie)

## Messorte:

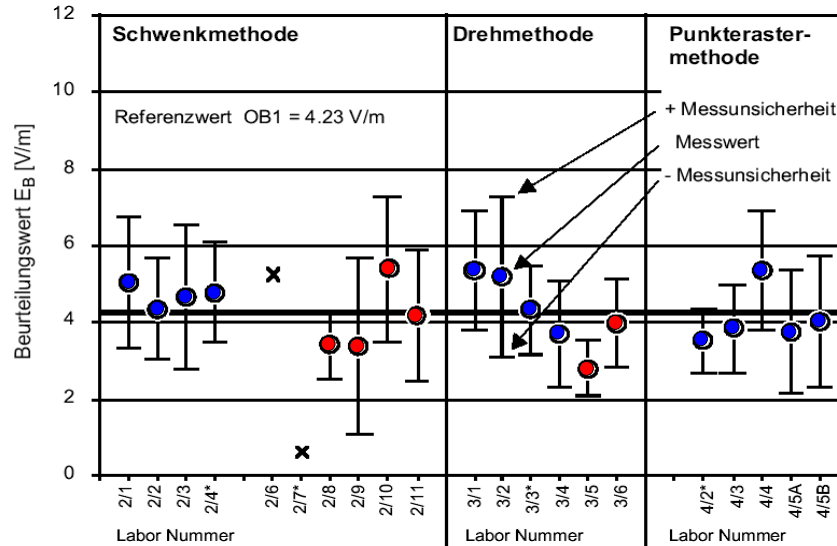
4 Messorte innerhalb von Gebäuden in  
der Nähe von GSM Basisstationen

## Teilnehmer:

19 Labore

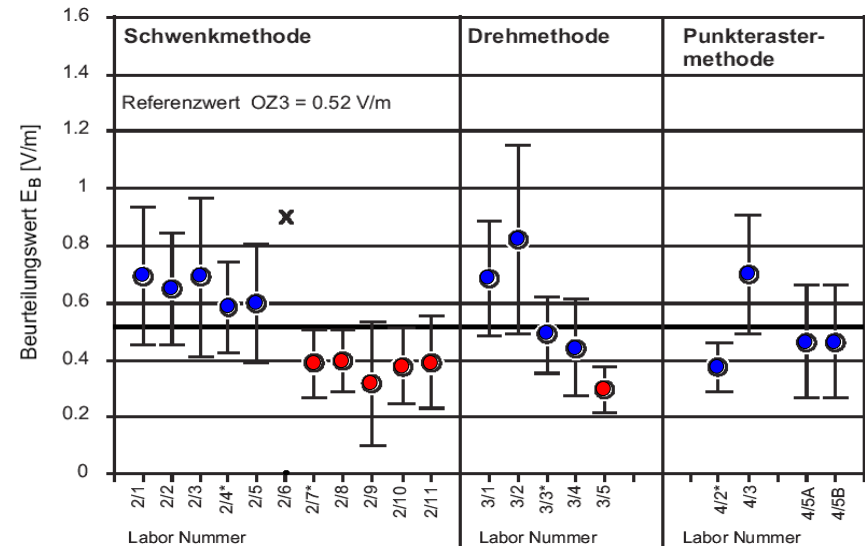
# Vergleich der Methoden: Ergebnisse

## Sicht zu Mobilfunkantennen



Standardabweichung 1,4 dB

## Keine Sicht zu Mobilfunkantennen



Standardabweichung 2,2 dB

**Blau:** Messung mit bikonischen oder Dipolantennen  
**Rot:** Messung mit logarithmisch-periodischen Antennen

# Fazit Messmethoden

- Schwenk-, Dreh- und Punktrastermethode liefern bei sorgfältiger Durchführung (und im Falle der Rastermethode mit ausreichend vielen Punkten) identische Ergebnisse
- Zeitaufwand bei Schwenkmethode am geringsten
- Mögliche Platzprobleme bei Punktraster- und Drehmethode
- Streuung der Ergebnisse bei Messung durch unterschiedliche Labore ist vergleichbar (insbesondere ist Streuung der aufwändigen Punktrastermethode nicht besser als bei relativ einfacher Schwenkmethode)
- Punktrastermethode gestattet zwar als einzige Methode Mittelung, kann Exposition aber unterschätzen, falls lokale Exposition dominiert

→ **Schwenkmethode ist am besten geeignet**



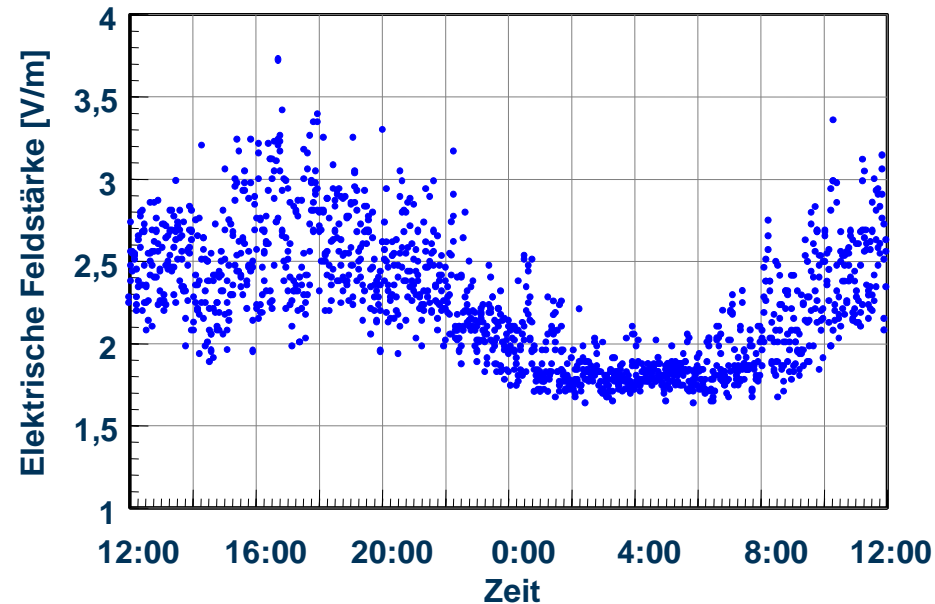
# Fazit örtliche Schwankungen

- Die HF-Exposition im Umfeld von Basisstationen (wie auch die anderer VHF/UHF Sender) unterliegt großen kleinskaligen Feldstärkevariationen
- Diese Variationen müssen durch geeignete Messtechniken berücksichtigt werden
- Bei den meisten Messaufgabenstellungen ist die Suche des lokalen Expositionsmaximums notwendig oder zumindest sinnvoll
- Die Schwenkmethode ist die dafür am besten geeignete Methode
- *Was ist mit der zeitlichen Variation?*

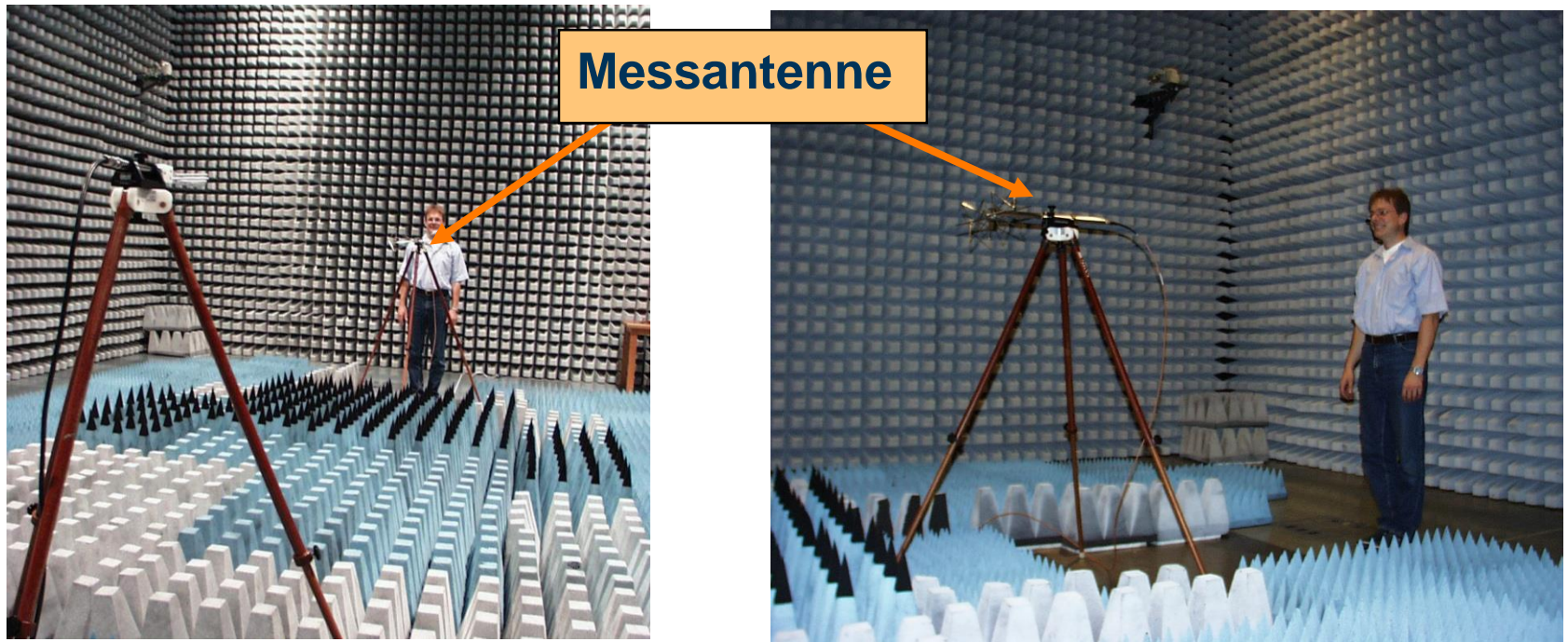


# Strategie der zeitlichen Maximierung

- Relevanz:  
Funkdienste mit verkehrsabhängiger Sendeleistung (z.B. GSM, UMTS, LTE)
- Problem:  
Wie extrapoliert man die *aktuell* gemessene Exposition auf das mögliche *Maximum*?
- Lösung:  
Messung der Exposition durch zeitlich konstante Signalisierungskanäle und Extrapolation der Exposition mit  $P_{\max}/P_{\text{gemessen}}$



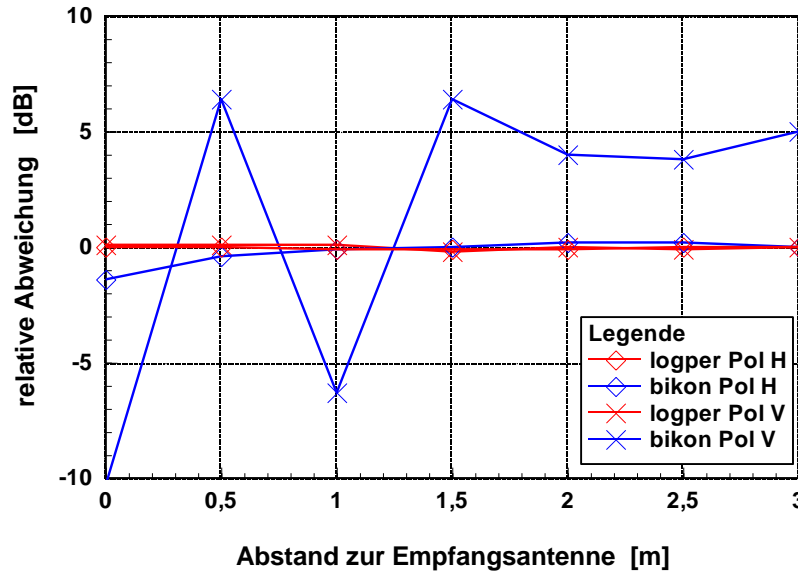
# Einfluss des Messenden



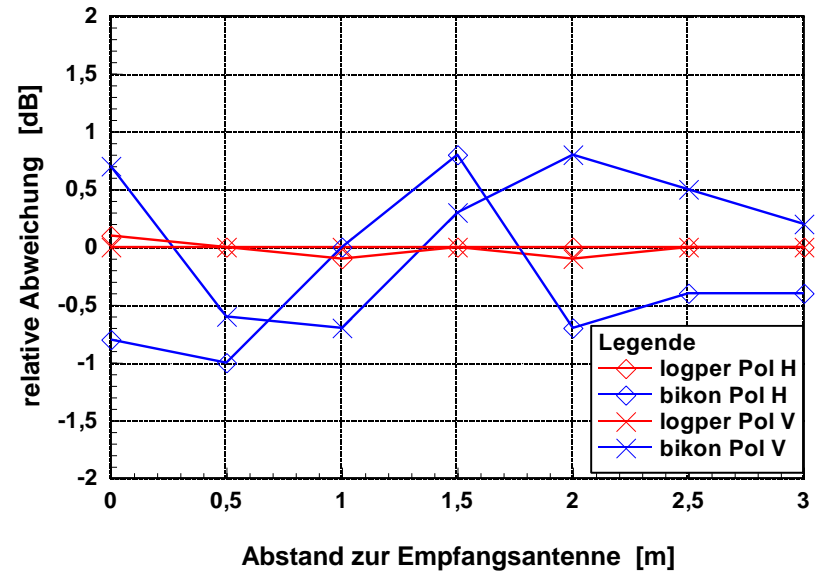
- Tests in Absorberkammer (definierte Umgebung)
- Parameter: Absorberauskleidung des Bodens, Frequenz, Antennentyp, Abstand des Messpersonals zur Antenne

# Ergebnis: GSM 900

ohne Bodenabsorber



mit Bodenabsorbern



- Teilweise extrem großer Einfluss des Messpersonals bei Antennen mit geringer Richtwirkung
- Berücksichtigung im Fehlerbudget oder Verwenden von Antennen mit Richtwirkung

# 4. Korrekte Messungen

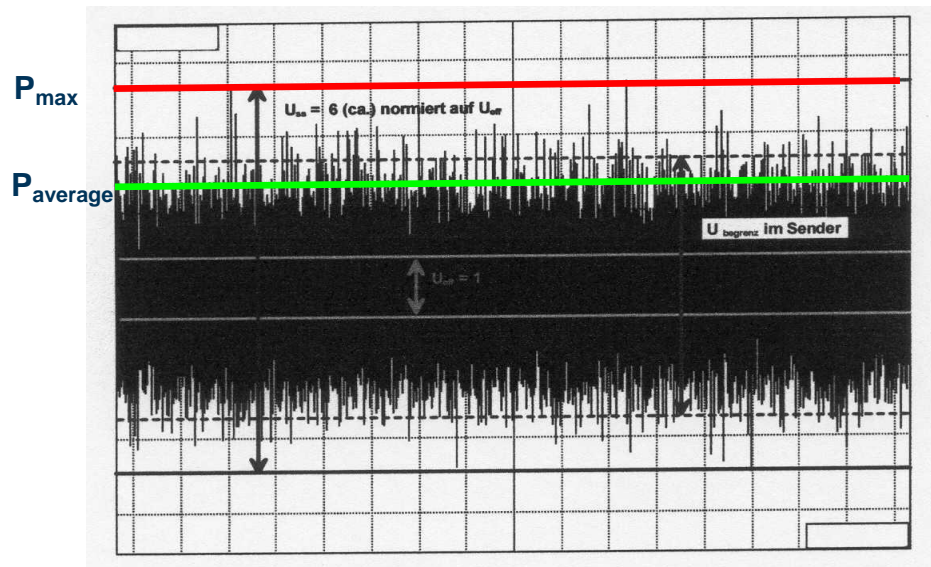
- Grundlegende Voraussetzungen
- Rundfunk : UKW, DVB-T, DAB
- Mobilfunk: GSM, TETRA, UMTS, LTE
- Wohnung: DECT, WLAN





# Grundlegende Voraussetzungen:

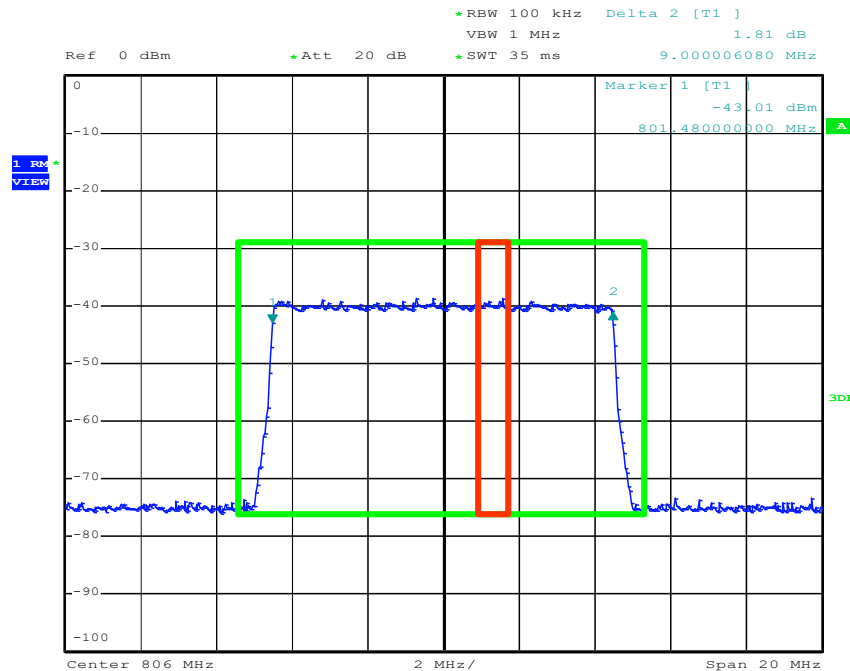
## a. RMS-Detektion



- Beispiel: UMTS-Signal
- Crestfaktor  $C = P_{max} / P_{average}$

Bei Signalen mit rauschähnlicher Hüllkurve (digital modulierte Signale) **muss** der RMS-Detektor verwendet werden!  
Bei Peak-Detektor Überbewertung in Höhe des Crestfaktors

# b. Auflösungsbandbreite (RBW)



Korrekte RBW  
Zu geringe RBW

Die Auflösungsbandbreite muss mindestens so groß wie die Signalbandbreite sein, da ansonsten nur ein Teil des Signals erfasst wird!

# Typische Signalbandbreiten

Funkdienst	Signalbandbreite
AM-Rundfunk	(4,5) 10 kHz
DRM-Rundfunk	4,5 - 20 kHz
UKW-Rundfunk	≈ 200 kHz
DAB-Radio	≈ 1,5 MHz
DVB-T	7,6 MHz (Band IV + V)
GSM	≈ 200 kHz
UMTS	≈ 4,6 MHz
LTE	1,08 / 2,7 / 4,5 / 9,0 / 18,0 MHz
5G NR 3,6 GHz	bis 88,2 MHz
TETRA	≈ 25 kHz
DECT	≈ 1 MHz
WLAN (IEEE 802.11b/g)	≈ 17 MHz (11g); 20 MHz (11b)
WiMAX (IEEE 802.16)	variabel (1,5 - 20 MHz)



## c. Summation aller relevanten Immissionen



+



+ ...

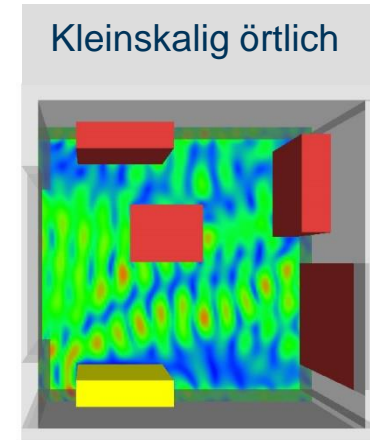
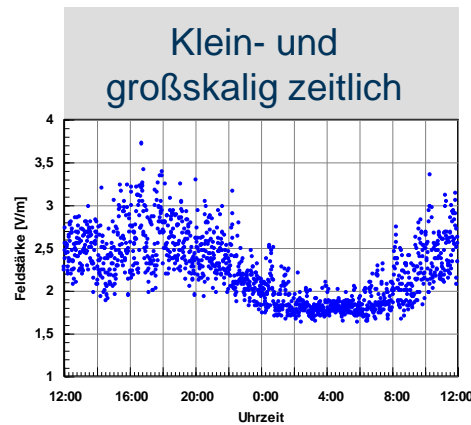
Für alle relevanten Frequenzen ( $> 100$  kHz) ist die quadratische Summe der prozentualen Grenzwertausschöpfungen zu berechnen. Bleibt das Ergebnis unter 100%, ist der Grenzwert eingehalten.

# Beispiel korrekte Summation

Vorhandene Signale Frequenz ([MHz]	Messwert [V/m]	Grenzwert [V/m]	Prozentuale Grenzwert- ausschöpfung
0,8	34	97,3	34,9 %
1,5	5	71,0	7,0 %
100	6	28,0	21,4 %
580	23	33,1	69,5 %

- Obiges Beispiel ergibt:  $0,349^2 + 0,07^2 + 0,214^2 + 0,695^2 = 0,655$  (65,5% "leistungsbezogene Grenzwertausschöpfung").
- Die "feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung" ergibt sich als Wurzel aus der "leistungs-bezogenen Grenzwertausschöpfung" (Im Beispiel: 80,9% "feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung").

# d. Örtliche und zeitliche Maximierung

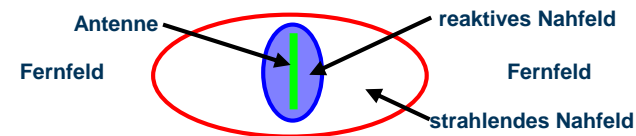


Die Immissionen sind örtlich zu maximieren (Schwenkmethode) und zeitlich auf maximale Anlagenauslastung zu extrapolieren.

# e. Fernfeld und Nahfeld (Definition nach EN 50492)

	Reaktives Nahfeld	Strahlendes Nahfeld	Fernfeld
Abstandsbereich*	$< \lambda$	$\lambda \dots 5 \cdot \lambda$	$> 5 \cdot \lambda$
	$< D$	$D \dots 5 \cdot D$	$> 5 \cdot D$
	$< D^2 / 4 \cdot \lambda$	$D^2 / 4 \cdot \lambda \dots 0,6 \cdot D^2 / \lambda$	$> 0,6 \cdot D^2 / \lambda$
E senkrecht zu H?	nein	nahezu	ja
E, H $\sim 1/r$	nein	nein	ja
$Z_F = E/H$	$\neq 377 \Omega$	$\approx 377 \Omega$	$= 377 \Omega$
zu messen sind	E und H	E oder H	E oder H

- \*: Maximalwert aus den drei Formeln  
 $\lambda$ : Wellenlänge  
D: Maximale Aperturausdehnung



Im Fernfeld (bzw. auch im strahlenden Nahfeld) genügt die Erfassung von E. Im reaktiven Nahfeld sind E und H zu messen.

# Beispiele für Nahfeld-/Fernfeldgrenzen

Antennentyp	f	$\lambda$	D	$D^2/4\lambda$	$5 \lambda$	5-D	$0,6 \cdot D^2/\lambda$
MW Monopolantenne	500 kHz	600 m	300 m	37,5 m	3.000 m	1.500 m	90 m
$\lambda/2$ -Dipol (UKW)	100 MHz	3 m	1,5 m	0,19 m	15 m	7,5 m	0,46 m
UKW Antennenfeld	100 MHz	3 m	8 m	5,33 m	15 m	40 m	12,8 m
Mobiltelefonantenne	900 MHz	0,33 m	0,04 m	0,12 m	1,65 m	0,2 m	0,29 m
Basisstationsantenne GSM900	900 MHz	0,33 m	1,3 m	1,28 m	1,65 m	6,5 m	3,07 m
Parabolspiegel (Radar)	3 GHz	0,1 m	10 m	250 m	0,5 m	50 m	600 m

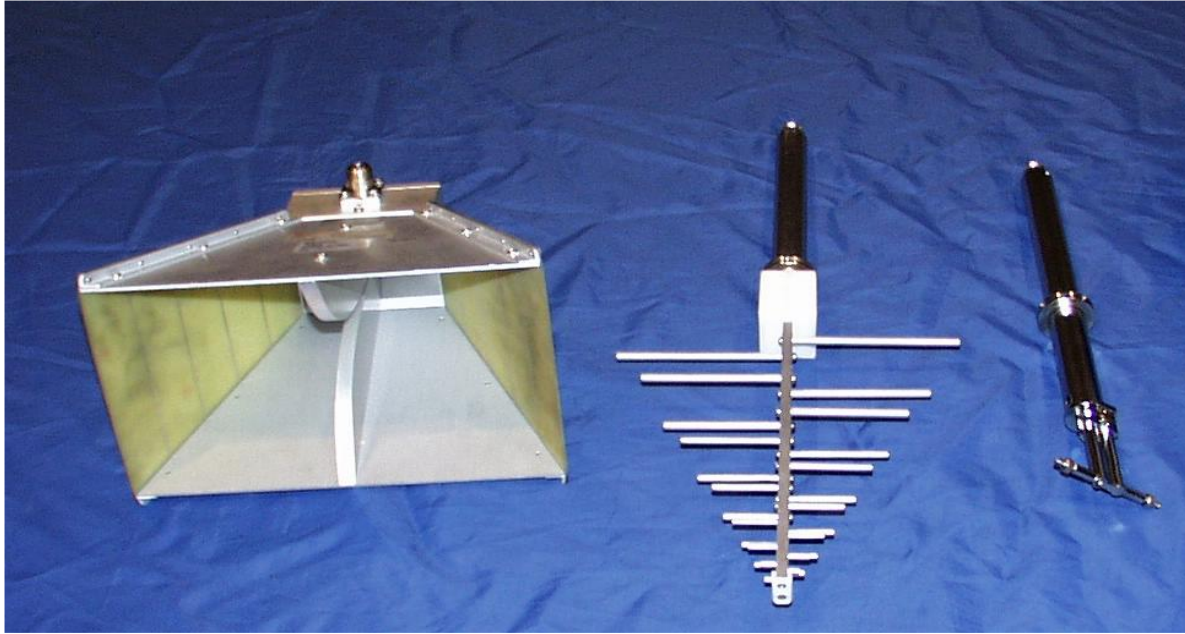
Rot: Grenze strahlendes Nahfeld – reaktives Nahfeld

Blau: Grenze Fernfeld – strahlendes Nahfeld





# f. Antennen



Horn

Log-Per

Dipol



Isotropantenne

Es sind für die für den jeweiligen Frequenzbereich geeigneten kalibrierten Antennen (Antennenfaktoren!) zu verwenden.

# Hauptfragestellung: Korrekte Einstellungen

- Frequenzbereich ("Span")?
- ZF-Filterbandbreite ("Resolution Bandwidth", RBW)?
- Videobandbreite ("Video Bandwidth", VBW)?
- Detektortyp (Peak oder RMS)?
- Falls notwendig: Korrekte Hochrechnung auf maximale Sendeleistung?

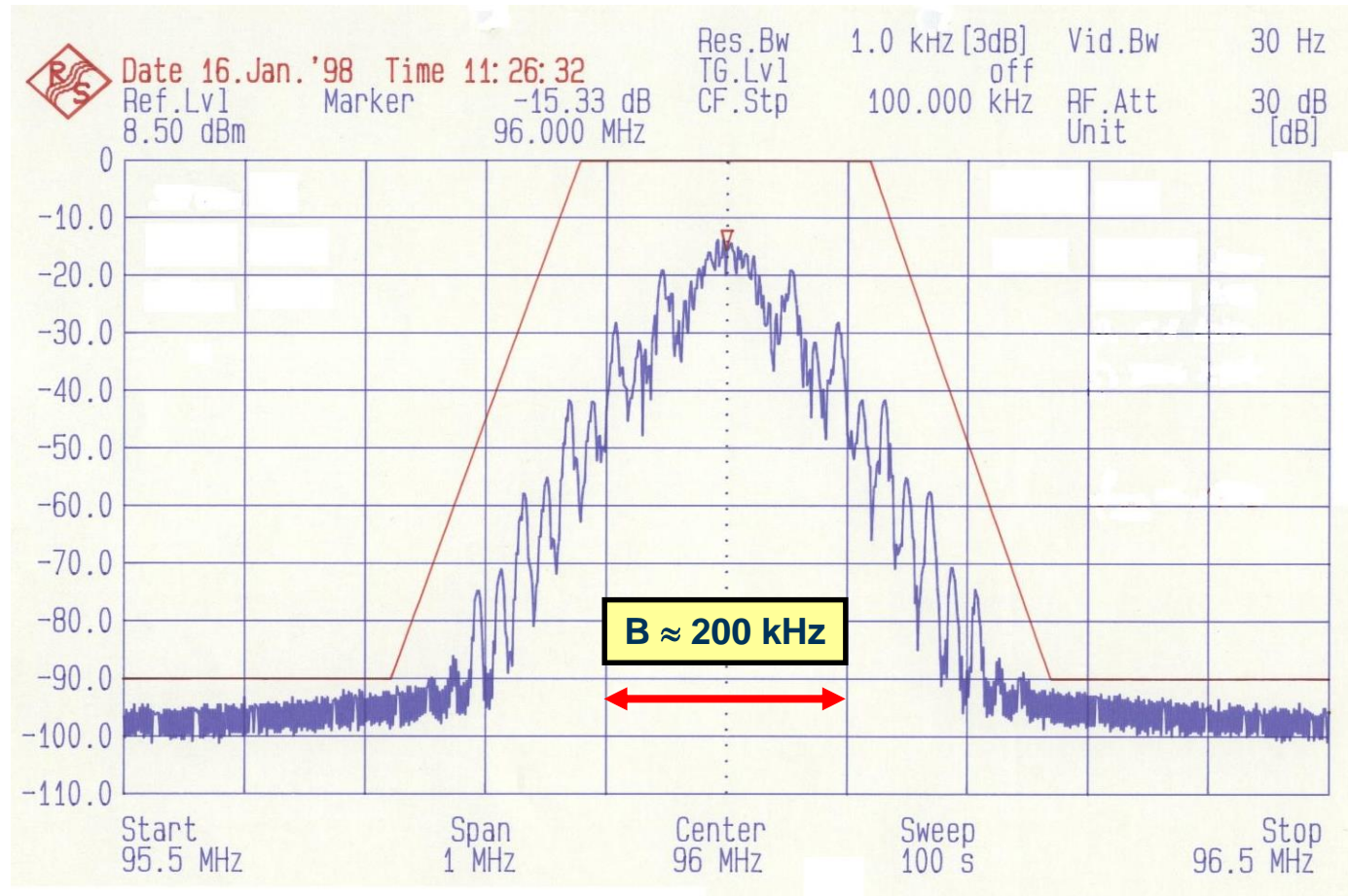


# UKW: Technische Parameter





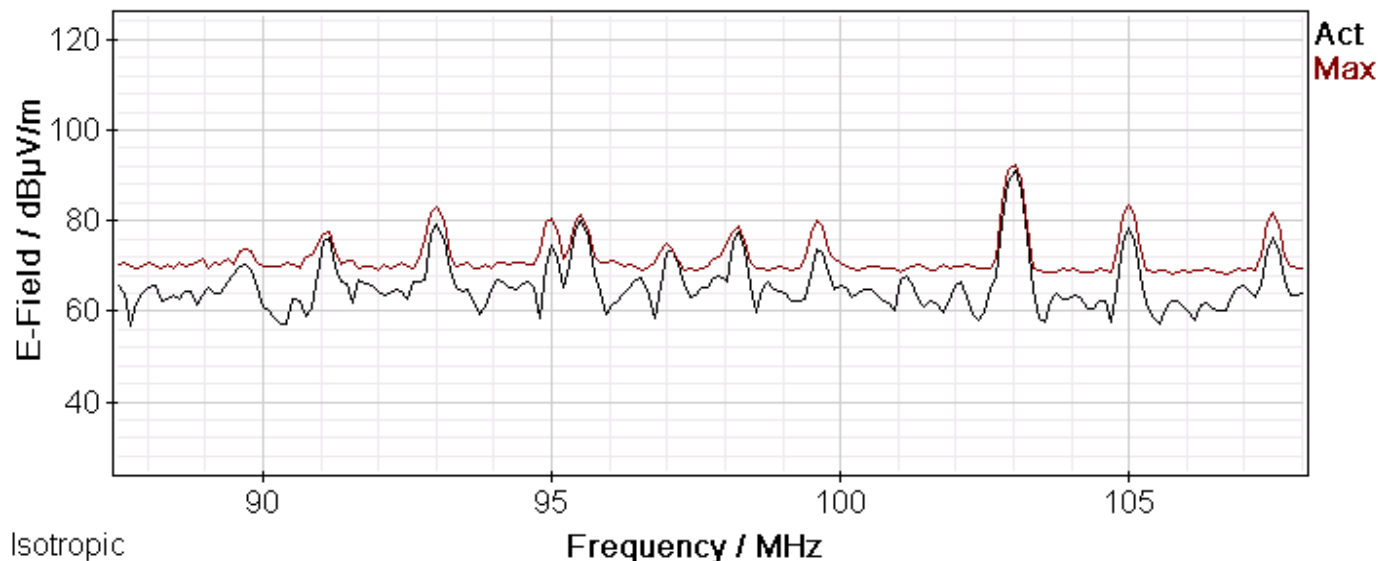
<b>Frequenz:</b>	87,5 – 108 MHz
<b>Hüllkurve:</b>	konstant
<b>Signalbreite:</b>	etwa 200 kHz
<b>Kanalabstand:</b>	100 kHz
<b>Modulation:</b>	FM
<b>Programme:</b>	1 pro Kanal
<b>Polarisation:</b>	typ. horizontal
<b>Zellradius:</b>	etwa 60 km
<b>Leistung:</b>	einige 10 kW (ERP) / Programm

# UKW: Signalstruktur im Frequenzbereich




# UKW: Messbeispiel

Battery:  GPS: --- Ant: 3AX 27M-3G SrvTbl: D\_Mobilfunk  
 22.01.15 22:41:12  --- Cable: --- Stnd: ICNIRP GP



Index: 1043.1 • MAN • Date: 22.01.15 22:41:13

Emin:	87.5 MHz	Fmax:	108 MHz	Sweep Time:	33 ms	RECALL
MR:	125 dBµV/m	RBW:	200 kHz			No. of Runs: 602
		VBW:	Off			AVG: 16 

# UKW: Einstellungen

<b>Frequenzbereich (Span):</b>	87,5 – 108 MHz
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	200 kHz
<b>Videobandbreite (VBW):</b>	≥ RBW beim Laborspektrumanalysator
<b>Detektor:</b>	RMS oder Peak beim Laborspektrumanalysator VBW egal beim SRM-3006
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Hochrechnung:</b>	nicht erforderlich



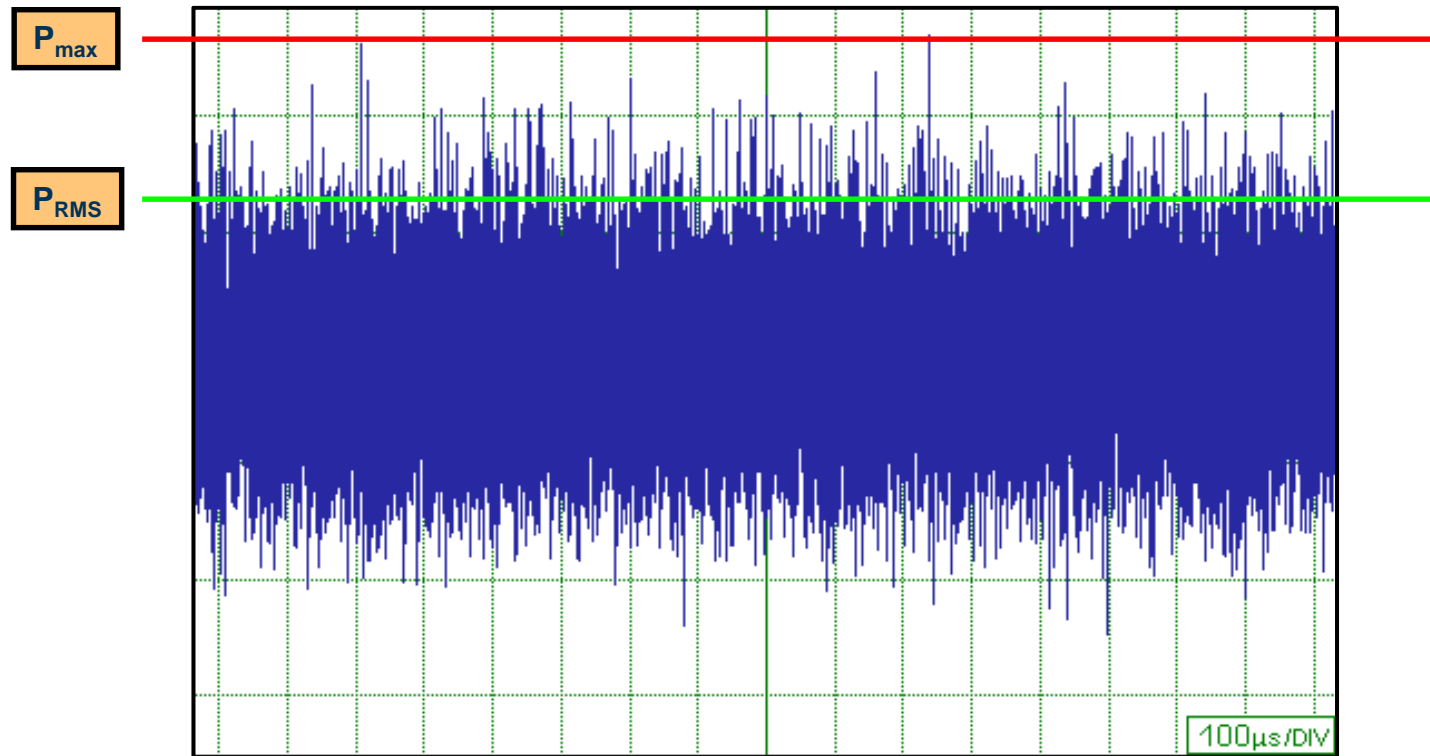
# DVB-T: Technische Parameter



Wendelstein

<b>Frequenz:</b>	470 - 694 MHz (Band IV und V)
<b>Hüllkurve:</b>	rauschartig, kontinuierlich
<b>Signalbreite:</b>	7,6 MHz
<b>Modulation:</b>	(C)OFDM
<b>Programme:</b>	typ. 4 pro Kanal
<b>Polarisation:</b>	Vertikal oder horizontal
<b>Anzahl:</b>	typisch 5 bis 15 Grundnetzsender pro Bundesland (Deutschland)
<b>Leistung:</b>	bis zu mehreren 100 kW (ERP) / Anlage

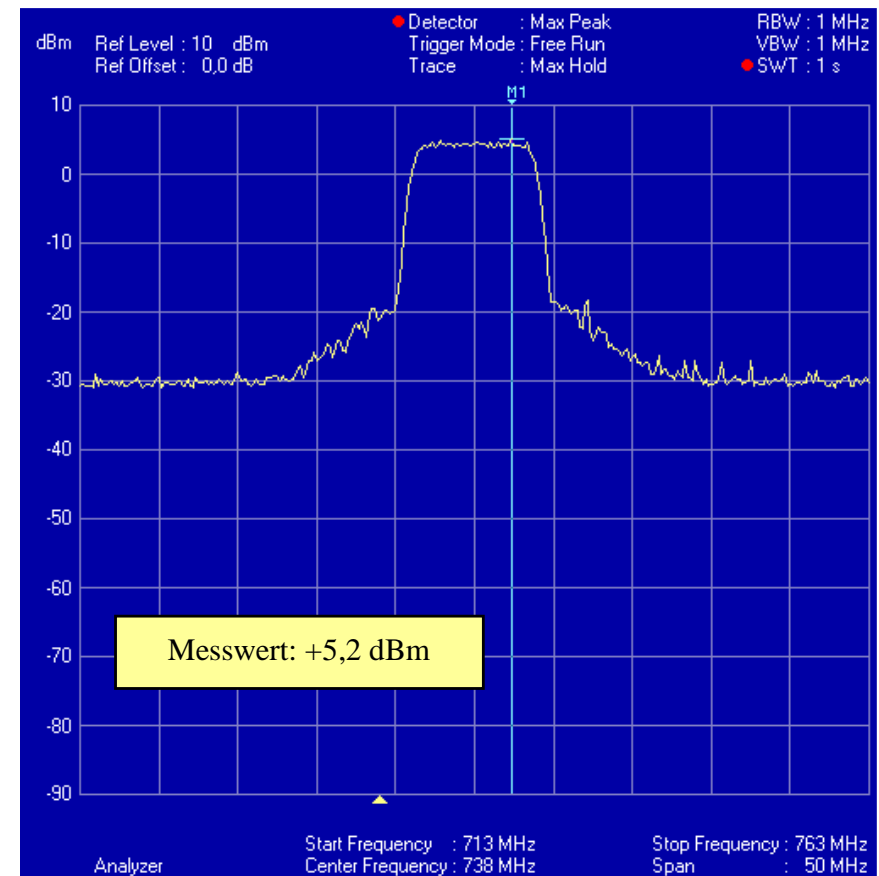
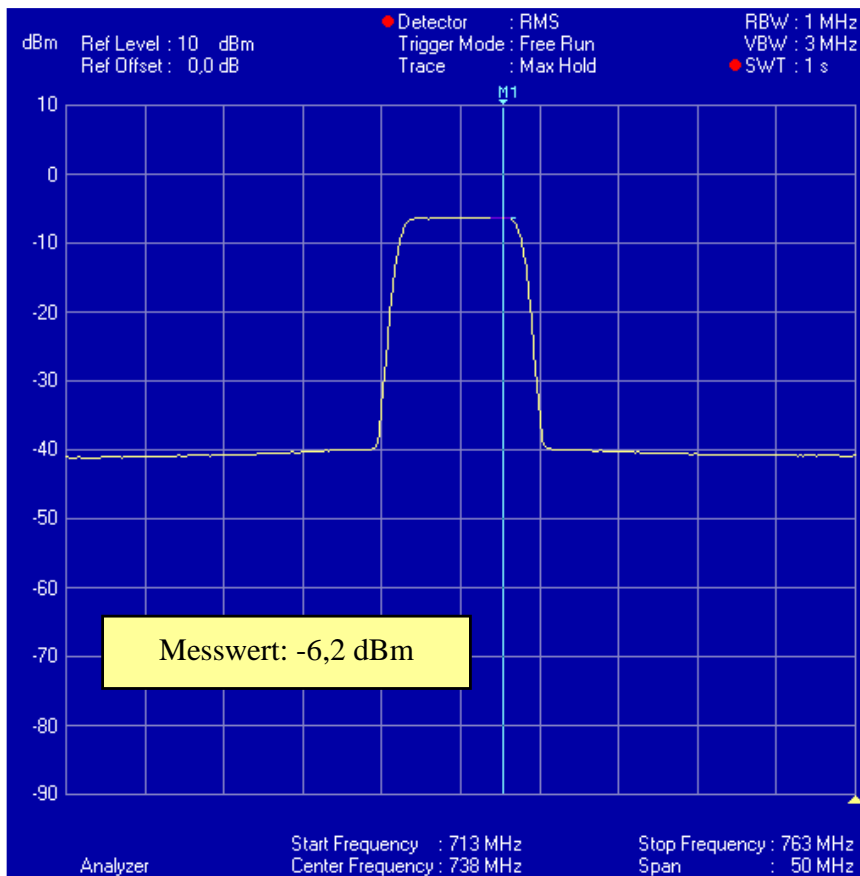
# DVB-T: Signalstruktur im Zeitbereich



→ Crestfaktor ca. 12-14 dB: RMS-Detektor notwendig!

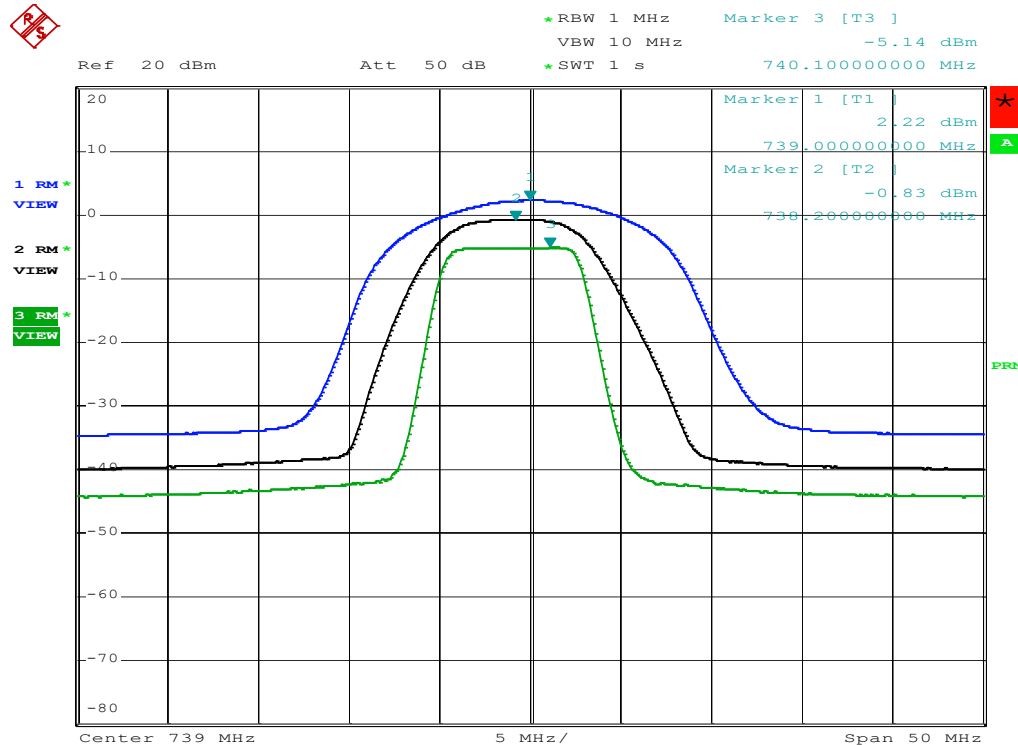


# DVB-T: RMS- und Peak-Erfassung



**Fazit: Die Peak-Erfassung führt zu einer Überbewertung in der Größenordnung des Crestfaktors**

# DVB-T: Einfluss unterschiedlicher RBW



**Blau:**      RBW = 10 MHz

**Schwarz:**    RBW = 3 MHz

**Grün:**      RBW = 1 MHz

**RBW < Signalbandbreite führt zu einer Unterschätzung! Korrekturfaktor K zur Kompensation der Unterbewertung:**

$$(K \approx 10 \cdot \log(B_{\text{Signal}} / B_R))$$

$$(Gaussfilter: B_R \approx 1,1 \cdot B_{3\text{dB}})$$

$$(B_{\text{Signal}} = 7,6 \text{ MHz})$$


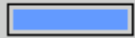

**Fazit: Zu kleine RBW's führen zu einer Unterbewertung!**

# DVB-T: Einstellungen

<b>Frequenzbereich (Span):</b>	470 – 694 MHz
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	8 MHz (ggf. Messung mit kleinerer Bandbreite und Bandbreitenkorrektur oder Kanalleistungsmessung)
<b>Detektor:</b>	RMS beim Laborspektrumanalysator RMS-Bildung mit kleiner VBW (RBW/10.000) beim SRM-3006
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Hochrechnung:</b>	nicht erforderlich



# DVB-T: Messbeispiel mit SRM-3006

Battery: 27.01.10		GPS: 14:31:57	48°45'57.3" N	Ant: 3AX 27M-3G	SrvTbl: DVB-T
			9°12'02.9" E	Cable: ---	Stnd: ICNIRP GP
Table View: Detailed <span style="float: right;">▲ ▼</span>					
Index	Service	Fmin	Fmax	Max	
23	Ch.43	646.000 MHz	654.000 MHz	< 77.12 dB $\mu$ V/m	
24	Ch.44	654.000 MHz	662.000 MHz	< 77.14 dB $\mu$ V/m	
25	Ch.45	662.000 MHz	670.000 MHz	109.00 dB $\mu$ V/m	
26	Ch.46	670.000 MHz	678.000 MHz	< 77.16 dB $\mu$ V/m	
27	Ch.47	678.000 MHz	686.000 MHz	< 77.17 dB $\mu$ V/m	
28	Ch.48	686.000 MHz	694.000 MHz	< 77.18 dB $\mu$ V/m	
29	Ch.49	694.000 MHz	702.000 MHz	< 77.19 dB $\mu$ V/m	
30	Ch.50	702.000 MHz	710.000 MHz	103.31 dB $\mu$ V/m	
31	Ch.51	710.000 MHz	718.000 MHz	< 77.21 dB $\mu$ V/m	
	Others			-999.00 dB $\mu$ V/m	
	Total			111.28 dB $\mu$ V/m	
Isotropic					
Safety Evaluation					
MR:	127 dB $\mu$ V/m	RBW:	50 kHz	Sweep Time:	2.608 s
				Noise Suppr.:	0 dB
				Progress:	
				No. of Runs:	21
				AVG:	16 

# DAB: Technische Parameter



**Frequenz:** 174 - 230 MHz

**Hüllkurve:** rauschartig, kontinuierlich

**Signalbreite:** 1,536 MHz

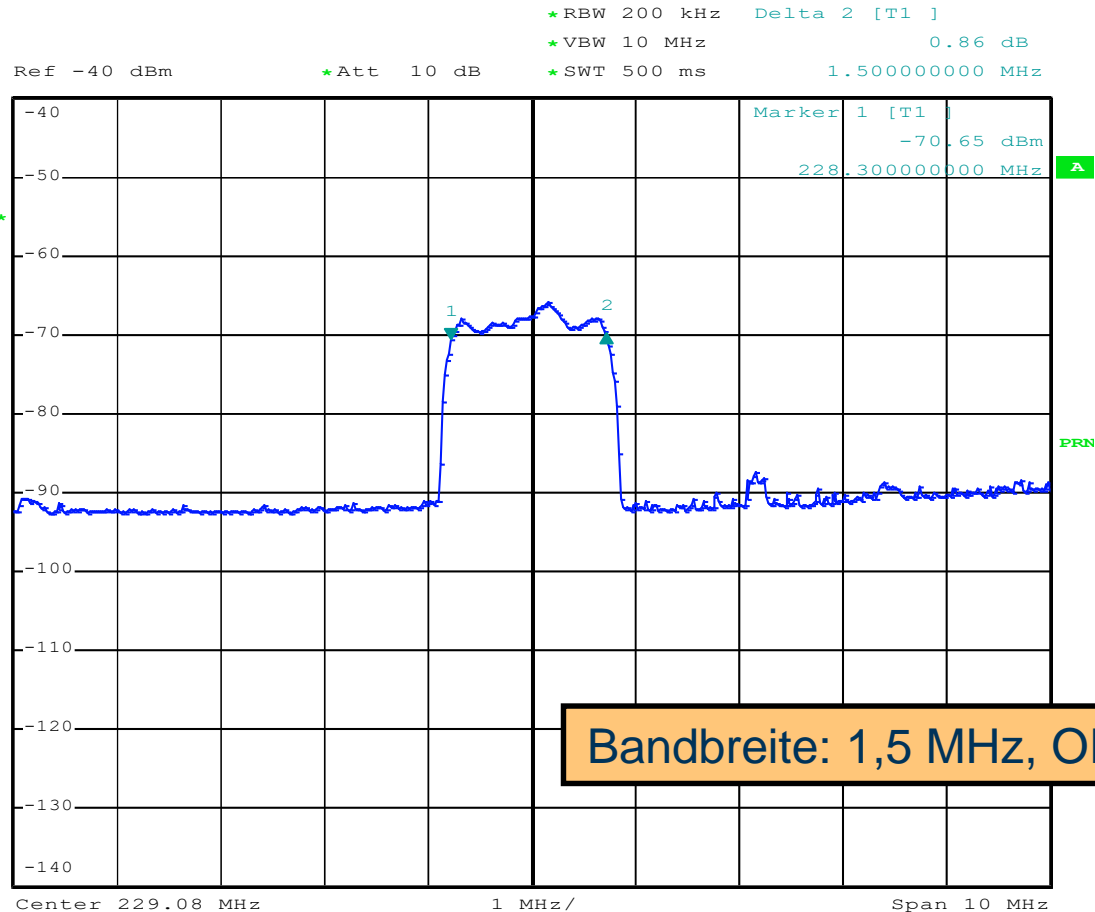
**Modulation:** COFDM

**Programme:** typ. 10 pro Kanal

**Polarisation:** typ. vertikal

**Leistung:** bis zu mehreren kW (ERP) / Kanal

# DAB: Signalstruktur im Frequenzbereich

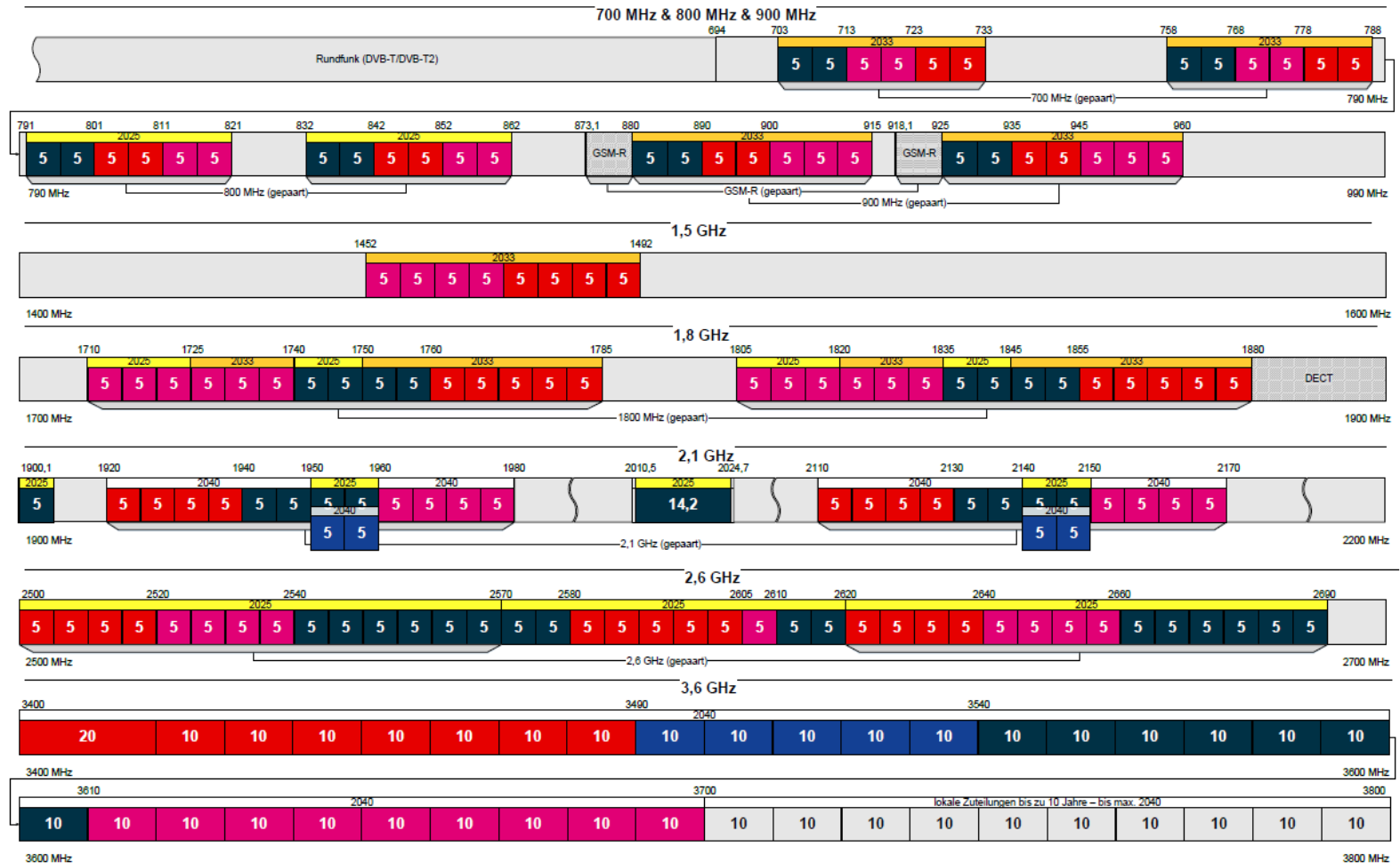


# DAB: Einstellungen

<b>Frequenzbereich (Span):</b>	174 – 230 MHz
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	1,5 MHz
<b>Detektor:</b>	RMS beim Laborspektrumanalysator, kleine VBW (RBW/1.000) beim SRM-3006
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Hochrechnung:</b>	nicht erforderlich



# Mobilfunk: Frequenzbereiche



Quelle: Bundesnetzagentur

Drillisch Telefónica Telekom Vodafone

Stand: 20.01.2020





# GSM: Technische Parameter

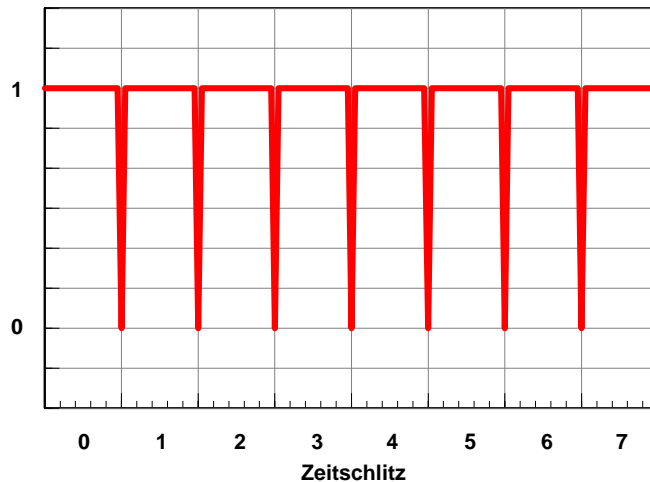
<b>Frequenzbereich (Downlink):</b>	GSM-900:	925 - 960 MHz
	GSM-R:	920 - 925 MHz
	(GSM-1800:	1.805 - 1.880 MHz)

**Kanalbandbreite:** 200 kHz

- Das GSM Signal ist in 8 Zeitschlitz von je 577  $\mu$ s Dauer unterteilt. Für die Versorgung eines Mobiltelefons mit Daten wird mindestens ein Zeitschlitz benötigt (d.h. mit einer Trägerfrequenz können maximal 8 Telefone angesprochen werden).
- Dies bedeutet, dass zur zufriedenstellenden Versorgung einer Funkzelle meist mehr als ein Frequenzkanal verfügbar sein muss. Die zusätzlichen Kanäle ("Traffic Channels"; TCH's) werden jeweils nach Bedarf zugeschaltet. Damit wird die von der Antenne abgestrahlte Leistung allerdings auslastungsabhängig.
- **Worst case:**  
Alle verfügbaren Frequenzkanäle sind "on air" und alle Zeitschlitz sind belegt.



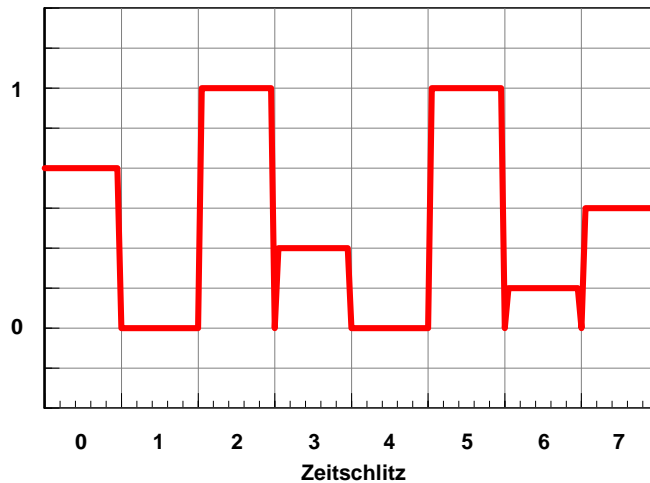
# GSM: Signalstruktur im Zeitbereich



Erste Frequenz:

"Broadcast control channel"(BCCH)

Der BCCH wird unabhängig von der gegenwärtigen Verkehrsauslastung mit konstanter (maximaler) Leistung gesendet.

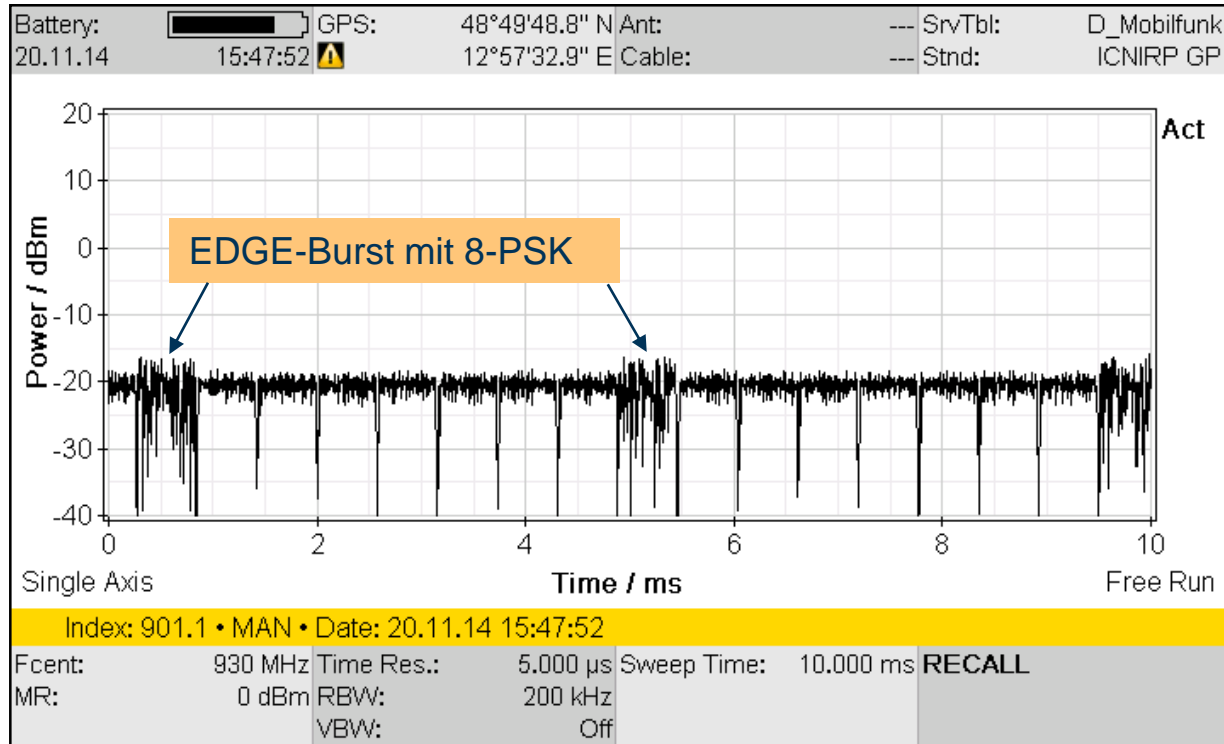


Weitere Frequenzen (2,3,4...):

"Traffic channels"(TCH's)

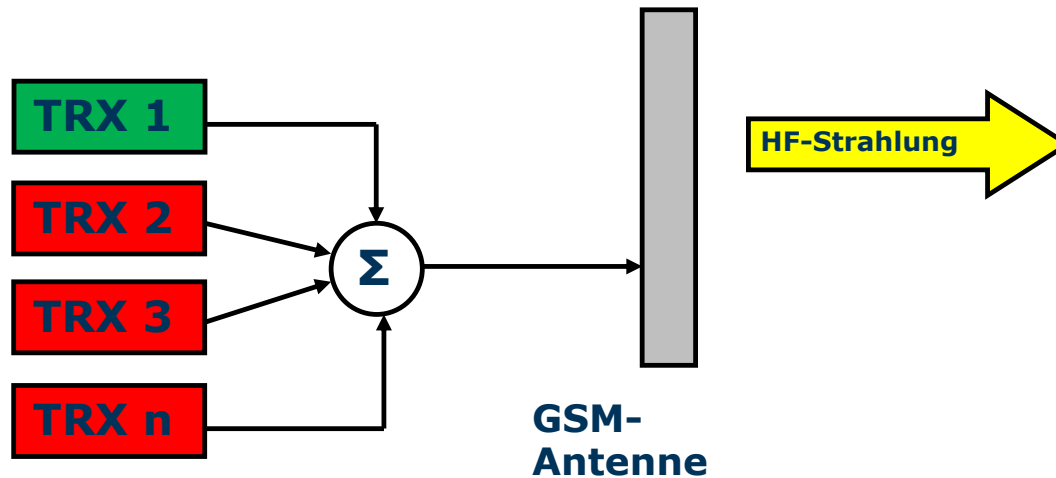
Die TCH werden mit verkehrs- und verbindungsqualitätsabhängiger Leistung gesendet (transmit power control). Manche Zeitschlitze können leer sein.

# GSM: Signalstruktur bei EDGE



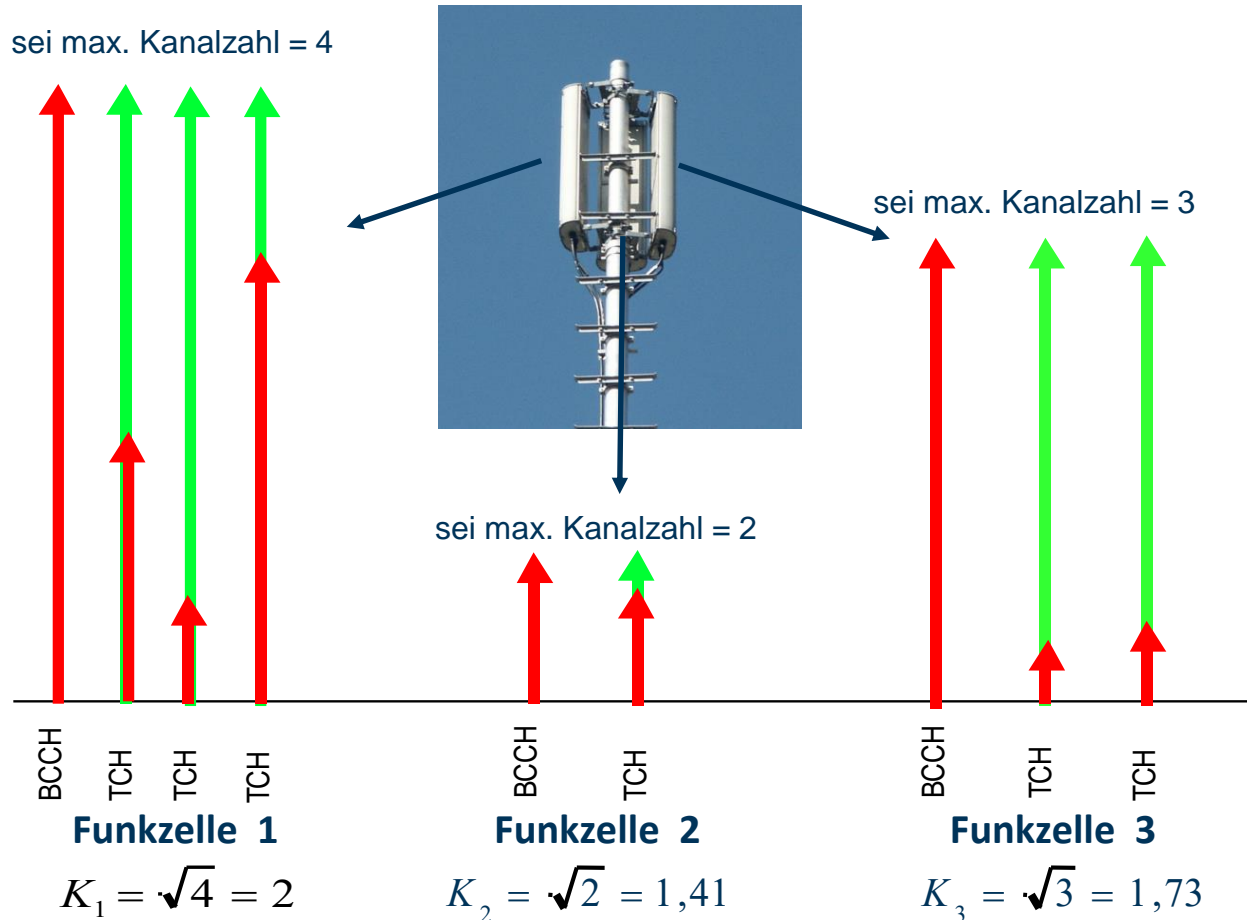
→ RMS-Detektor notwendig!

# GSM: Prinzip der Hochrechnung



- TRX 1: "Signalisierungskanal ("Broadcast Channel"; BCCH) wird permanent mit maximaler Leistung abgestrahlt.
- TRX 2.....n: "Verkehrskanäle" ("Traffic Channel" TCH): Diese werden nur bei Bedarf mit permanent wechselnder Leistung abgestrahlt.
- Konsequenz: Maximal abgestrahlte Leistung =  $n \times$  Leistung von TRX 1.

# GSM: Veranschaulichung der Hochrechnung



## Summenexposition

$$E_{\text{total}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i,\text{BCCH}} \cdot K_i)^2}$$

$$E_{i,\text{max}} = E_{i,\text{BCCH}} \cdot K_i$$

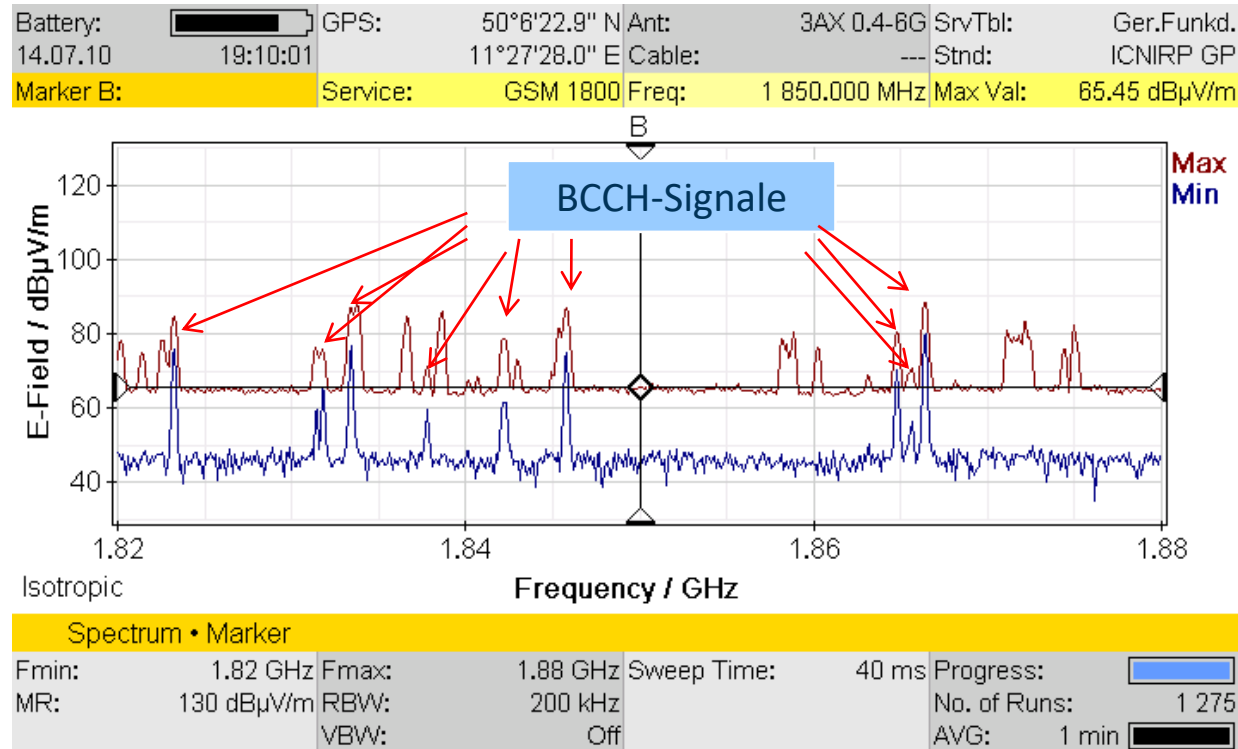


# GSM: Vorgehensweise bei Hochrechnung

- Frequenzselektive Messung.
- Messe nur die zeitlich konstanten Signalisierungskanäle (BCCH).
- Extrapoliere die von den BCCH verursachten Feldstärkewerte auf maximale Leistung mittels der aktuell realisierten oder von der BNetzA genehmigten Kanalzahl (diese Info ist vom Netzbetreiber zu erfragen).
- Ignoriere alle TCH-Signale.
- Summiere (grenzwertbezogen) alle extrapolierten BCCH-Feldstärkewerte.

$$E_{\max,cell} = E_{BCCH,cell} \cdot \sqrt{\frac{P_{\max,cell}}{P_{BCCH,cell}}} = E_{BCCH,cell} \cdot \sqrt{n_{cell}}$$

# GSM: Identifizierung der BCCH



- BCCH's liefern einen Peak sowohl im Max als auch im Min trace.
- TCH's hingegen liefern keinen Peak im Min trace.

# GSM 900: Kanalliste

Channel	Downlink	Channel	Downlink	Channel	Downlink	Channel	Downlink
975	925,2	1	935,2	63	947,6	955	921,0
976	925,4	2	935,4	64	947,8	956	921,2
977	925,6	3	935,6	65	948,0	957	921,4
978	925,8	4	935,8	66	948,2	958	921,6
979	926,0	5	936,0	67	948,4	959	921,8
980	926,2	6	936,2	68	948,6	960	922,0
981	926,4	7	936,4	69	948,8	961	922,2
982	926,6	8	936,6	70	949,0	962	922,4
983	926,8	9	936,8	71	949,2	963	922,6
984	927,0	10	937,0	72	949,4	964	922,8
985	927,2	11	937,2	73	949,6	965	923,0
986	927,4	12	937,4	74	949,8	966	923,2
987	927,6	13	937,6	75	950,0	967	923,4
988	927,8	14	937,8	76	950,2	968	923,6
989	928,0	15	938,0	77	950,4	969	923,8
990	928,2	16	938,2	78	950,6	970	924,0
991	928,4	17	938,4	79	950,8	971	924,2
992	928,6	18	938,6	80	951,0	972	924,4
993	928,8	19	938,8	81	951,2	973	924,6
994	929,0	20	939,0	82	951,4	974	924,8
995	929,2	21	939,2	83	951,6		
996	929,4	22	939,4	84	951,8		
997	929,6	23	939,6	85	952,0		
998	929,8	24	939,8	86	952,2		
999	930,0	25	940,0	87	952,4		
1000	930,2	26	940,2	88	952,6		
1001	930,4	27	940,4	89	952,8		
1002	930,6	28	940,6	90	953,0		
1003	930,8	29	940,8	91	953,2		
1004	931,0	30	941,0	92	953,4		
1005	931,2	31	941,2	93	953,6		
1006	931,4	32	941,4	94	953,8		
1007	931,6	33	941,6	95	954,0		
1008	931,8	34	941,8	96	954,2		
1009	932,0	35	942,0	97	954,4		
1010	932,2	36	942,2	98	954,6		
1011	932,4	37	942,4	99	954,8		
1012	932,6	38	942,6	100	955,0		
1013	932,8	39	942,8	101	955,2		
1014	933,0	40	943,0	102	955,4		
1015	933,2	41	943,2	103	955,6		
1016	933,4	42	943,4	104	955,8		
1017	933,6	43	943,6	105	956,0		
1018	933,8	44	943,8	106	956,2		
1019	934,0	45	944,0	107	956,4		
1020	934,2	46	944,2	108	956,6		
1021	934,4	47	944,4	109	956,8		
1022	934,6	48	944,6	110	957,0		
1023	934,8	49	944,8	111	957,2		
1024	935,0	50	945,0	112	957,4		
		51	945,2	113	957,6		
		52	945,4	114	957,8		
		53	945,6	115	958,0		
		54	945,8	116	958,2		
		55	946,0	117	958,4		
		56	946,2	118	958,6		
		57	946,4	119	958,8		
		58	946,6	120	959,0		
		59	946,8	121	959,2		
		60	947,0	122	959,4		
		61	947,2	123	959,6		
		62	947,4	124	959,8		

Channel	Downlink
955	921,0
956	921,2
957	921,4
958	921,6
959	921,8
960	922,0
961	922,2
962	922,4
963	922,6
964	922,8
965	923,0
966	923,2
967	923,4
968	923,6
969	923,8
970	924,0
971	924,2
972	924,4
973	924,6
974	924,8

Telekom
Vodafone
Telefonica
GSM-R
n.u.

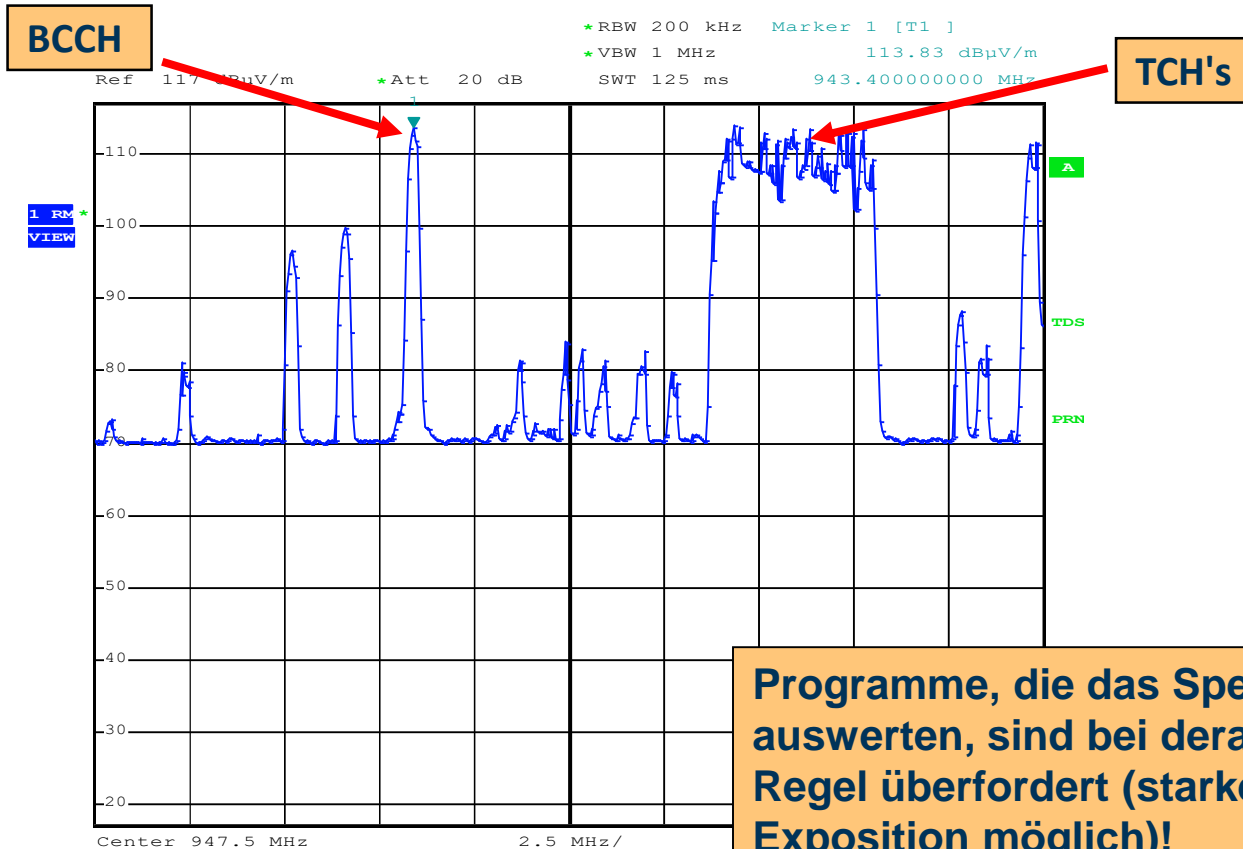
  

LTE 900 Telekom

- Für eine korrekte Hochrechnung ist die Mitarbeit der Netzbetreiber notwendig.
- Diese müssen die maximale Kanalzahl pro Sektor und die Kanalbelegung zur Verfügung stellen.
- Zur Zuordnung der gemessenen Frequenzen zu den Kanälen dient nebenstehende Liste



# GSM: Frequency Hopping



# GSM: Empfohlene Einstellungen

<b>Frequenzbereich (Span):</b>	920 - 960 MHz (GSM-R, GSM-900) (1.805 - 1.880 MHz (GSM-1800))
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	200 kHz
<b>Detektor:</b>	RMS (bei SRM-3006: VBW=2 kHz)
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Hochrechnung:</b>	Messung der BCCH-Signale + Hochrechnung auf aktuell vorhandene oder genehmigte Kanalzahlen



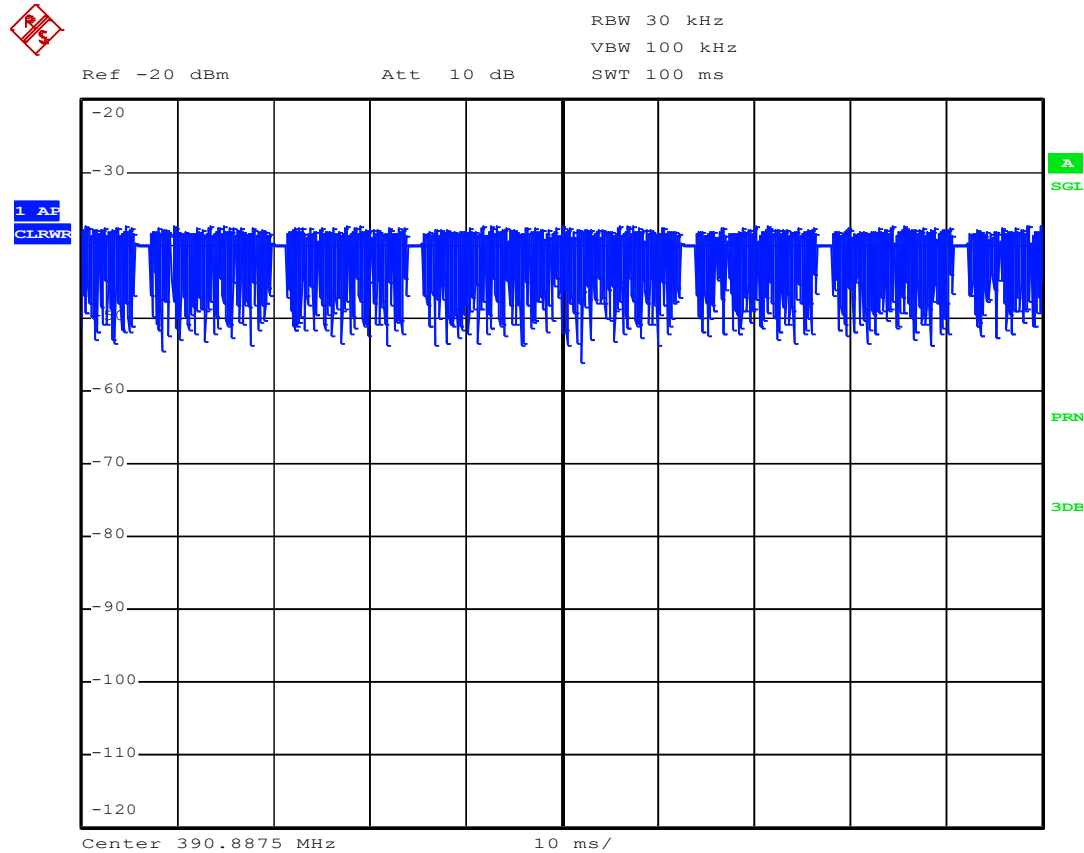
# TETRA BOS: Technische Parameter



Foto: dpa

<b>Frequenzbereich:</b>	390 - 395 MHz (DL)
<b>Signalstruktur:</b>	4 Zeitschlitz / Rahmen
<b>Rahmendauer:</b>	56,7 ms (17,6 Hz), d.h. 14,2 ms / Zeitschlitz
<b>Modulation:</b>	$\pi/4$ -DQPSK
<b>Signalbandbreite:</b>	25 kHz
<b>Frequenzkanäle:</b>	1 MCCH-Träger <i>mit konst. Sendeleistung</i> und ggf. weitere TCH

# TETRA BOS: Signalverlauf (MCCH)



→ Crestfaktor ca. 3 dB: RMS-Detektor notwendig!

# TETRA BOS: Hochrechnung

- Frequenzselektive Messung.
- Messe nur die zeitlich konstanten Signalisierungskanäle (MCCH = Main Control Channel).
- Extrapoliere die von den MCCH verursachten Feldstärkewerte auf maximale Leistung mittels der aktuell realisierten oder von der BNetzA genehmigten Kanalzahl (Diese Info ist vom Netzbetreiber zu erfragen).
- Im Gegensatz zu GSM ist auf den übrigen Verkehrskanälen (TCH) KEINE Leistungsregelung vorhanden.
- Summiere (grenzwertbezogen) alle extrapolierten MCCH-Feldstärkewerte.

$$E_{\max,cell} = E_{MCCH,cell} \cdot \sqrt{\frac{P_{\max,cell}}{P_{MCCH,cell}}} = E_{MCCH,cell} \cdot \sqrt{n_{cell}}$$

# TETRA BOS: Einstellungen

<b>Frequenzbereich (Span):</b>	390 - 395 MHz
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	30 kHz
<b>Detektor:</b>	RMS (bei SRM-3006: VBW=300 Hz)
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Hochrechnung:</b>	Messung der MCCH-Signale + Hochrechnung auf aktuell vorhandene oder genehmigte Kanalzahlen



# LTE: Technische Parameter



**Frequenzbereich:** 791 - 821 MHz (LTE-800)  
952,4 - 957,4 MHz (LTE-900)  
1805 - 1880 MHz (LTE-1800)  
2110 - 2170 MHz (LTE-2100)  
2600 - 2690 MHz (LTE-2600)

**Hüllkurve:** rauschartig,  
gepulst (wenig Verkehr);  
kontinuierlich (max. Verkehr)

**Zugriffsverfahren:** OFDMA, 15 kHz Trägerabstand

**Modulation:** QPSK, 16-QAM, 64-QAM

**Signalbandbreite:** 1,08 – 18 MHz

**Kanalbandbreite:** 1,4 – 20 MHz

**Frequenzkanäle:** Gleichwellennetz

# LTE: Frequenzbereiche



Quelle: Bundesnetzagentur

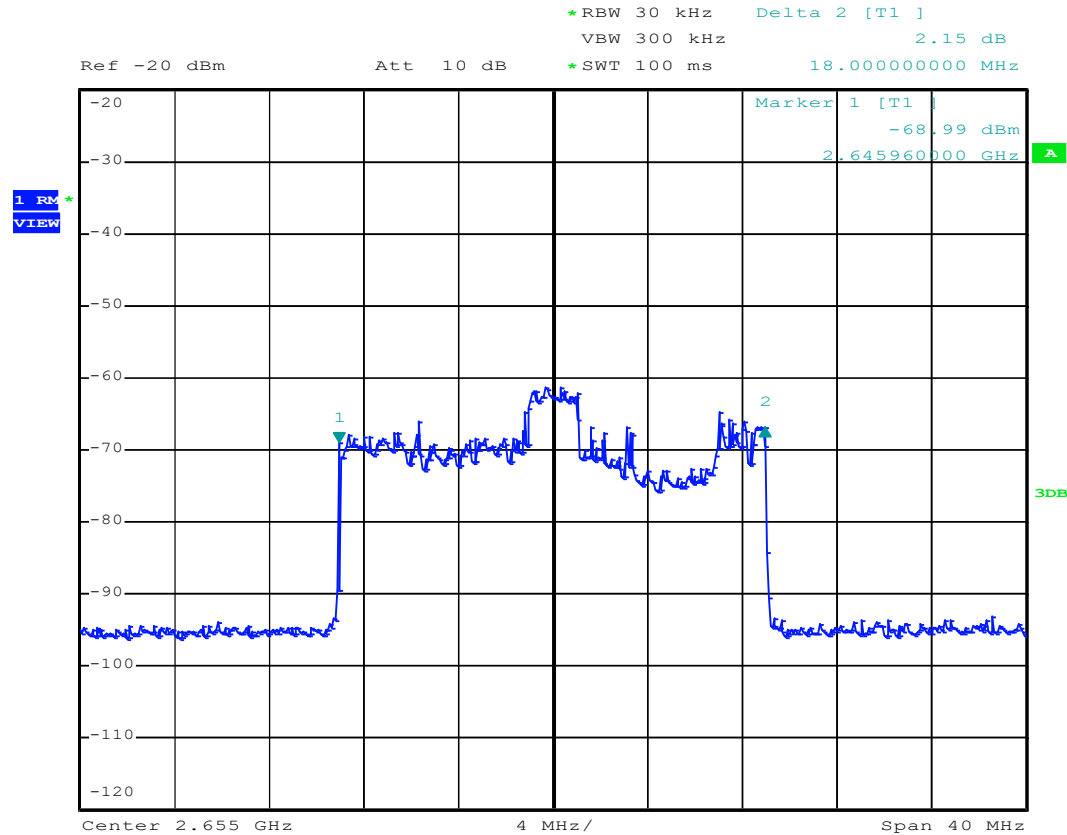


Stand: 20.01.2020





# LTE: Signalstruktur im Frequenzbereich

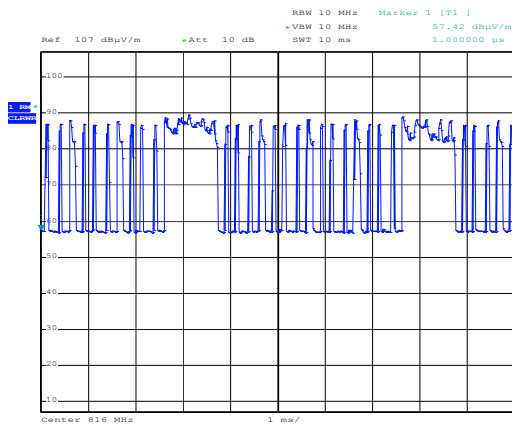


→ breitbandiges Signal

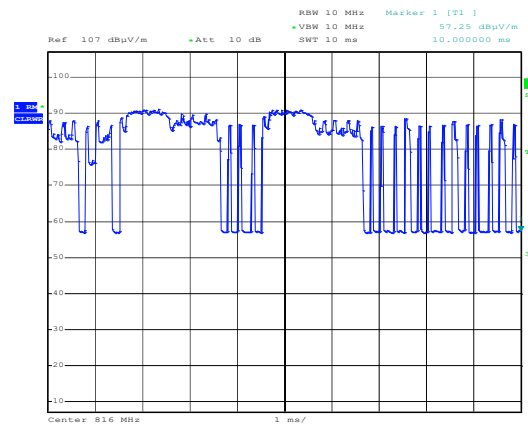


# LTE: Signalverläufe im Zeitbereich

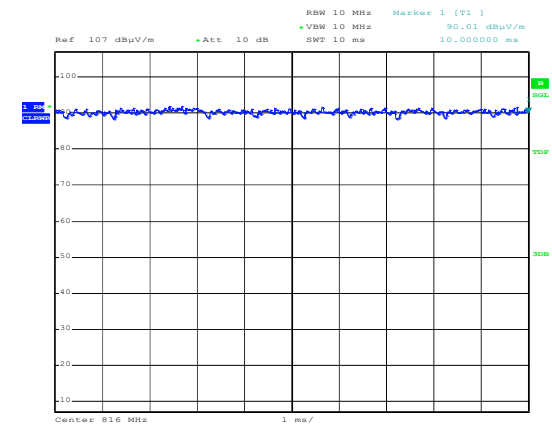
Streaming ca. 1 MBit/s



Streaming ca. 2 MBit/s

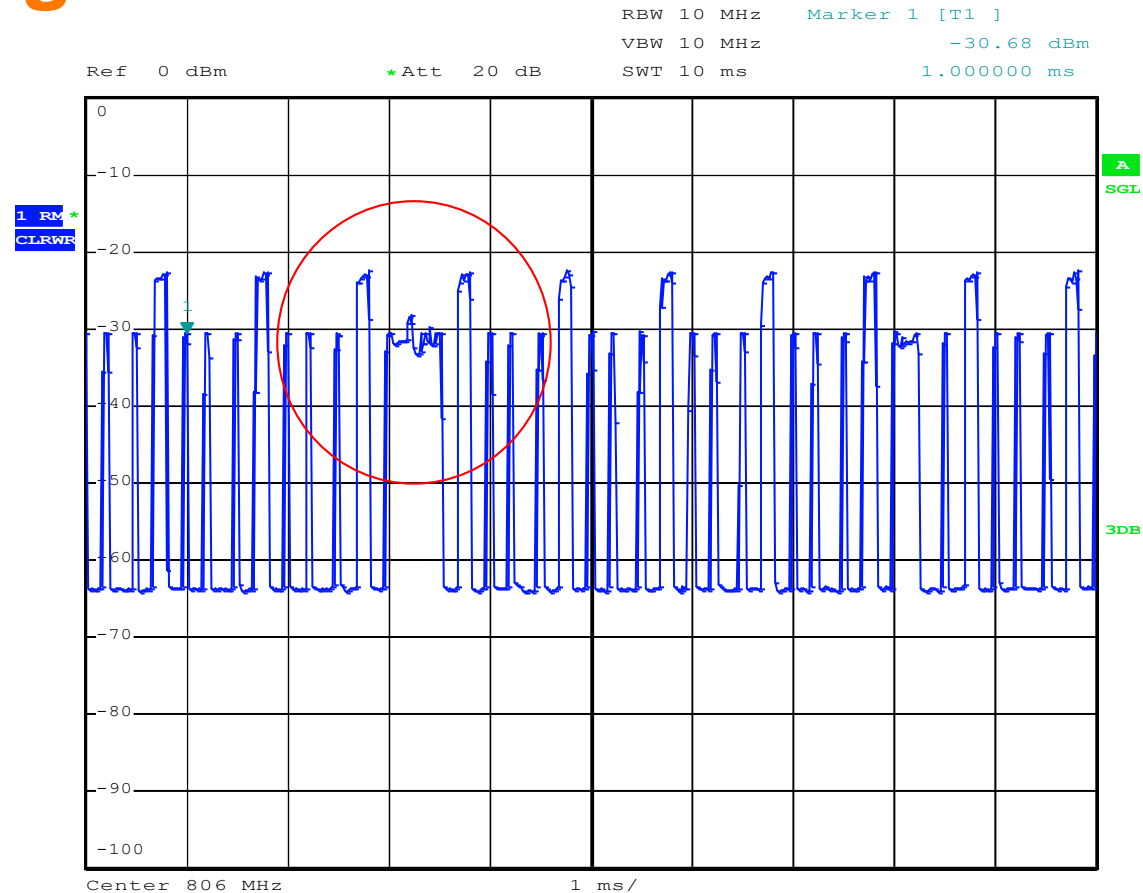


Volllast



→ Lücken werden bei steigendem Verkehr aufgefüllt, Zeitverlauf wird zunehmend kontinuierlich

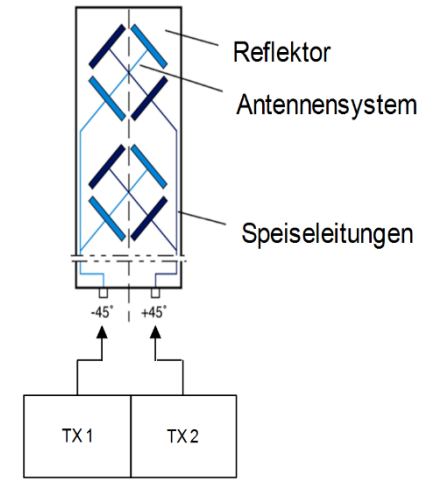
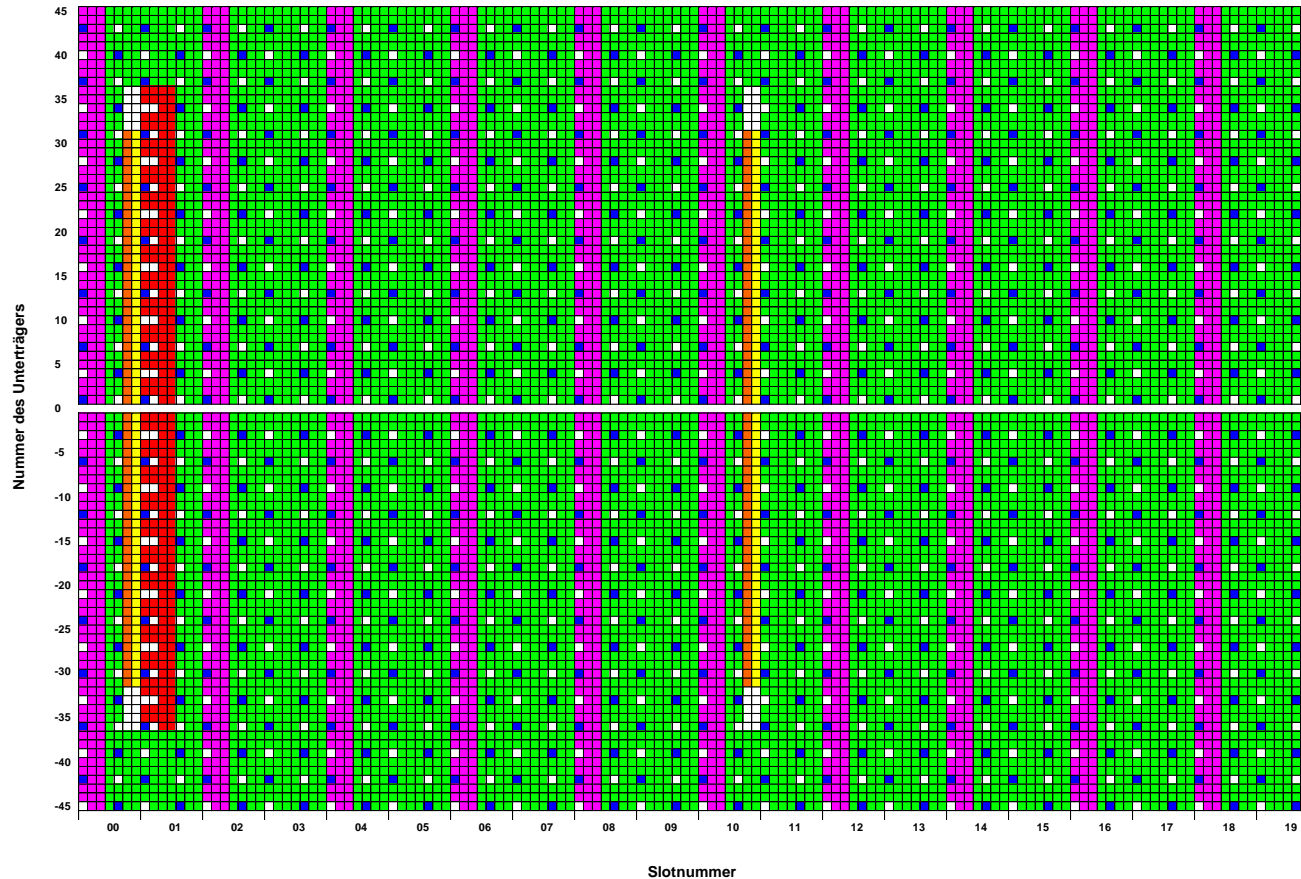
# LTE: Signalstruktur im Zeitbereich



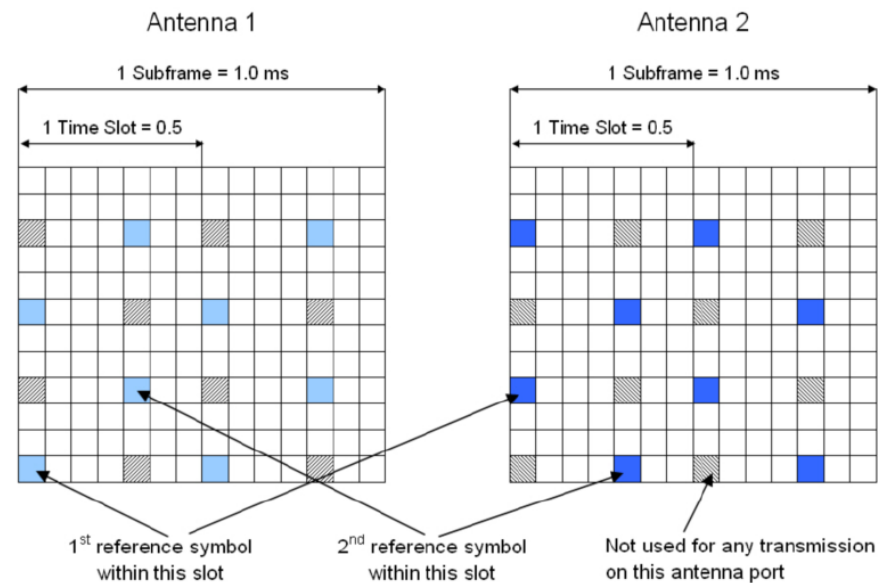
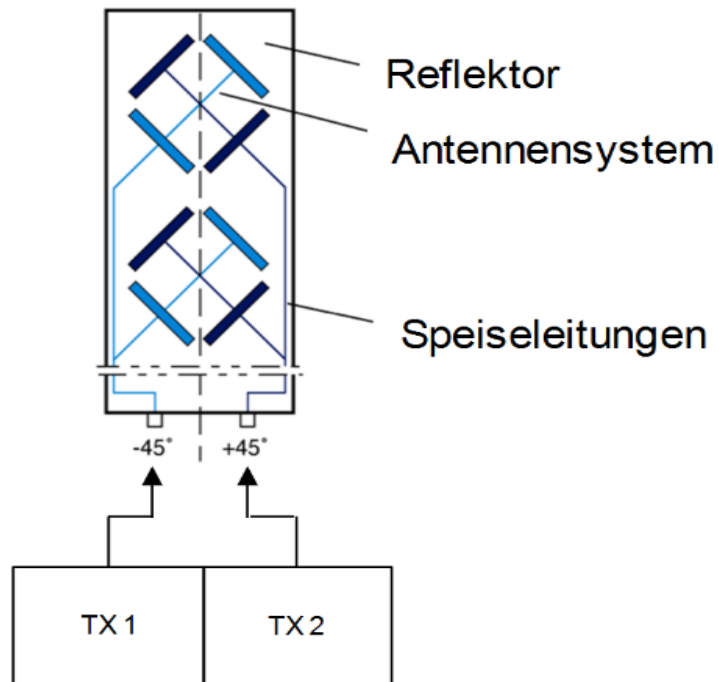
→ Pulsstruktur

# LTE: Resource Grid FDD, 2-Antennen-MIMO

- P-SS Primary Synchronization Signal
- RS Reference Signal
- PDCCH Physical Downlink Control Channel
- S-SS Secondary Synchronization Signal
- PBCH Physical Broadcast Channel
- PDSCH Physical Downlink Shared Channel

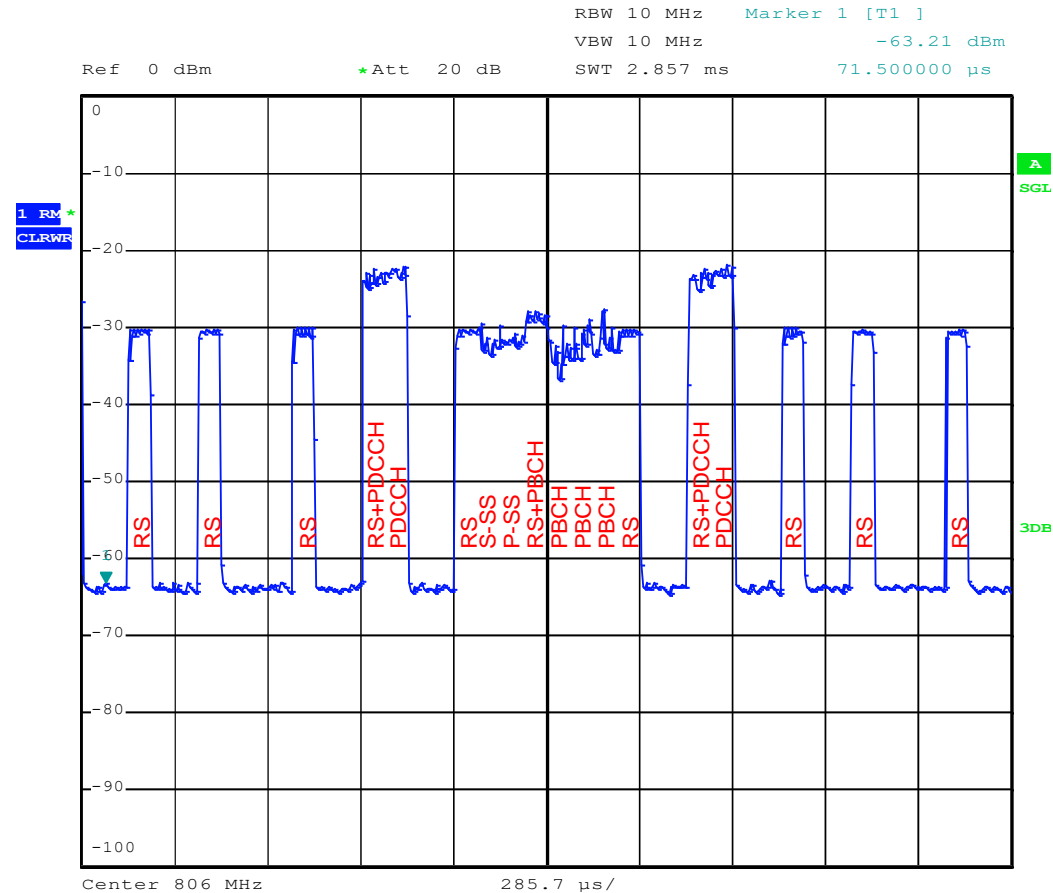


# LTE: 2-Antennen-MIMO

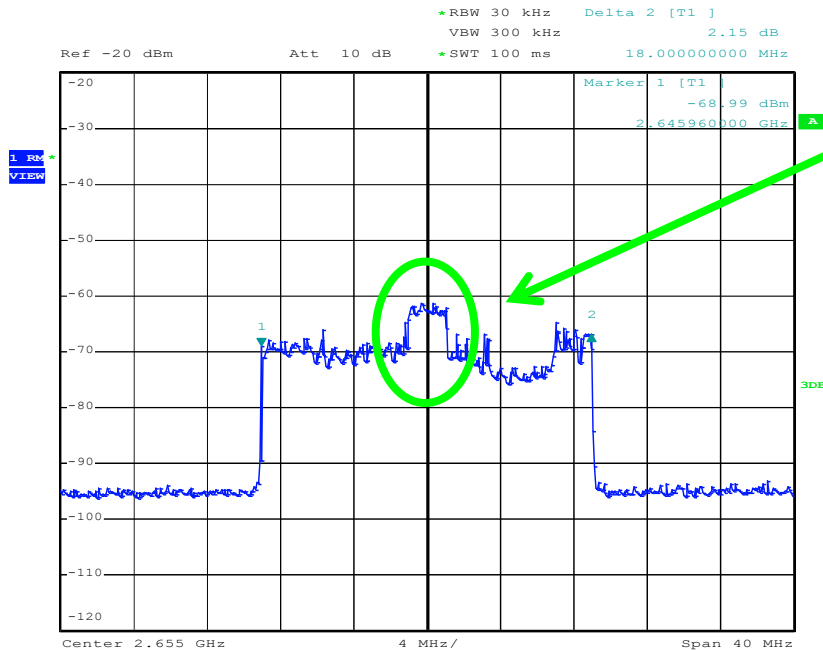


Quelle: Rohde & Schwarz

# LTE: Signalstruktur im Zeitbereich; Detail



# LTE: Frequenzselektive Messung

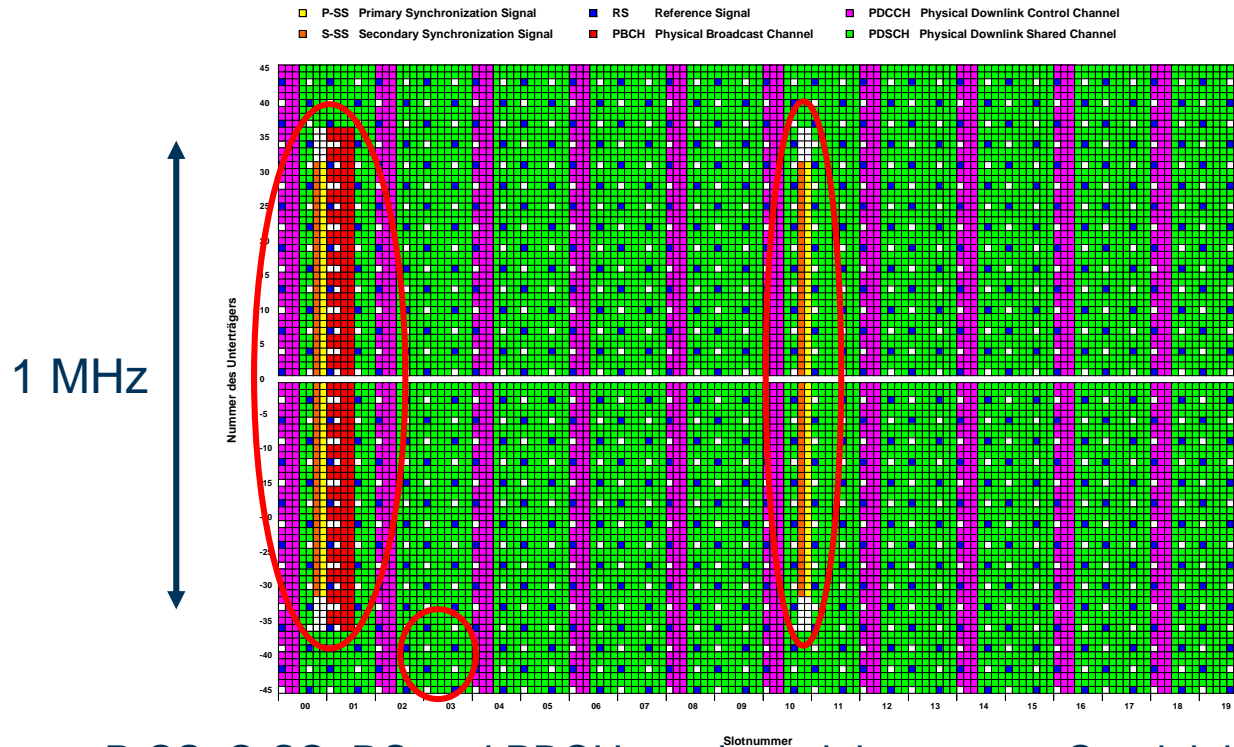


Erfassung der verkehrslastunabhängigen Signale, die mit konstanter Leistung gesendet werden (ca. 1 MHz in der Bandmitte):

- P-SS Primary Synchronization Signal
- S-SS Secondary Synchronization Signal
- PBCH Physical Broadcast Channel

**Expositionsmessung der Signale über 1 MHz in der Bandmitte und Extrapolation auf die maximale LTE-Bandbreite**

# Extrapolation bei spektraler Messung



- P-SS, S-SS, RS und PBCH werden mit konstanter Sendeleistung gesendet
- P-SS, S-SS und PBCH belegen ca. 1 MHz in Kanalmitte
- Maxhold-Messung mit RBW=1 MHz und anschließender Hochrechnung auf Signalbandbreite



# LTE: Codeselektive Messung

- Bei diesem Verfahren wird selektiv die Feldstärke, verursacht durch das RS-Signal jeder Zelle (Reference Signal, Unterscheidung durch zellspezifische Codierung), gemessen. Bei MIMO muss das RS-Signal für beide MIMO-Pfade gemessen werden
- Anschließend wird eine Hochrechnung auf maximale Leistung für jede Zelle unter Zuhilfenahme eines Hochrechnungsfaktors durchgeführt, der sich aus dem prozentualen Anteil der RS-Leistung an der Gesamtleistung der Zelle (beim Netzbetreiber erfragen) ergibt.
- Frequenzselektive Messungen bei LTE sind aufgrund der hohen Unsicherheiten (unterschiedliche Abstrahlung der dominierenden P-SS, S-SS von den beiden Antennenebenen) **NICHT mehr zu empfehlen!**

$$E_{\max,cell} = E_{RS0/1,cell} \cdot \sqrt{\frac{P_{\max,cell}}{P_{RS0/1,cell}}}$$

# LTE Codeselektives Messbeispiel

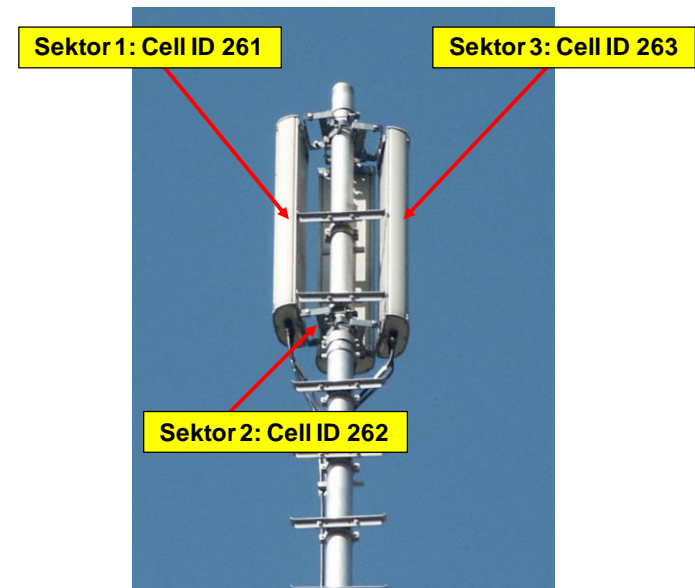
- P-SS, S-SS und RS (Reference Signal) sind individuell für jeden Sektor der BS codiert
- bei MIMO muss das RS-Signal für beide MIMO-Pfade gemessen werden

Battery:  GPS: 51°28'51.7" N Ant: 3AX 0.4-8G SrvTbl: Mofu-Betr  
 14.12.12 14:11:54 6°32'40.0" E Cable: SRM 1.5 m Stnd: ICNIRP GP

Table View						
Index	Cell ID	No. Ant	Max (PSS)	Max (SSS)	Max (RS 0)	Max (RS 1)
1	262	2	89.86 dBµV/m	89.24 dBµV/m	89.74 dBµV/m	90.13 dBµV/m
2	263	2	90.12 dBµV/m	89.59 dBµV/m	90.33 dBµV/m	90.98 dBµV/m
Total			92.60 dBµV/m	91.94 dBµV/m	93.06 dBµV/m	92.47 dBµV/m
Analog			103.35 dBµV/m			

Isotropic

LTE						
Fcent:	806 MHz	CBW:	1.4 MHz	Sweep Time:	677 ms	Progress: <input type="checkbox"/>
MR:	141 dBµV/m	Extr. Fact.:		Off Noise Suppr.:		Off No. of Runs: 58
		Cell Sync.:	Sync. CP Length:	Normal	AVG:	4 <input type="checkbox"/>



# LTE codeselektiv Beispiel Hochrechnung

## Beispielangabe Netzbetreiber

- LTE-800 mit 10 MHz Kanalbreite und 9 MHz Signalbandbreite
- beantragte Gesamtkanalsendeleistung: 20 W, RS-Leistung 15,2 dBm

## Ermittlung Hochrechnungsfaktor HRF

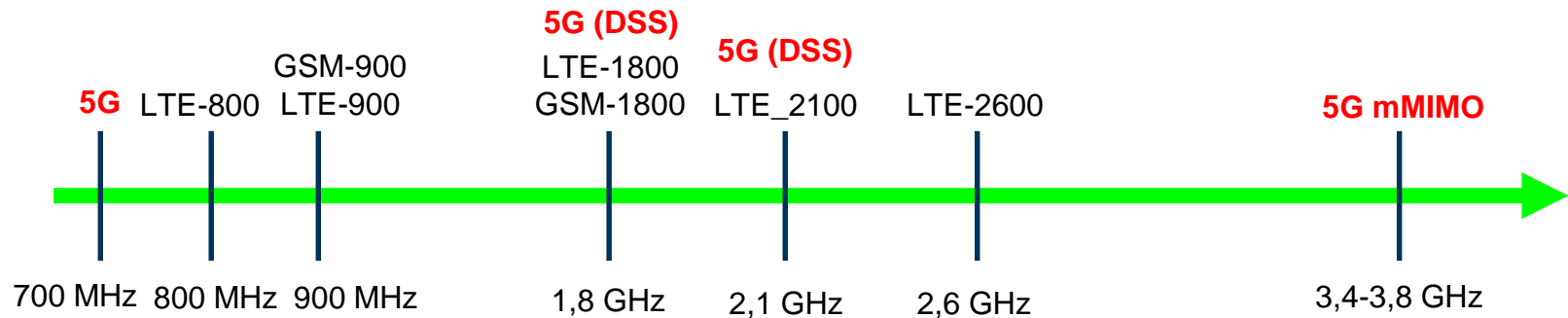
- $\text{HRF} = 20 \text{ W} / 33,1 \text{ m W} \approx 600$  (denn  $15,2 \text{ dBm} \triangleq 33,1 \text{ mW}$ )
- Kontrolle: bei 9 MHz Signalbandbreite und 15 kHz Trägerabstand gibt es 600 Träger, RS ist also nicht „geboostet“
- Bei 3 dB-Boost von RS wäre RS-Leistung dann  $18,2 \text{ dBm} \triangleq 66,2 \text{ mW}$ ) und  $\text{HRF} = 300$

## Hochrechnung auf Maximallast

- $E_{\text{max,Kanal}} = E_{\text{RS,gemessen}} + 10 \log \text{HRF}$



# 5G: Frequenzbereiche



- Die derzeit eingesetzten Frequenzen für 5G sind nicht neu:
  - 700 MHz: bisher analoges und digitales Fernsehen
  - 1,8 GHz: GSM-1800, LTE-1800
  - 2,1 GHz: UMTS
  - 3,4 – 3,8 GHz: WiMAX

DSS: Dynamic Spectrum Sharing; 4G und 5G nutzen gleiche Frequenzressourcen

# 5G: Zellvarianten



Kleinzelle indoor (Picozelle)  
Einige 10 m Abdeckung  
Rundstrahlend oder gerichtet  
Antennendiagramm statisch



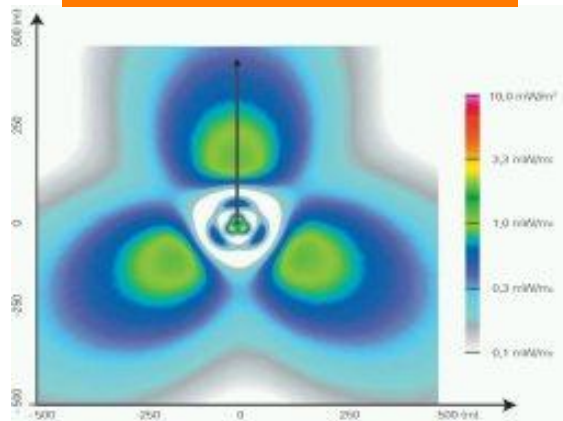
Kleinzelle outdoor (Mikrozelle)  
Bis einige 100 m Abdeckung  
Rundstrahlend oder gerichtet  
Antennendiagramm statisch



Makrozelle  
Bis einige km Abdeckung  
Primär gerichtet  
Diagramm statisch oder dynamisch

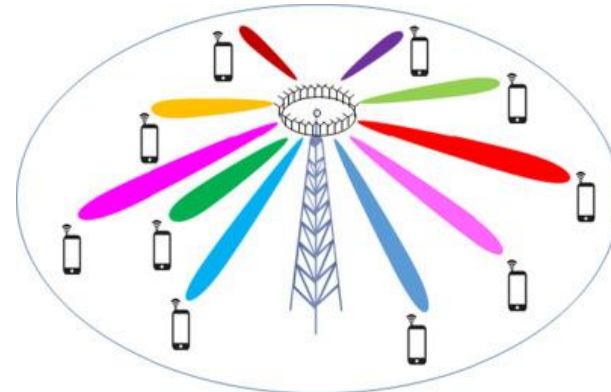
# Statische Abstrahlung vs. Massive-MIMO

Statische Abstrahlung



Quelle: LfU Bayern

Dynamische Abstrahlung



Quelle: Khandaker, Wong

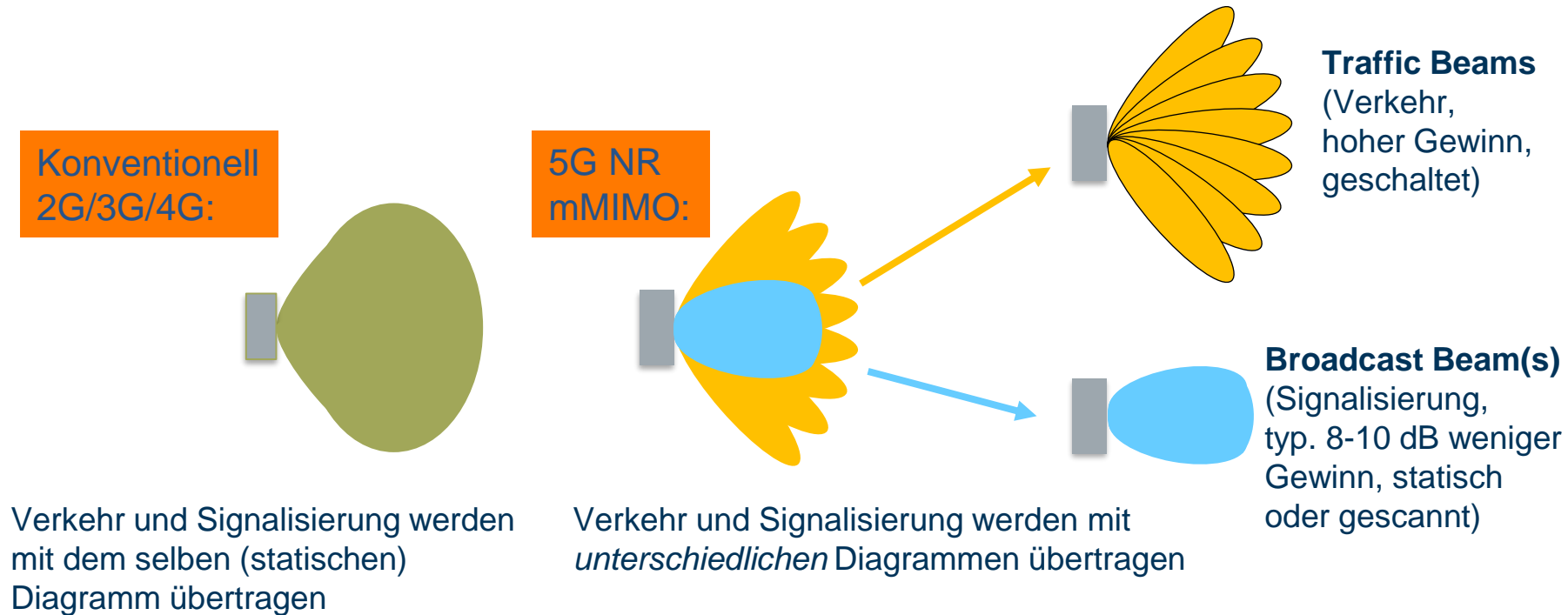
- Bei *Makrozellen* im *Frequenzbereich 3,4-3,8 GHz* können strahlformende und strahlschwenkende Antennen eingesetzt werden (massive-MIMO)
- Einzelne Strahlungsrichtungen (Beams) werden speziell auf den Nutzer (Mobilgerät) ausgerichtet und ggf. nachgeführt (*dynamische Abstrahlung*)

# Expositionsermittlung 5G-DSS (statische Abstrahlung)

- (Codeselektive) Messung des LTE-Anteils;  
maximale 5G-Immission ist identisch mit maximaler LTE-Immission  
(es wird nur eine bandbezogene Sendeleistung beantragt)
- Provozieren einer Auslastung mit einem 5G-Endgerät  
z.B. mit Netflix FAST-App; diese erzeugt maximalen Downlink-Traffic
- Codeselektive 5G-Messung  
... wird später besprochen



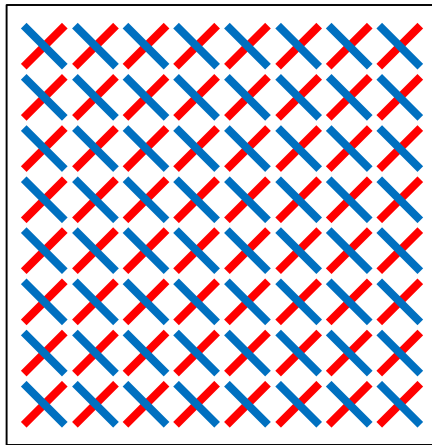
# Expositionsermittlung 5G-massiveMIMO (dynamische Abstrahlung)



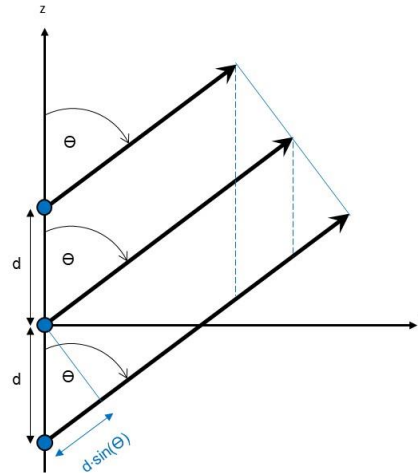


# Strahlformung und Strahlschwenkung

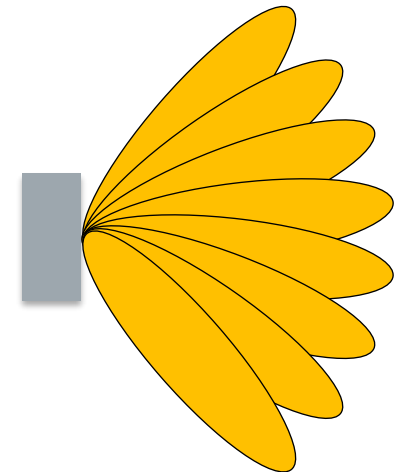
Antenne mit 8x8x2 Einzelstrahlern



Strahlschwenkmechanismus



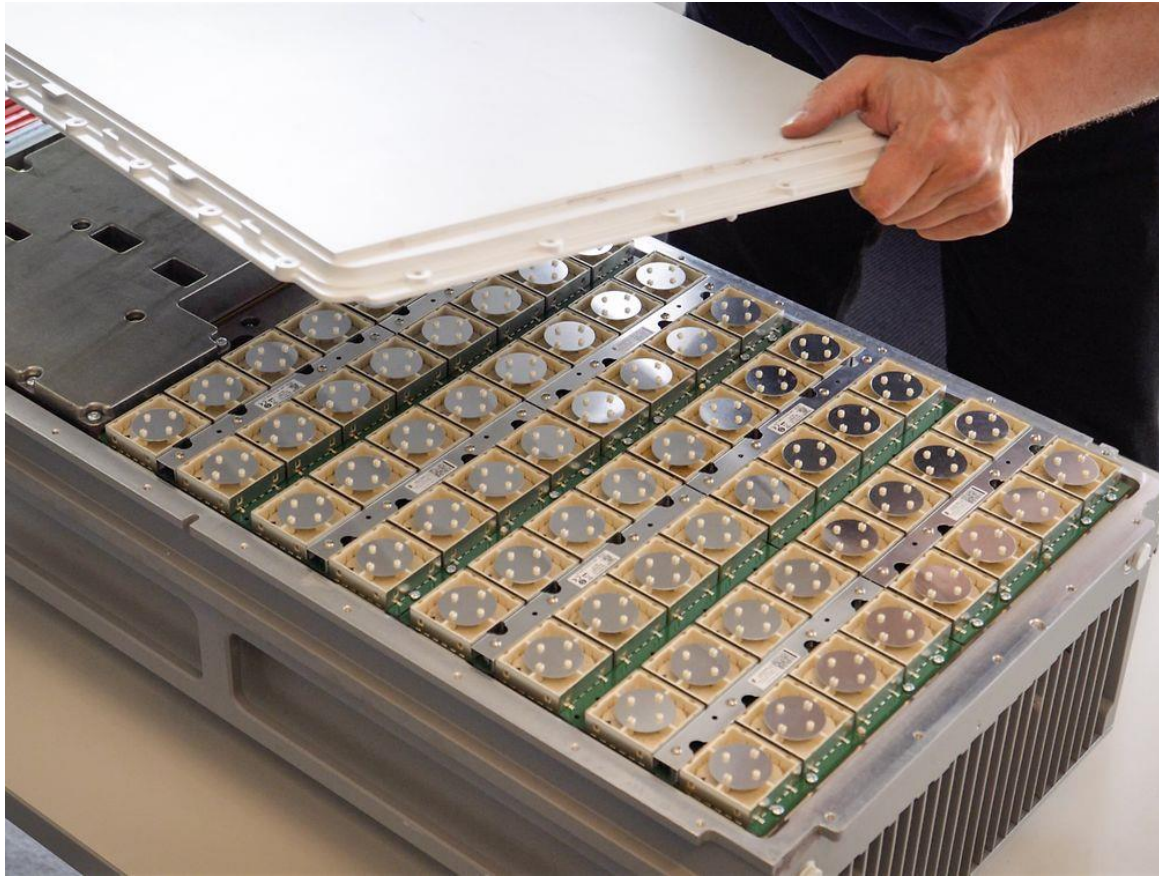
Resultierendes Abstrahlendiagramm



- Viele einzelne Strahlerelemente, die in Zeilen und Spalten angeordnet und in Amplitude und Phase steuerbar sind
- Dadurch lässt sich Beam formen und schwenken

# Beispiel für 5G-massive-MIMO-Antenne

Quelle: Deutsche Telekom



Aufbau 5G-Antennenarray: <https://www.youtube.com/watch?v=neSNVBjPloY>

# 5G-massiveMIMO: Herausforderungen

- Bei Makrostationen im Bereich 3,4 – 3,8 GHz werden in der Regel massive MIMO-Antennen verwendet
- Hierbei wird die Signalisierung (Broadcast Beam(s)) mit einem *anderen Antennendiagramm* abgestrahlt als der Verkehr (Traffic Beams)
- Deshalb ist eine Hochrechnung mittels  $P_{\max}$  (bzw. eher  $\text{EIRP}_{\max}$ , d.h. Signalisierung und max. Verkehr) und  $P_{\text{signal}}$  ( $\text{EIRP}_{\text{signal}}$ , nur Signalisierung) sehr komplex
- Außerdem ist der Anteil der Signalisierung bei 5G sehr „ausgedünnt“



# 5G-mMIMO: Grundsätzliche Messmöglichkeiten

- Messung mit künstlich erzeugter Vollauslastung (SimuLoad)
  - Erfordert Eingriff des Netzbetreibers bzw. Systemtechnikherstellers
  - Bildet nicht die Traffic Beams nach, sondern z.B. CSI-RS
- Messung mit provoziertem Datenverkehr am Messpunkt
  - Kann ein Endgerät im Regelbetrieb (also z.B. bei MU-MIMO) einen Traffic Beam mit maximalem Gewinn und maximaler Sendeleistung zum Messpunkt erzwingen?? → derzeit ja, aber zukünftig?
- Messung der Signalisierung und Hochrechnung auf Maximallast
  - Frequenzselektive Messung (?)
  - Codeselektive Messung



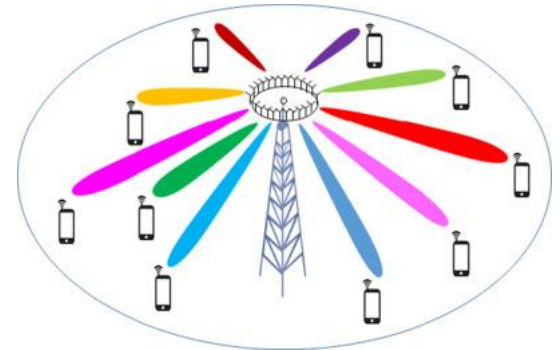
# Kernfragen für 5G-mMIMO-Immissionsmessung

- Welche Beamkonfiguration erzeugt an einem vorgegebenen Messpunkt die höchste Immission?
- Wie geht man mit der Thematik der nicht mehr stationären Beams sowie mit der Trennung von Broadcast und Traffic Beam um?
- Welche verkehrslastunabhängigen Signale stehen für eine Hochrechnung auf maximale Leistung zur Verfügung?

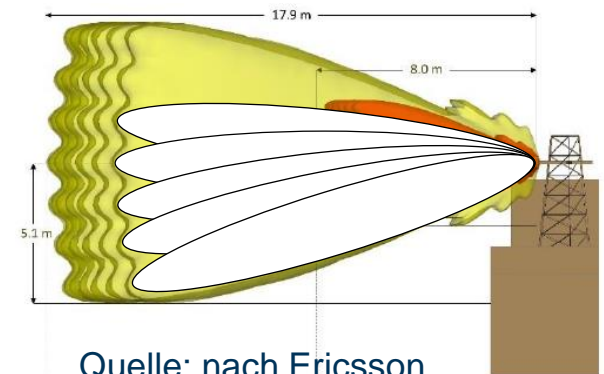


# „Worst case“ Beamkonfiguration

- Die „worst case“ Beamkonfiguration ist
  - ein einzelner Beam, der
  - mit maximaler Sendeleistung abgestrahlt wird
- Nach diesem Ansatz ist für eine rechnerische Standortbescheinigung die Einhüllende über alle möglichen Beamzustände zu bilden

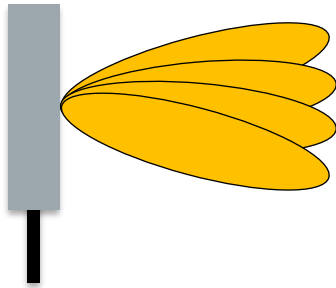


Quelle: nach Khandaker, Wong



Quelle: nach Ericsson

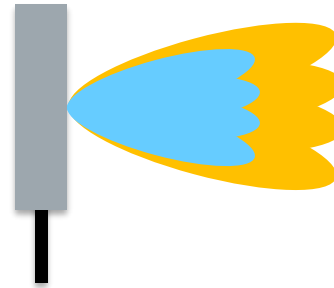
# Trennung von Broadcast und Traffic Beam



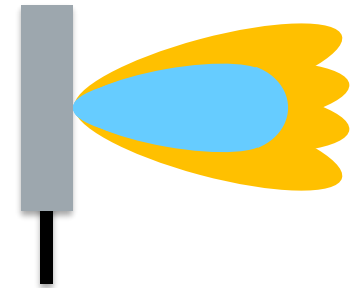
4 verschiedene Zustände des Traffic Beams in Elevationsrichtung



Einhüllende der Traffic Beams



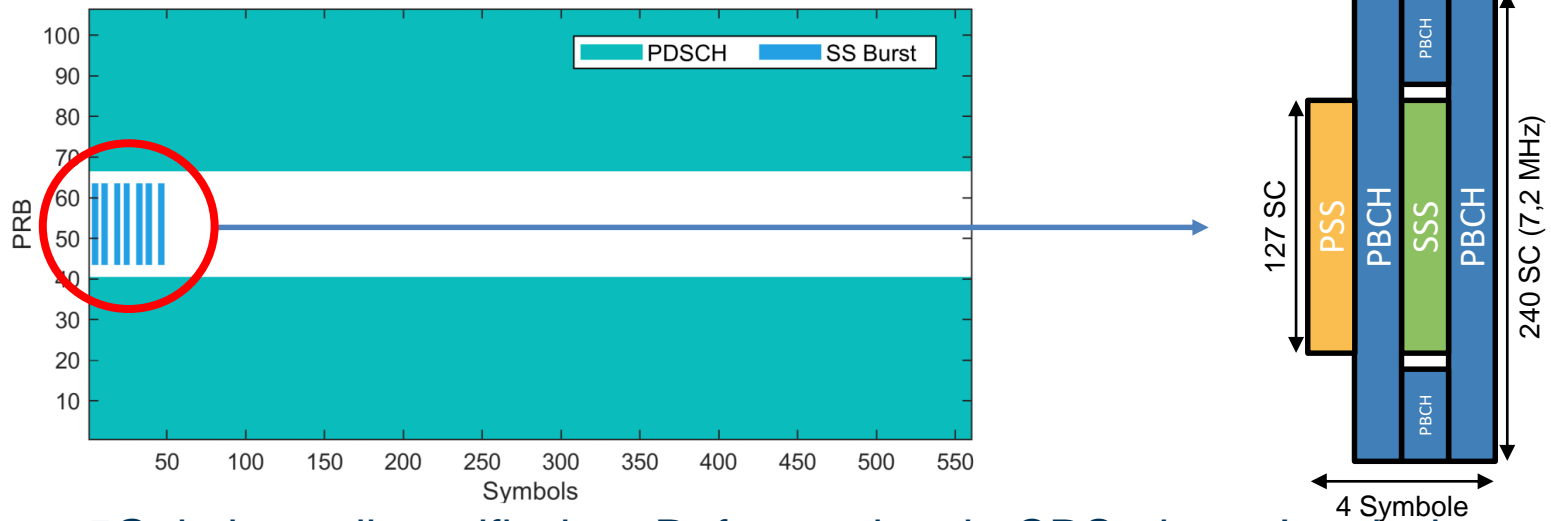
*Formgleichheit* zwischen den Einhüllenden von Broadcast Beam und Traffic Beam



*Keine Formgleichheit*

- Idee: Exposition der verkehrsunabhängigen Signale im **Broadcast Beam** messen und auf den **Traffic Beam** extrapolieren (erfordert aber Diagramm-Formgleichheit)

# Signalisierung: SSB (Synchronization Signal Block)



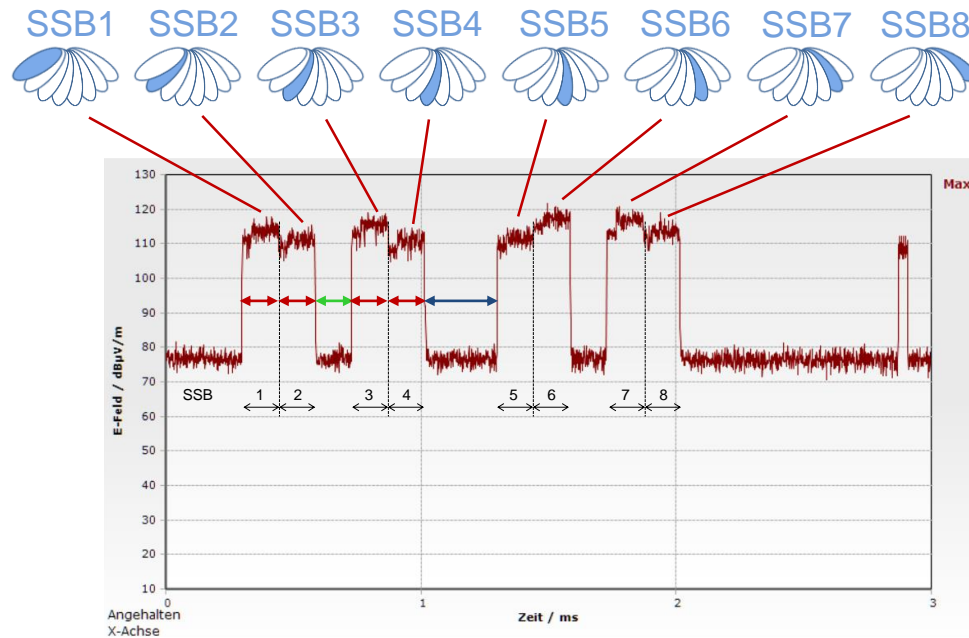
- 5G: keine zellspezifischen Referenzsignale CRS, deren Immission gemessen wird
- Alternativ: zell- und beamspezifische *SS/PBCH Block (SSB)* verwenden: 240 Subcarrier (SC) im Spektralbereich (entspricht 7,2 MHz bei 30 kHz Trägerabstand).

SSB: Synchronization Signal Block  
PSS/SSS: Primary/Secondary Synchronization Signal  
PRB: Physical Resource Block

PBCH: Physical Broadcast Channel  
PDSCH: Physical Downlink Shared Channel  
SC: Subcarrier

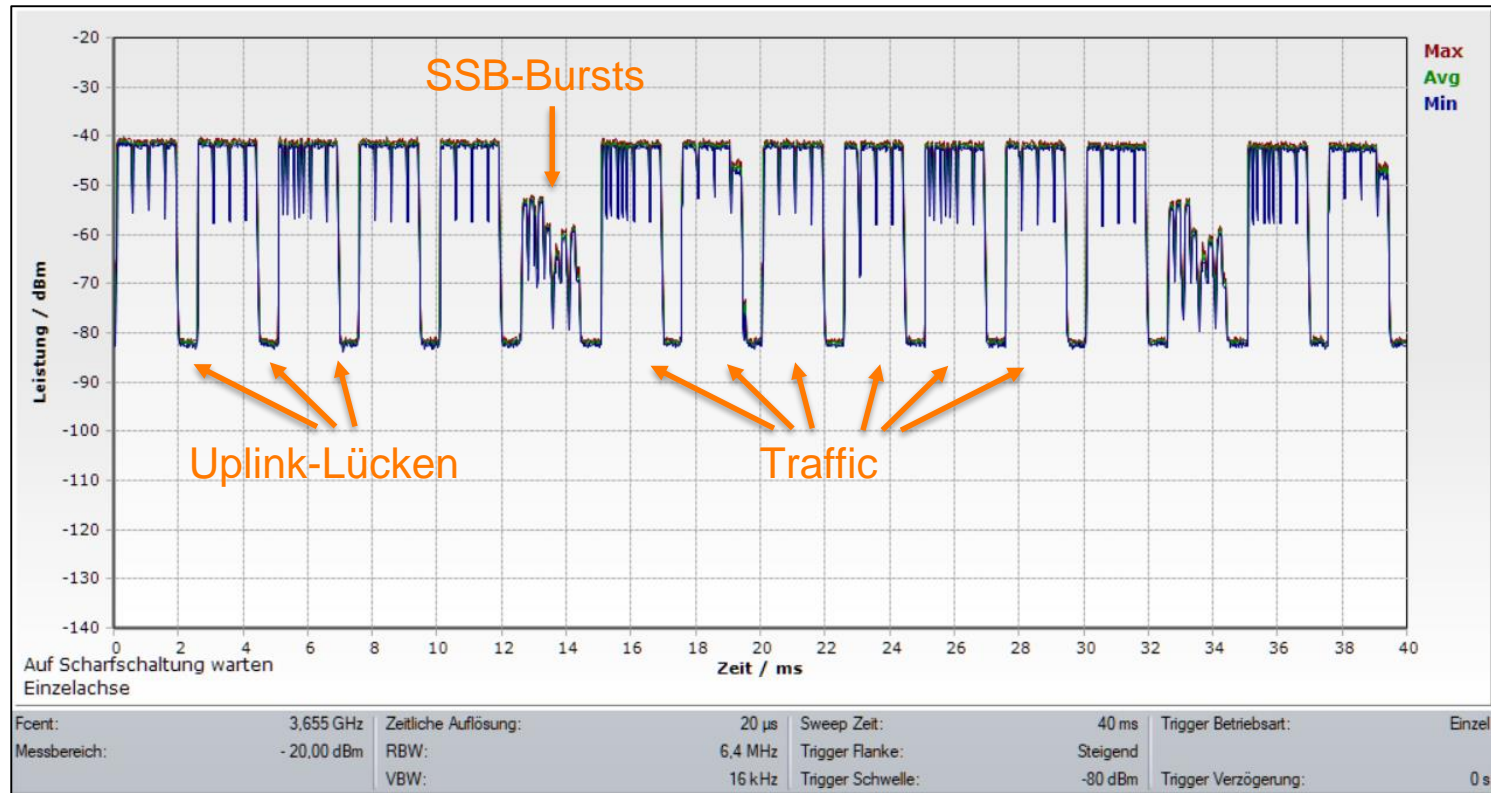


# SSB-Struktur im Zeitbereich



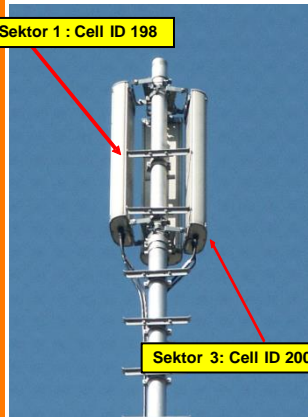
- Beispiel: 5G-Anlage, bei der Broadcast Beam in 8 verschiedenen Richtungen durchgeschaltet wird
- Jeder Broadcast Beam hat seinen eigenen SSB
- Die 8 SSB sind im Zeitbereich separierbar

# 5G-Signal mit Verkehrslast, Zeitbereich



- Bei Verkehr kann SSB durch Traffic überdeckt werden; frequenzselektive Messung deswegen nicht sinnvoll (oder Trigger)

# Alternative: Codeselektive Messung



Battery: 21.05.22 11:29:18 GPS: --- Ant: 3AX 27M-3G SrvTbl: 5G\_36\_DT  
 --- Cable: --- Stnd: ---

**Table View**

Index	Cell ID	No. SSSs	Act (SSS 3)	Max (SSS 3)
1	198	1	83.21 dB $\mu$ V/m	83.85 dB $\mu$ V/m
2	200	1	65.22 dB $\mu$ V/m	66.98 dB $\mu$ V/m
Total			83.28 dB $\mu$ V/m	83.85 dB $\mu$ V/m
Analog			96.96 dB $\mu$ V/m	97.37 dB $\mu$ V/m

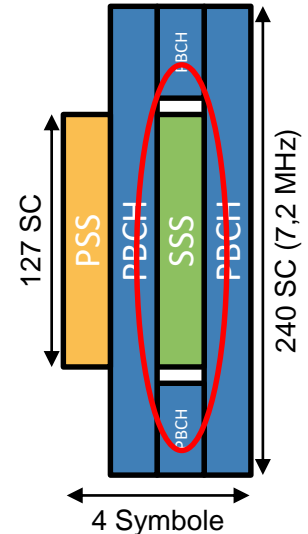
Isotropic

**5G NR**

Fcent: 2.155 35 GHz SCS: 15 kHz Sweep Time: 1.775 s Progress:

MR: 124 dB $\mu$ V/m Sens. Normal No. of Runs: **HOLD**

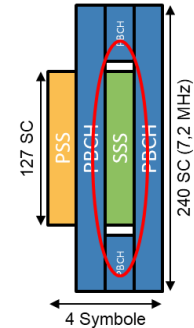
AVG: 6 min



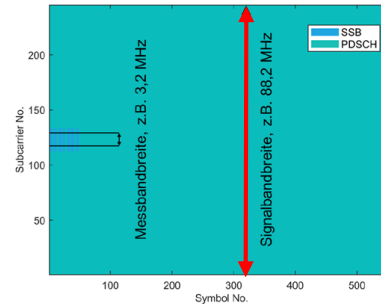
- Codeselektive Messung ermittelt Immission durch 1 RE SSS
- Somit ist wie bei LTE zellspezifische Immissionserfassung möglich

# Skizzierung Messverfahren

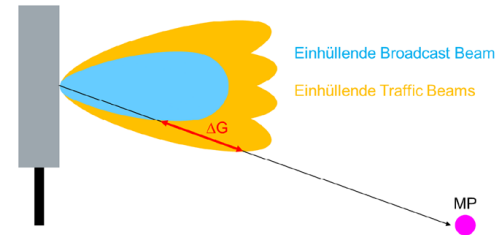
1. (Codeselektive) Messung der verkehrsunabhängigen Signalisierung in der SS/PBCH-Strahlungskeule



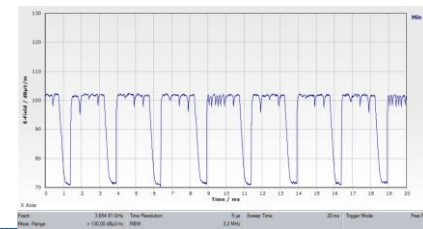
2. Hochrechnung von 1 RE SSS auf die gesamte Signalbandbreite



3. Hochrechnung mit messpunktspezifischem Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Gewinnunterschieds



4. Ggf. Korrektur für Duty Cycle (bei TDD)



# Zusammenfassung 5G-Messungen

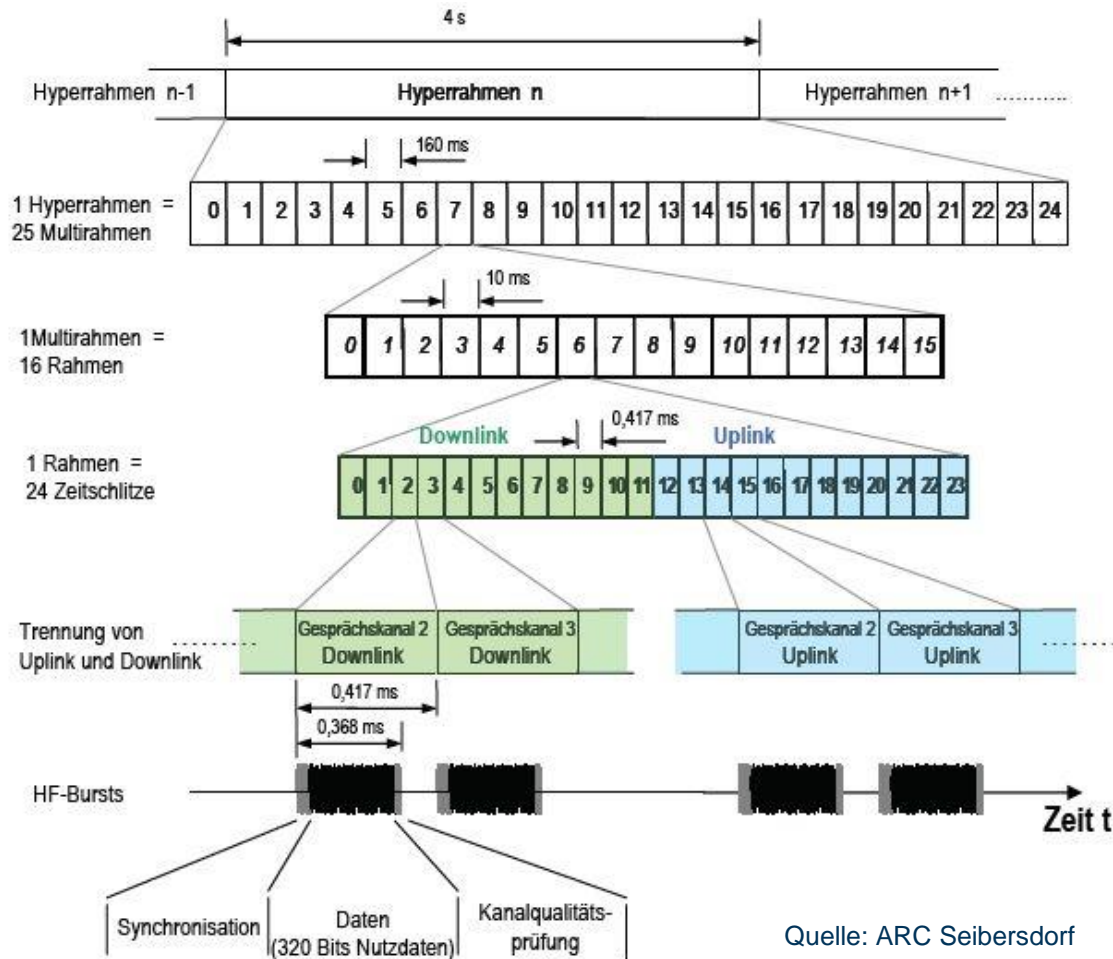
- 5G-DSS: Einfach, da über LTE-Anteil messbar
- 5G mit statischem Abstrahldiagramm:
  - Komplexer, da wenig Signalisierung on air
  - Codeselektive Messung des SSB und Extrapolation auf Signalbandbreite
- 5G mit dynamischem Abstrahldiagramm (massive-MIMO):
  - Sehr komplex, da Traffic Beam / Broadcast Beam Pattern unterschiedlich
  - Codeselektive Messung des SSB und Extrapolation auf Signalbandbreite
  - Antennengewinnkorrekturfaktor Traffic / Broadcast Beam Gain
  - Ggf. Berücksichtigung duty cycle wegen TDD
- Derzeitige Alternative: Provozierter Datenverkehr und spektrale Messung (Achtung: gepulstes Signal!)

# DECT: Technische Parameter

- Frequenzbereich: 1.880 - 1.900 MHz
- Kanalzahl: 10 (Kanalsuche automatisch)
- Kanalabstand: 1.728 kHz
- Maximale Sendeleistung: 250 mW (Pulsleistung!)
- Duplexverfahren: TDD (Time Division Duplex)
- Periodendauer: 10 ms
- Modulationsart: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
- Viele Basisstationen senden permanent HF-Impulse
- Der DECT-Standard unterstützt theoretisch bis zu 12 Mobilteile pro BTS
- In Deutschland verkaufte Geräte unterstützen typ. nur 6 Mobilteile pro BTS.

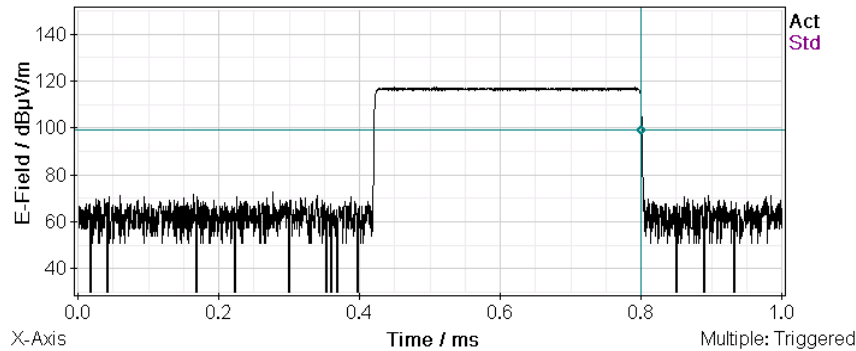


# DECT: Rahmenstruktur



# DECT: Signalstruktur bei Verbindung

Battery: 05.10.10 16:36:52 GPS: 50°6'23.1" N Ant: 3AX 0.4-6G SrvTbl: Ger.GSM1800  
 11°27'27.9" E Cable: --- Std: ICNIRP GP

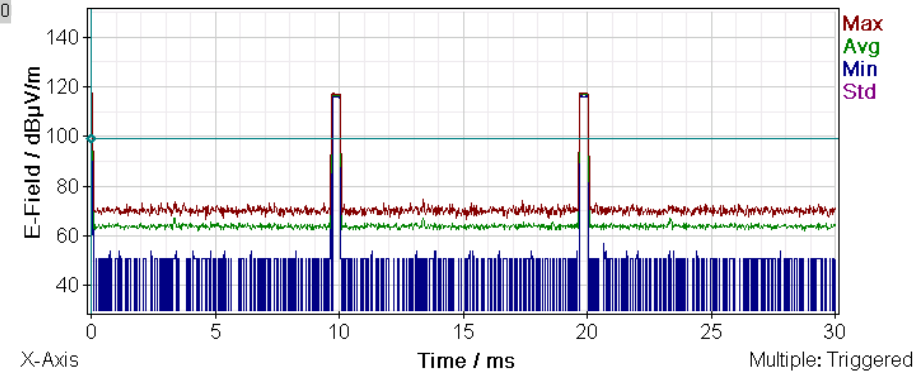


→ Periode: 10 ms

Scope  
 Fcent: 1.897 GHz Time Res.: 500.000 ns Sweep Time: 1.000 ms  
 MR: 130 dBµV/m RBW: 2 MHz Trig. Slope: Falling  
 VBW: Off Trig. Level: 99 dBµV/m Trig. Delay: 800.00

Battery: 05.10.10 16:38:04 GPS: 50°6'23.0" N Ant: 3AX 0.4-6G SrvTbl: Ger.GSM1800  
 11°27'28.0" E Cable: --- Std: ICNIRP GP

→ Pulsdauer: 368 µs  
 (ohne Verbindung: 83 µs)



Scope  
 Fcent: 1.897 GHz Time Res.: 26.000 µs Sweep Time: 30.000 ms  
 MR: 130 dBµV/m RBW: 2 MHz Trig. Slope: Falling  
 VBW: Off Trig. Level: 99 dBµV/m Trig. Delay: 0 s





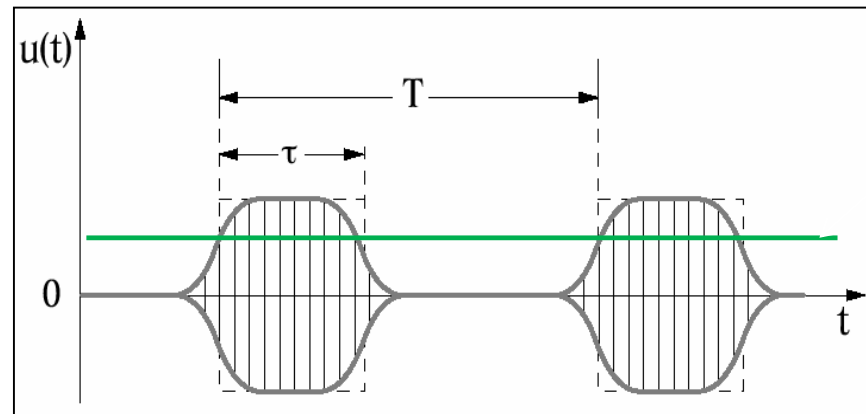
# Bestimmung der mittleren Immission bei gepulster HF

$$E_{RMS} = E_{Puls} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{T}}$$

$E_{RMS}$ : RMS Feldstärke  
 $E_{Puls}$ : Pulsfeldstärke  
 $T$ : Periodendauer  
 $\tau$ : Pulsdauer

$$S_{mittel} = S_{Puls} \cdot \frac{\tau}{T}$$

$S_{mittel}$ : Mittlere Leistungsflussdichte  
 $S_{Puls}$ : Leistungsflussdichte im Puls



$U_{RMS}$

# DECT: Konsequenzen aus Pulsung

Periodendauer T:	immer 10 ms
Pulsdauer $\tau$ der Basisstation bei "normaler Gesprächsverbindung":	368 $\mu$ s
bei gleichzeitigem Abwickeln von n Verbindungen:	n·368 $\mu$ s
im Bereitschaftsmode:	83 $\mu$ s
bei "extremer" Datenübertragung:	8,46 ms (23 von 24 Zeitslitze für den Downlink)

Reduktionsfaktor zur Ermittlung der mittleren Leistung aus der gemessenen Peakleistung:

$$K [\text{dB}] = 10 \cdot \log (\text{Pulsdauer} / \text{Periodendauer})$$

"normale" Gesprächsverbindung (n = 1):	K = -14,3 dB
Bereitschaftsmode:	K = -20,8 dB (Minimalexposition)
"Extreme" Datenübertragung (n = 23):	K = -0,7 dB (Maximalexposition)

Zur Bestimmung der Exposition nach ICNIRP ist also die gemessene Peakfeldstärke [dB $\mu$ V/m] um den Faktor K [dB] zu verringern.



# DECT: Einstellungen

<b>Grundprinzip:</b>	Messe die Feldstärke, die durch den Sendepuls erzeugt wird. Anschließend Korrektur wegen gepulster Abstrahlung.
<b>Frequenzbereich (Span):</b>	1.880 - 1.900 MHz
<b>ZF-Bandbreite (RBW):</b>	(1) 2 MHz
<b>Detektor:</b>	Peak
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Auswertung:</b>	Die mittlere Immission ergibt sich aus der Pulsfeldstärke durch Anwendung eines Reduktionsfaktors (-14,3 dB bzw. -20,8 dB).



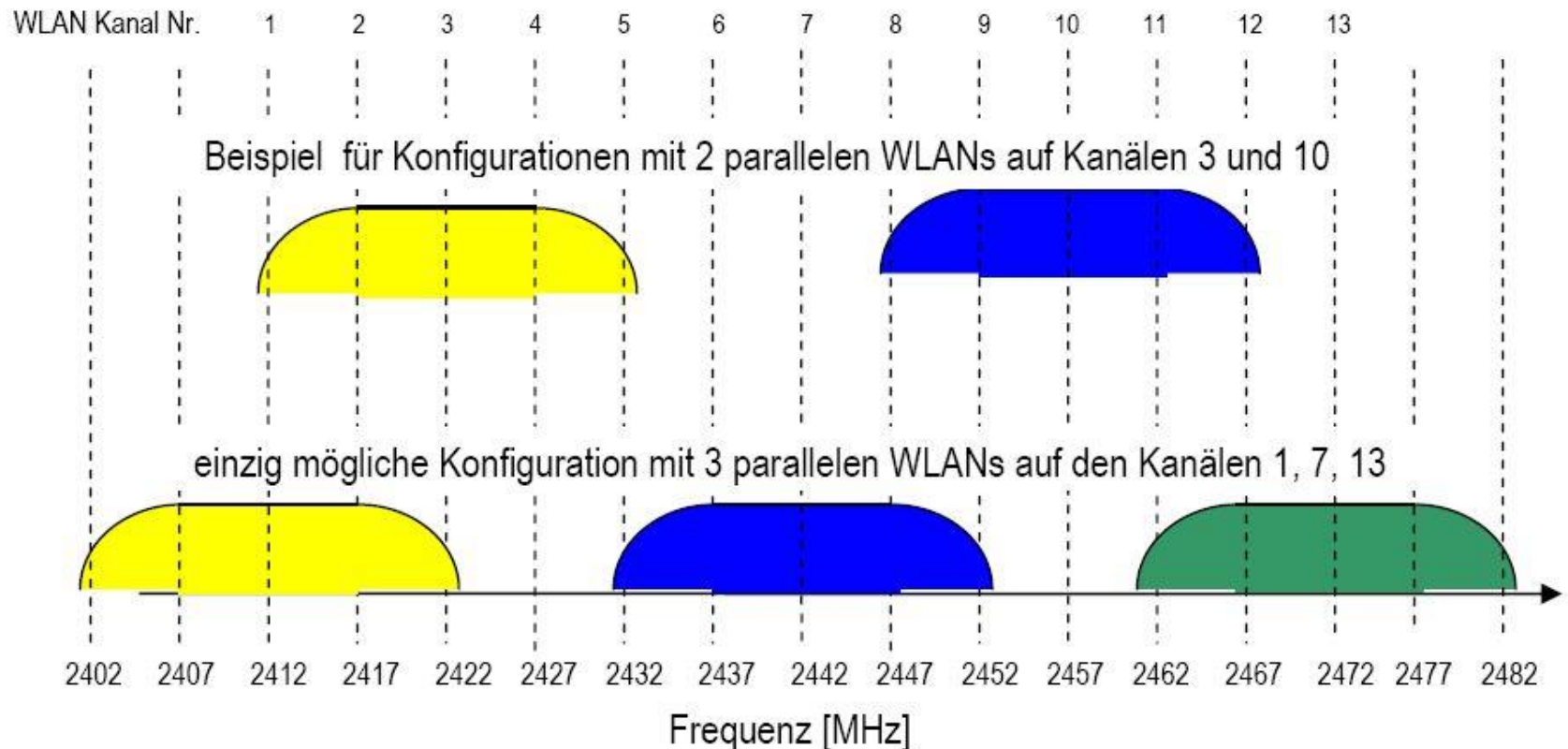
# WLAN: Technische Parameter

Standard	802.11a	802.11b	802.11g	802.11h
Max. Datenrate	54 Mbit/s	11 Mbit/s	54 Mbit/s	54 Mbit/s
Modulation	OFDM	DSSS	DSSS / OFDM	OFDM
Frequenzbereich (Deutschland)	5,15 - 5,35 GHz	2,4 - 2,4835 GHz	2,4 - 2,4835 GHz	5,15 - 5,35 GHz 5,47 - 5,73 GHz
Signalbandbreite	16,6 MHz	≈20 MHz	16,6 / ≈20 MHz	16,6 MHz
Duplexverfahren	Time Division Duplex (TDD)			
Maximale Leistung (EIRP)	30 mW	100 mW	100 mW	200 mW (Indoor) 1 W (Outdoor)
Anmerkungen	Nur Indoor	-	Abwärts kompatibel mit 802.11b	Automatische Leistungsregelung (TPC) und Kanalwahl (DFS)
Reichweite	Einige 10 m (Indoor) bzw. einige 100 m (Outdoor)			

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum  
 OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

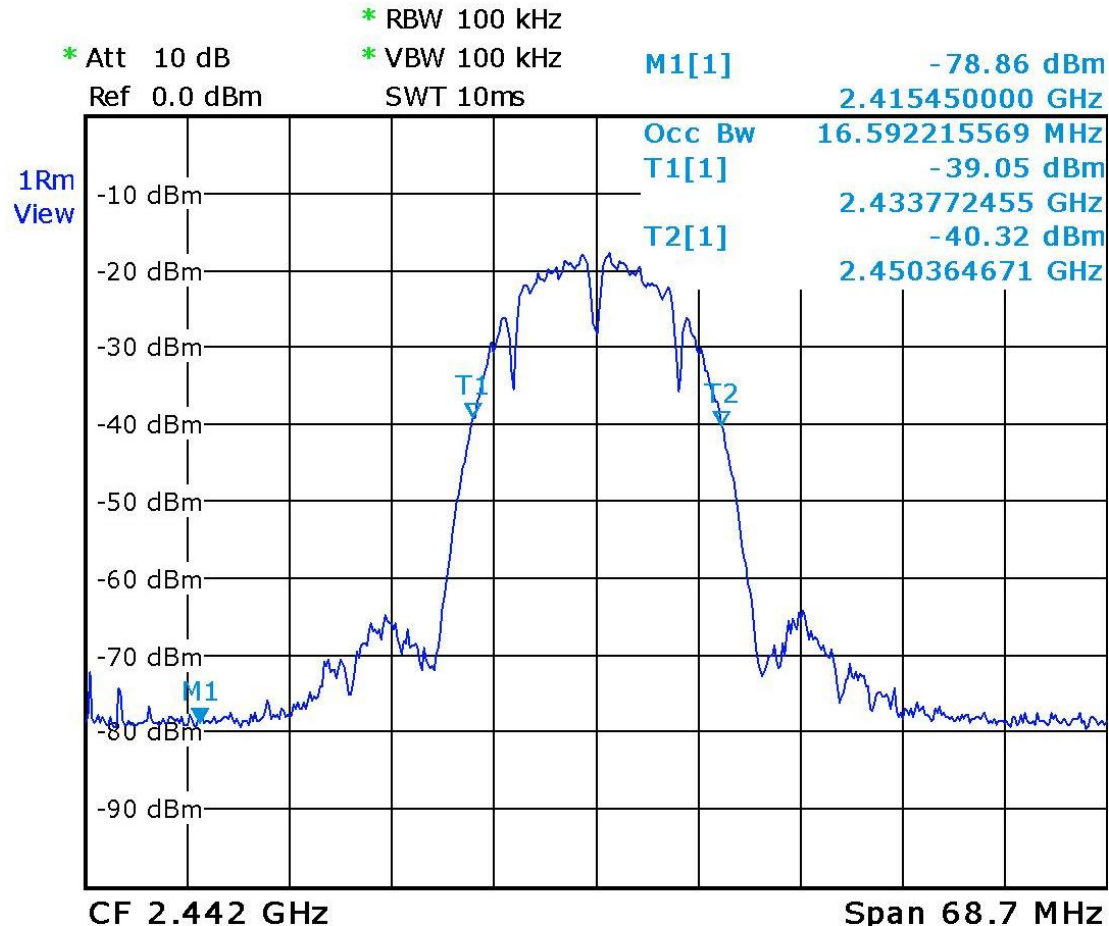


# WLAN: Signalanordnung im 2,4 GHz Band

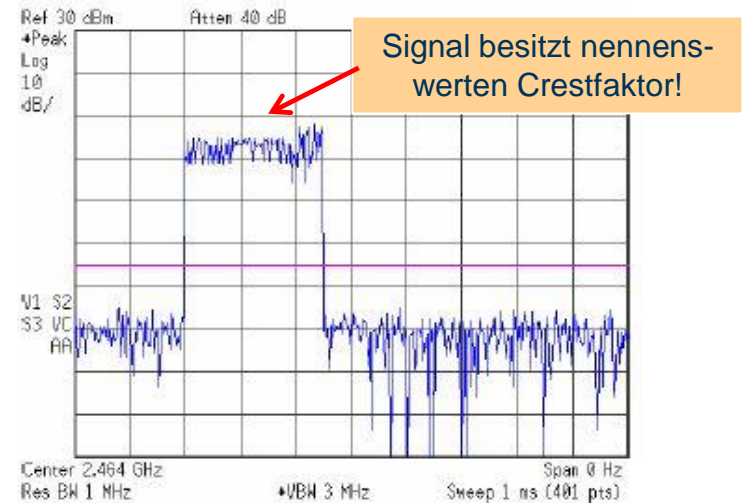
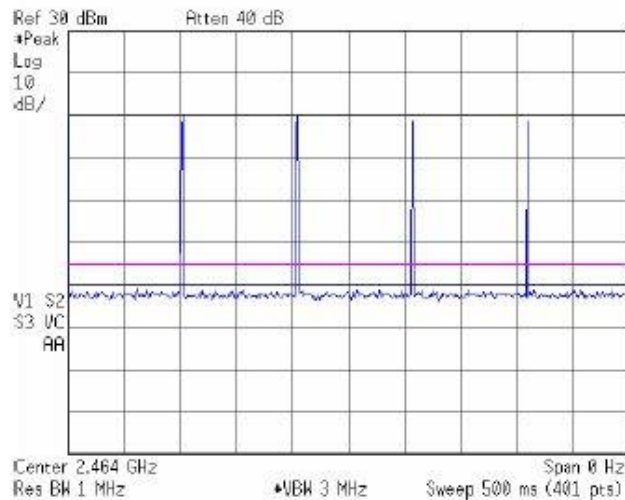


Quelle: ARC Seibersdorf

# WLAN: Signalstruktur im Frequenzbereich

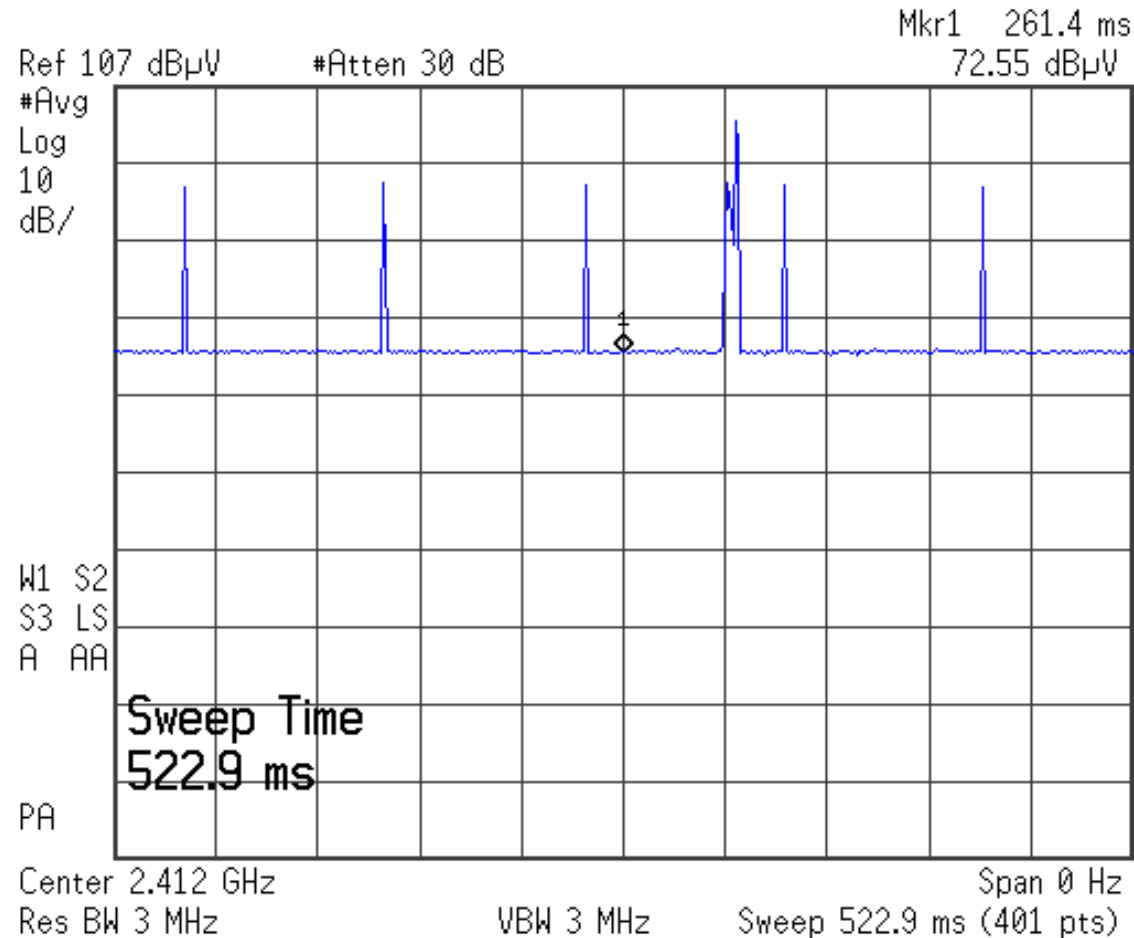


# WLAN: Signalstruktur im Zeitbereich (Beacon)



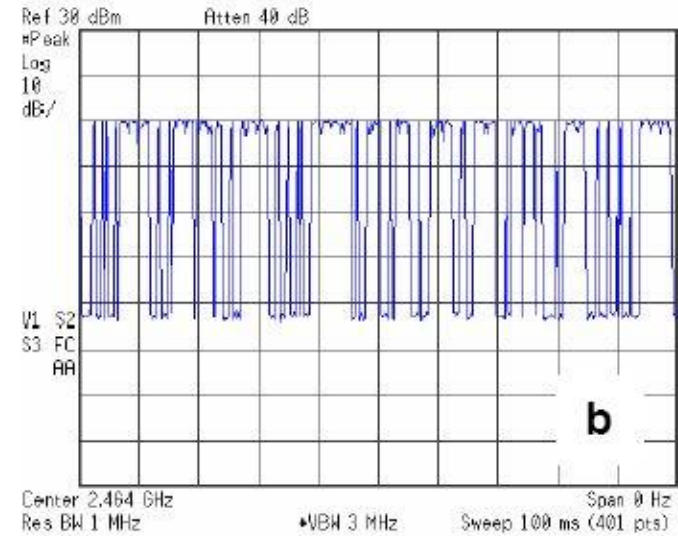
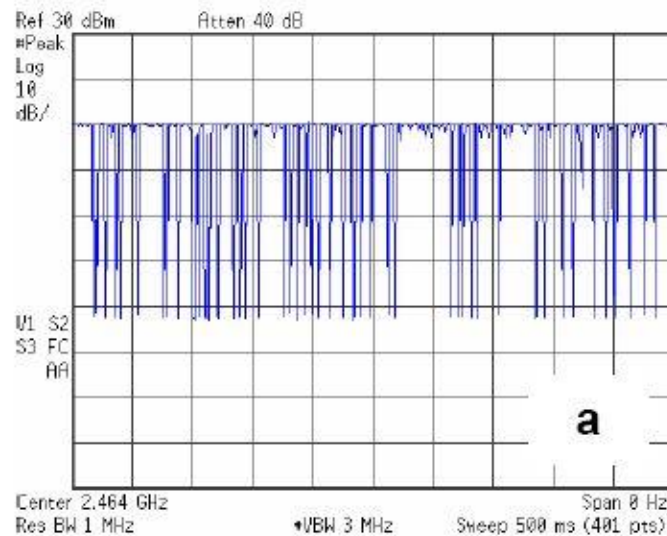
- Pulsdauer: Hier ca. 0,25 ms (Kann aber auch größer sein; z.B. 1...2 ms)
- Periodendauer: 100 ms
- Tastverhältnis ("Duty Cycle"): Hier: 400:1
- Korrekturfaktor für mittlere Feldstärke ("minimale Exposition"): Hier:  $K = -26$  dB
- RMS-Detektion notwendig!

# WLAN: Beacon mit Antwort vom Client





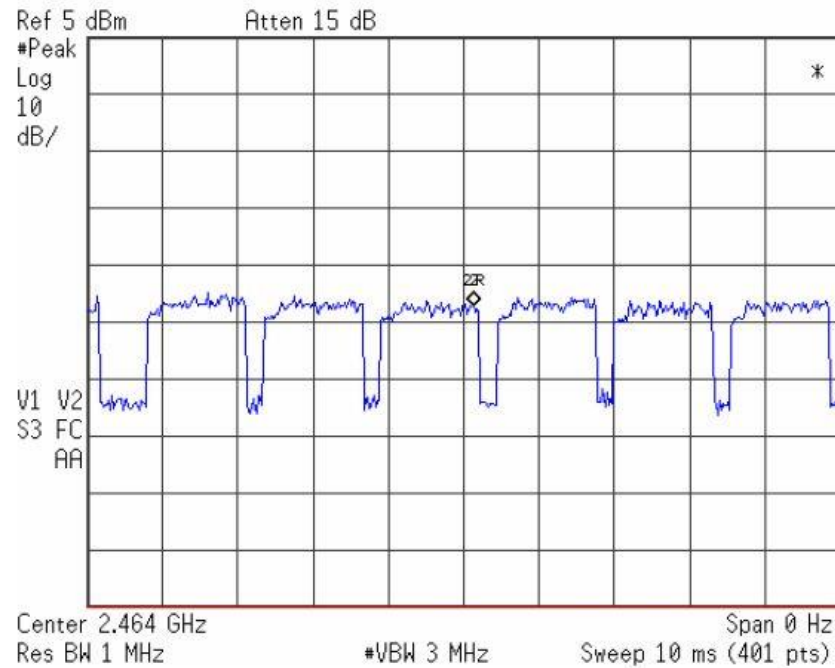
# WLAN: Signalverlauf bei 50 % Duty Cycle



Entsteht bei einer Übertragung unter Vollast von Client 1 über den Accesspoint zu Client 2.

- Tastverhältnis: 2:1  
→ Korrekturfaktor für mittlere Immission:  $K = -3 \text{ dB}$

# WLAN: Signalverlauf bei max. Duty Cycle



Entsteht bei einer Übertragung unter Vollast von Client 1 leitungsgebunden zum Accesspoint und von dort drahtlos zu Client 2.

- Tastverhältnis: 1,11:1 (90%)  
→ Korrekturfaktor für die theoretisch größte mittlere Immission:  $K = -0,5 \text{ dB}$

# WLAN: Einstellungen

<b>Grundprinzip:</b>	Messe die Feldstärke, die durch die Beaconimpulse erzeugt wird. Anschließend Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung
<b>RBW:</b>	20 MHz
<b>Detektor:</b>	RMS
<b>Bereich:</b>	Messung im Zeitbereich!! (langsamer Aufbau des Spektrums)
<b>Sweep time:</b>	100 bis 200 ms
<b>Minimalexposition:</b>	Messwert [dB $\mu$ V/m] - 10·log (Periodendauer/Beacondauer)
<b>Maximalexpo.:</b>	Messwert [dB $\mu$ V/m] - 0,5 dB



# 5. Typische Messergebnisse und Einflussfaktoren für die Immission (BS)

- EMF-Messung (Mobilfunk) 2022, (*Studie für die Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin, 2022*)
- Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF-EMF-Expositionsbestimmung, (*Studie für das Bundesamt für Strahlenschutz (Vorhaben 3619S82463), 2022*)
- Feldmessungen im Umfeld von LTE- / 5G-Mobilfunksendeanlagen (*2 Studien IMST GmbH / RWTH Aachen für das Landesamt für Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 2012-2013 / 2022*)
- Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken (*Studie IMST GmbH für das BfS, 2011-2012*)
- LTE auf dem Prüfstand - Bundesweite Mobilfunk-Messreihe (*Studie IMST GmbH für das IZMF, 2012*)



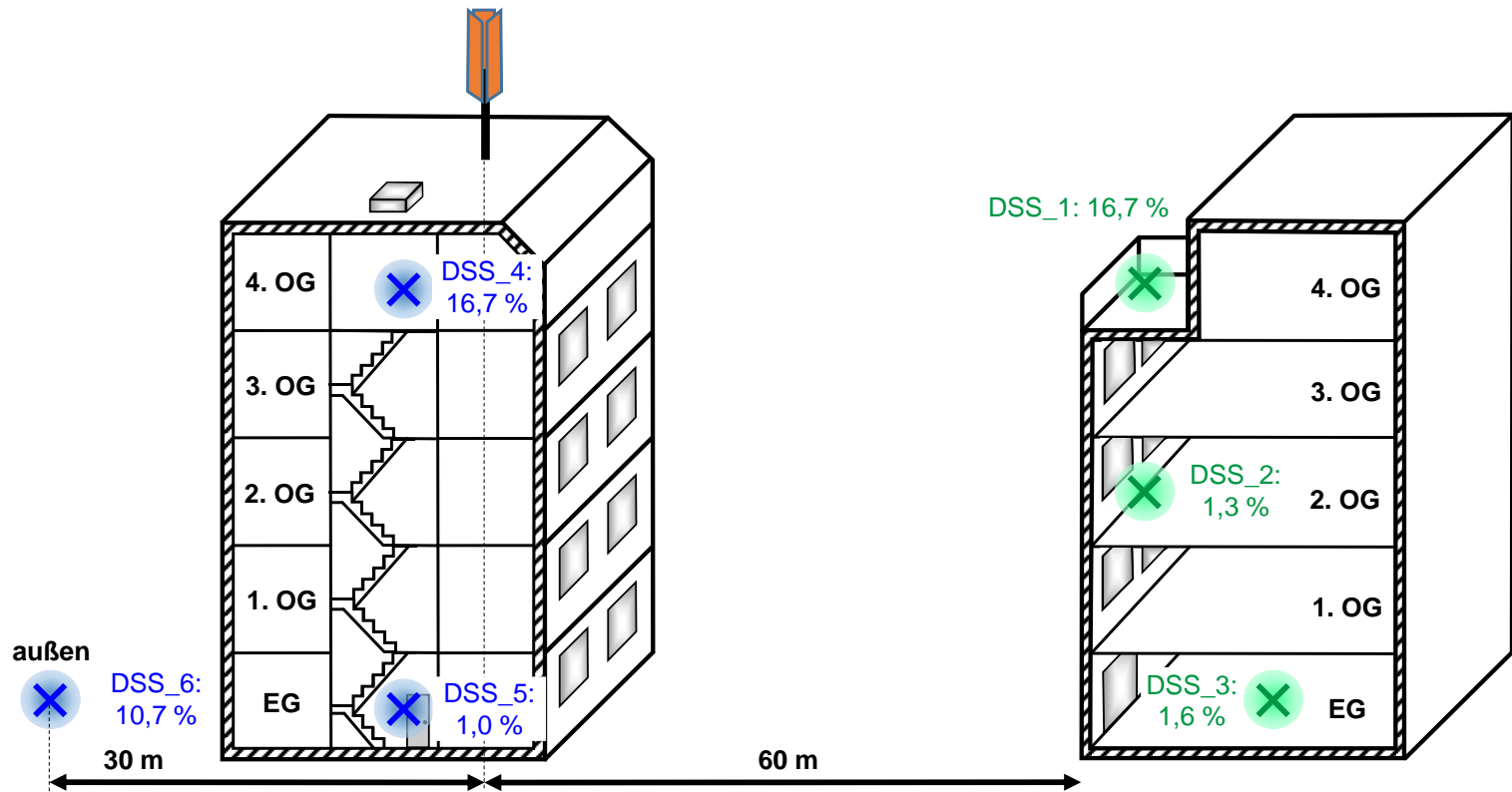
# Messergebnisse (Messung für SenWEB Berlin, 2022)

## Untersuchte Anlage 1 (GSM, LTE, 5G)



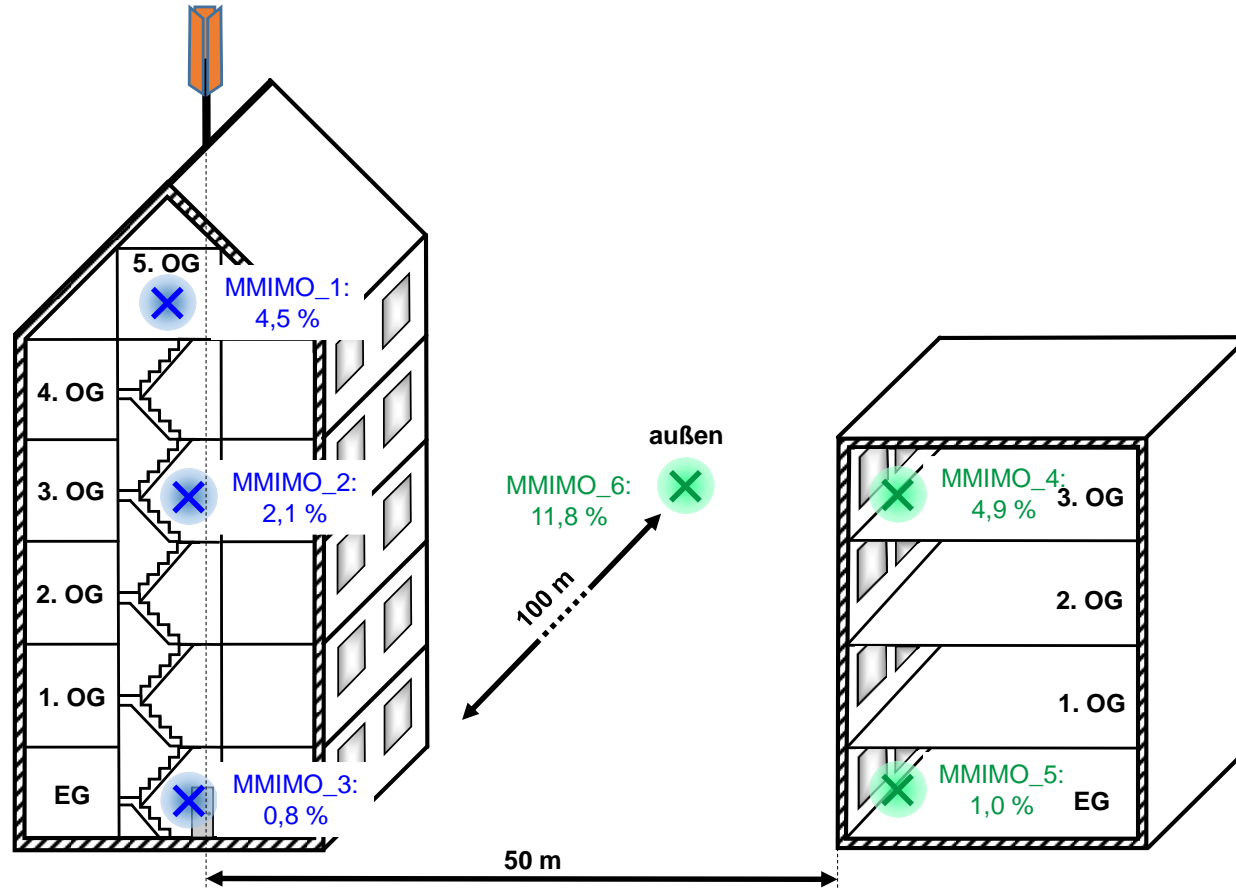
# Anlage 1 (Messung für SenWEB Berlin, 2022)

## Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte

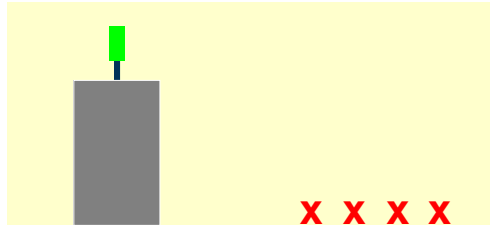


# Anlage 2 (Messung für SenWEB Berlin, 2022)

## Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte



# Untersuchung von Szenarien



Wie verhalten sich die Immissionen bei verschiedenen Abständen zur Anlage?



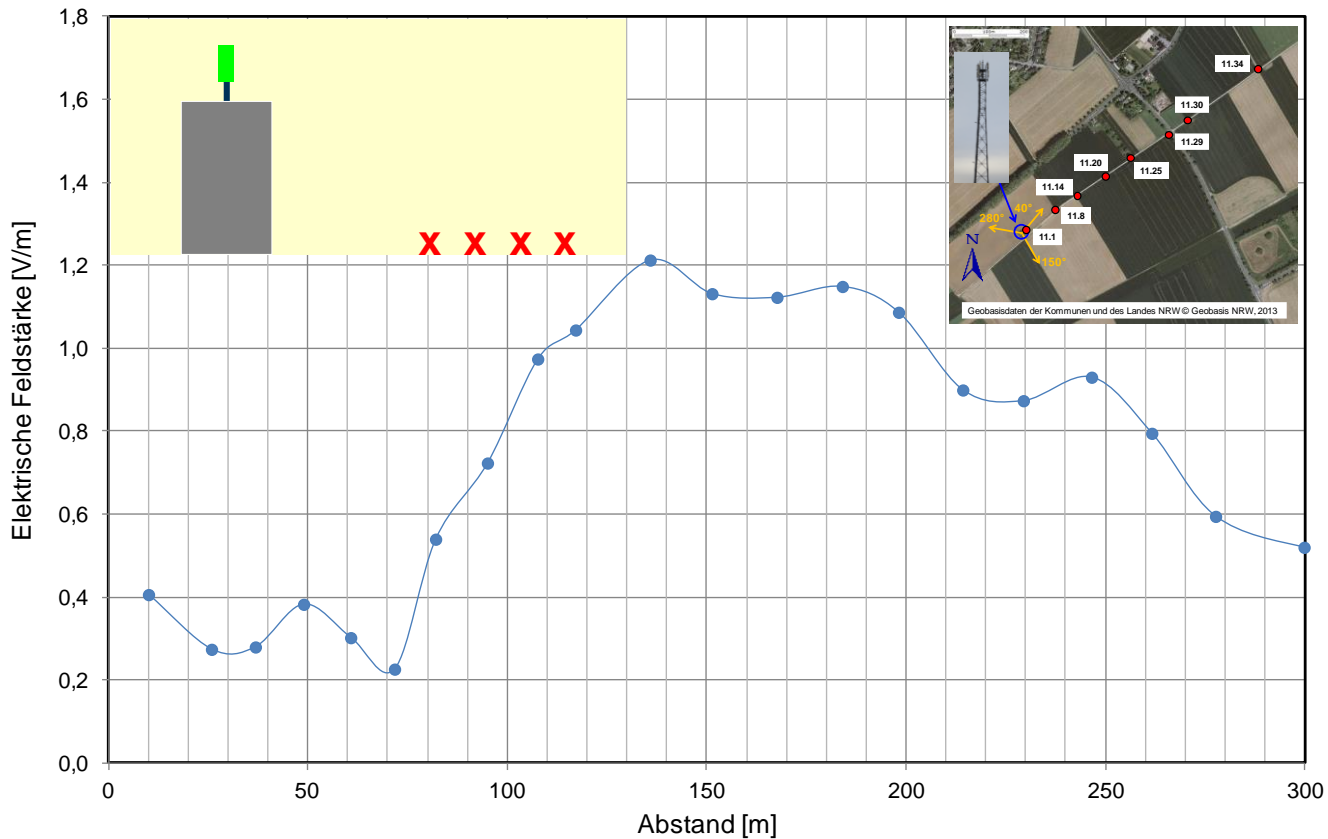
Wie verteilen sich die Immissionen in einem gegenüberliegenden Gebäude über verschiedene Stockwerke?



Wie verteilen sich die Immissionen unter der Anlage in verschiedenen Stockwerken?

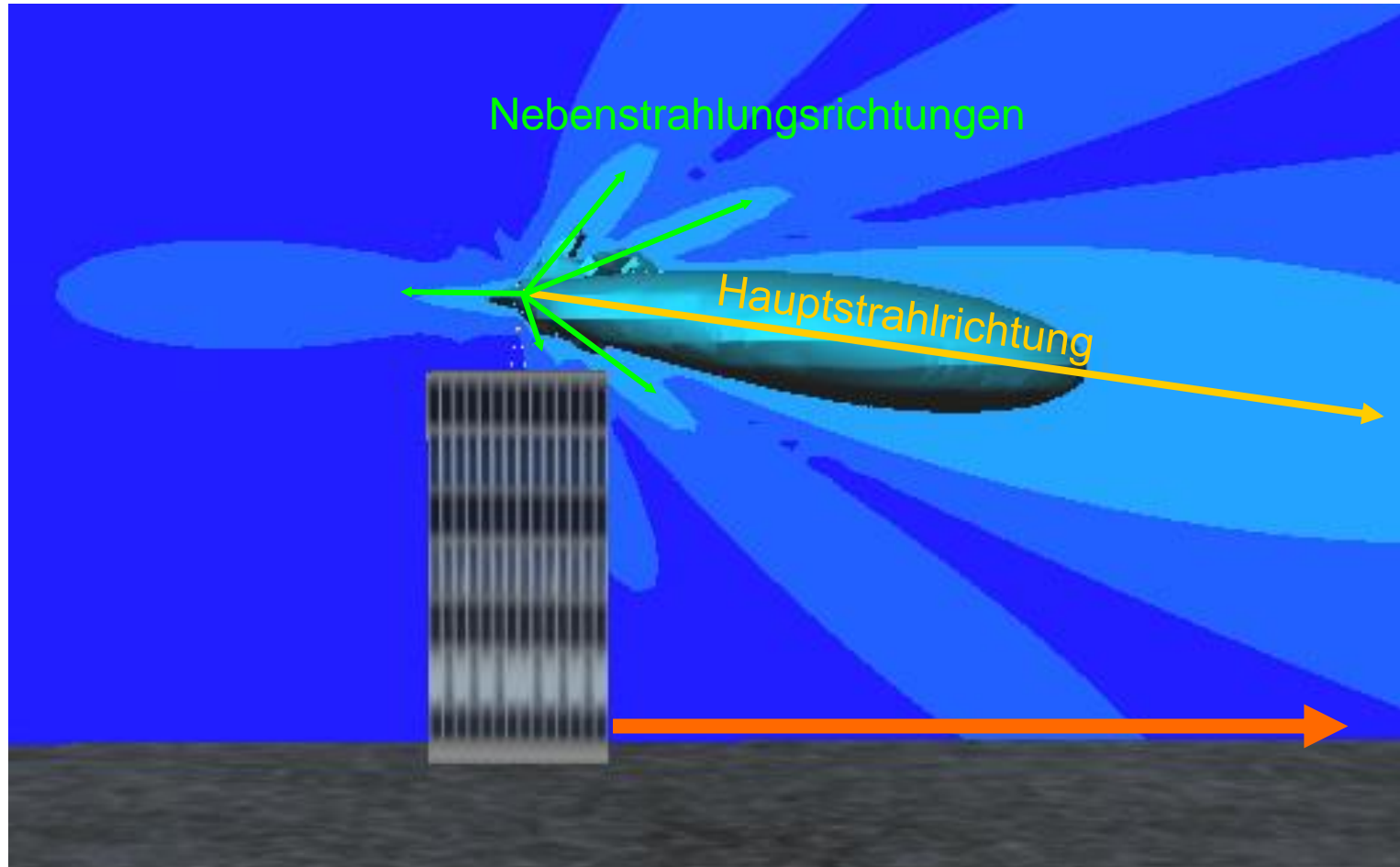


# Abstandsverlauf (Studie IMST für LANUV, 2013)

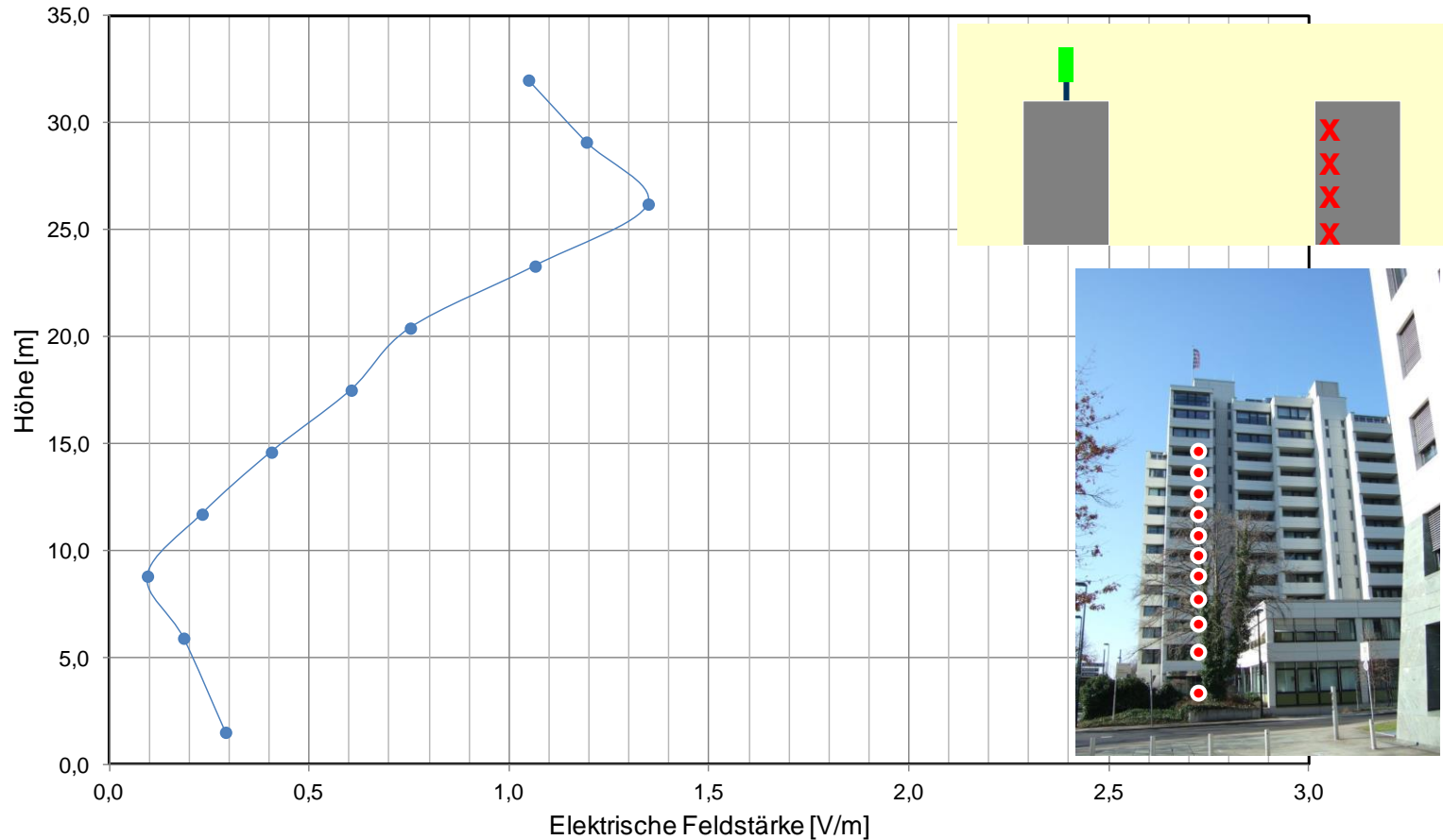


→ Im Nahbereich ist der Abstand kein geeignetes Kriterium zur Abschätzung der Immissionen!

# Erklärung Abstandsverlauf

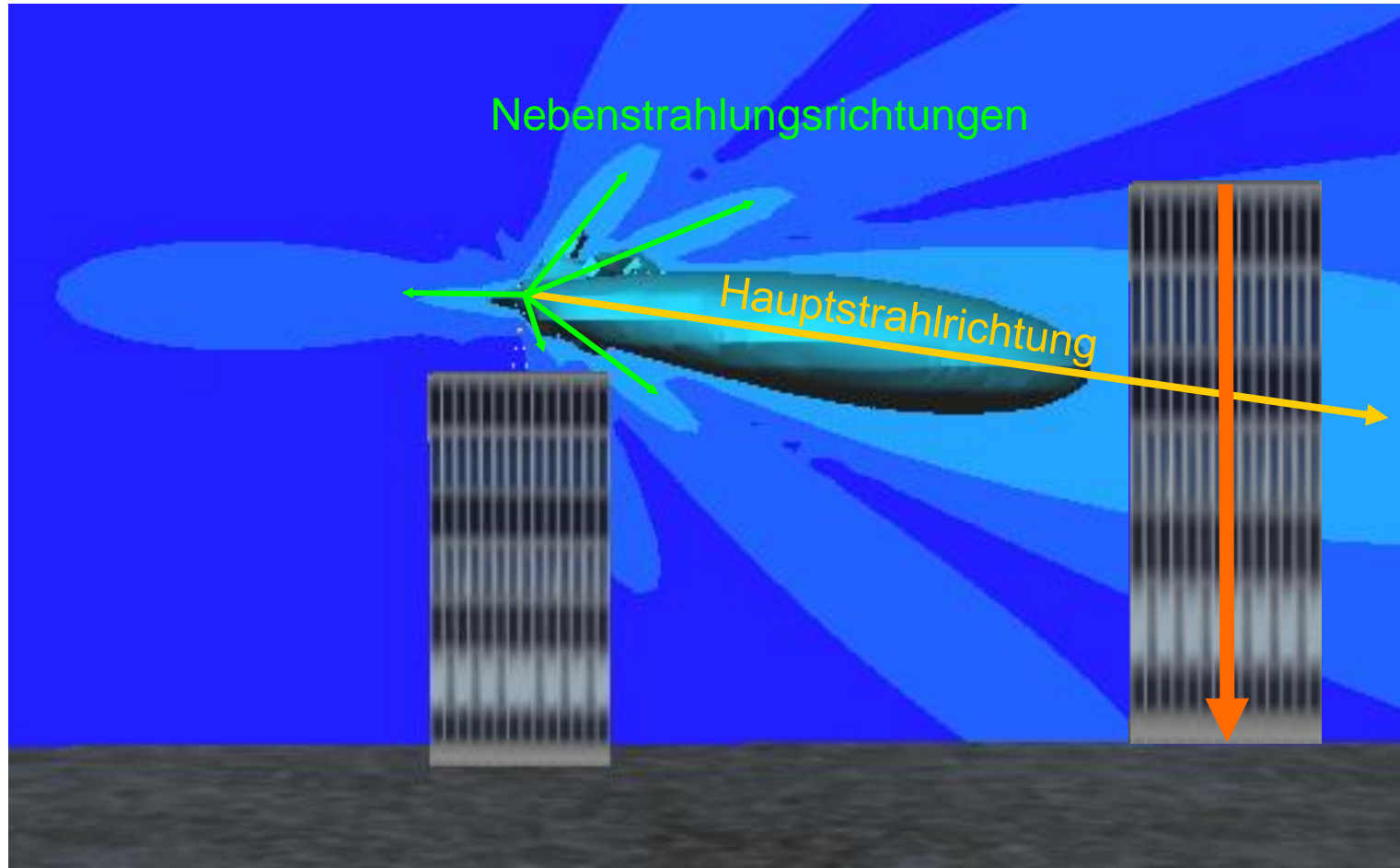


# Höhenabhängigkeit (Studie IMST für LANUV, 2013)

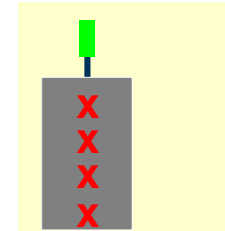
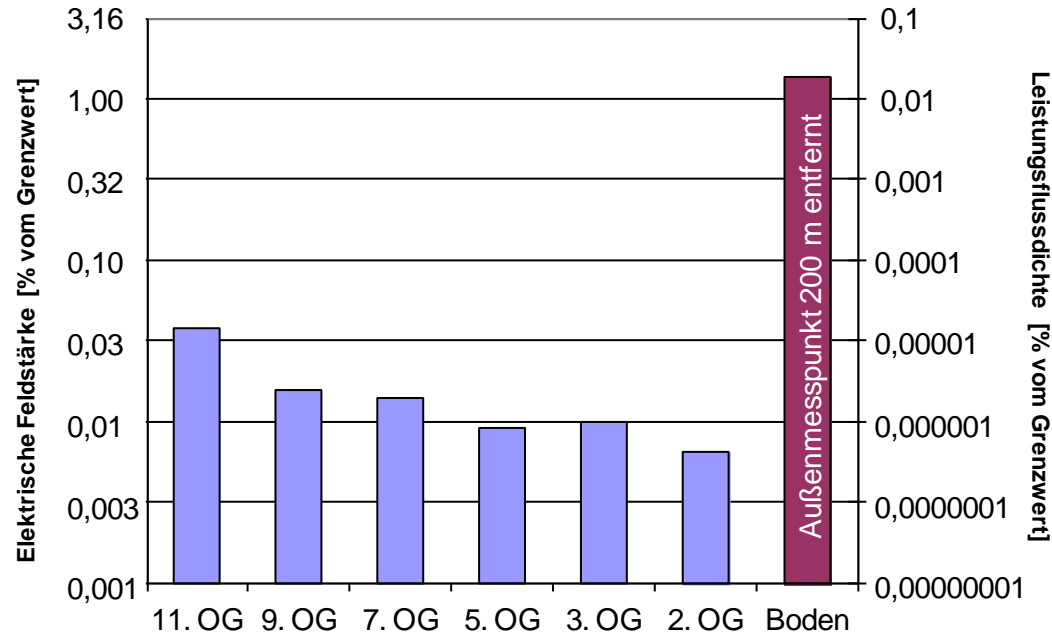


→ Immissionsabnahme in Richtung Erdgeschoss

# Erklärung Höhenverlauf

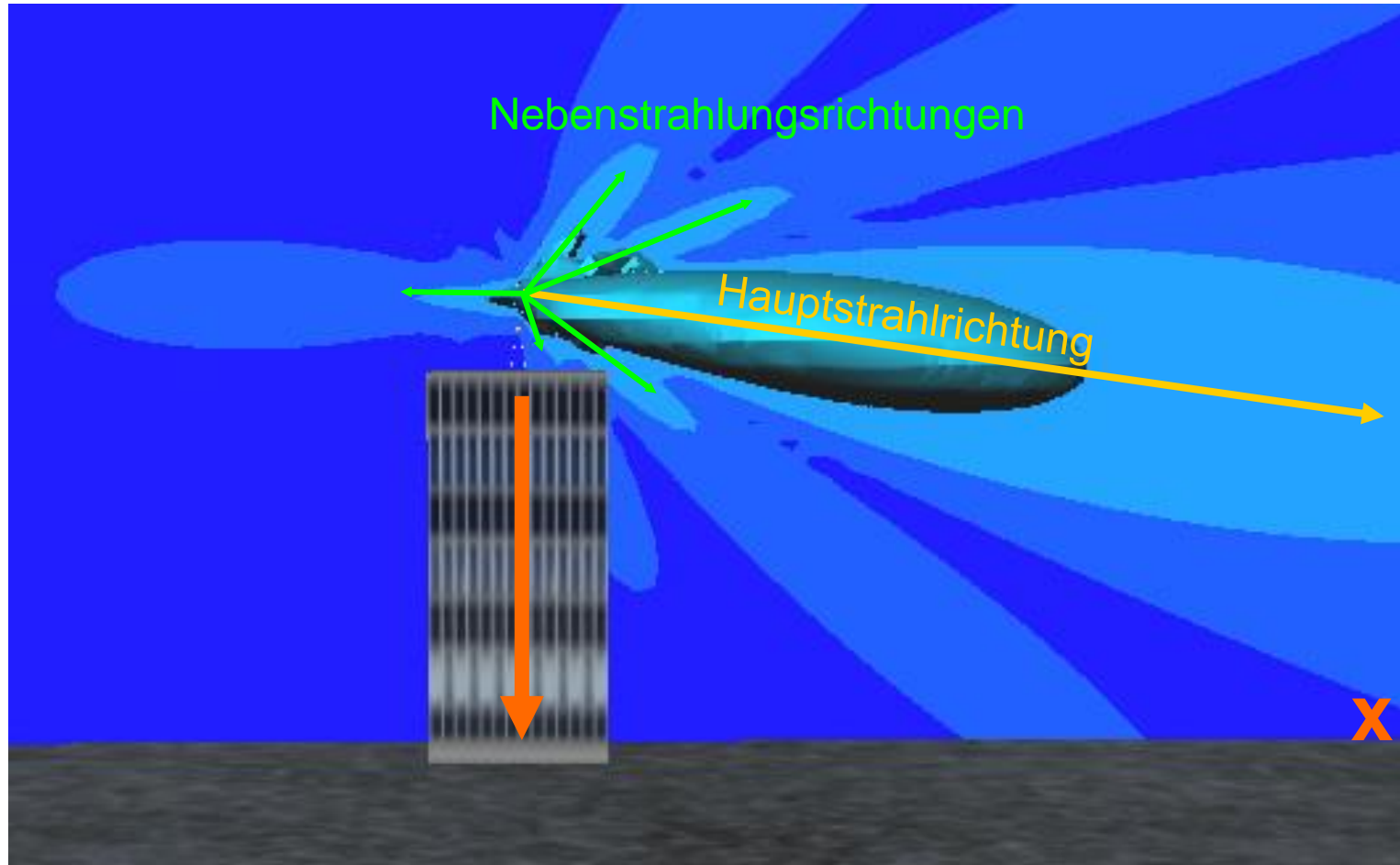


# Dämpfung durch Gebäude (Studie IMST für IZMF)

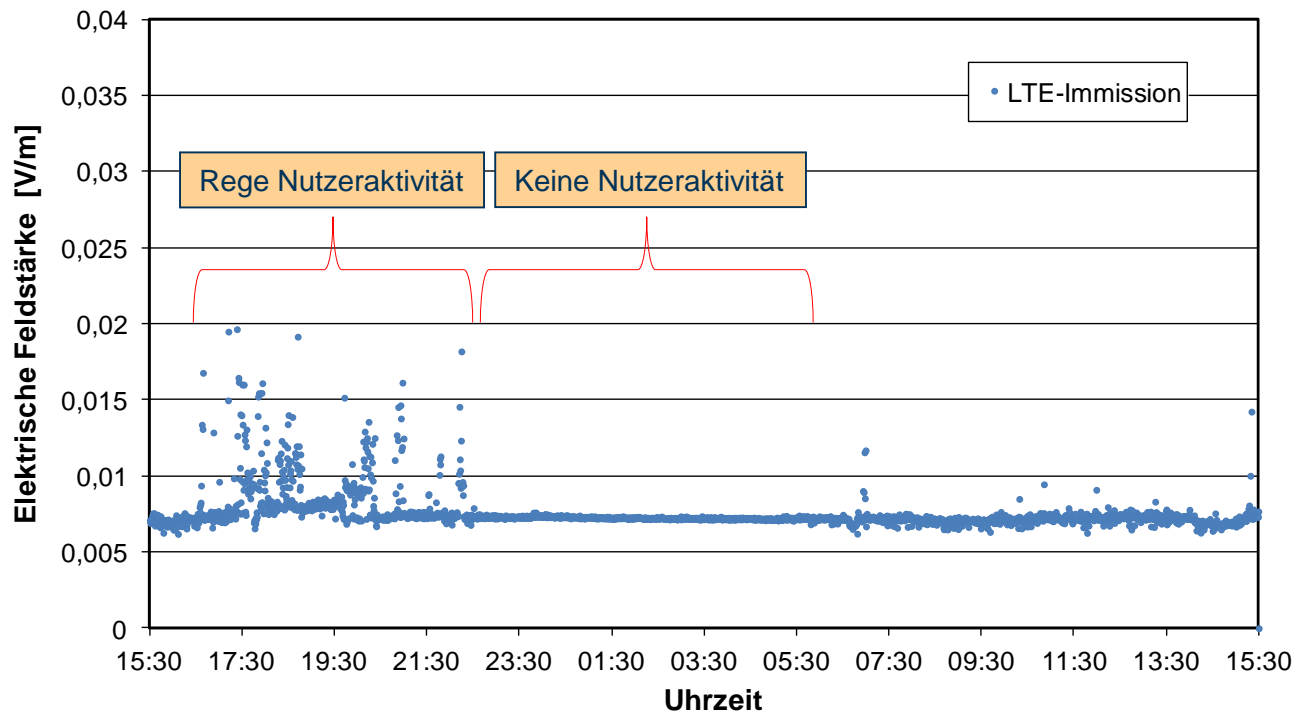


→ Immissionsabnahme Richtung Erdgeschoss durch Deckendämpfung; Messwert an dem 200 m entfernten Außenmesspunkt am größten

# Erklärung Verlauf im Anlagengebäude



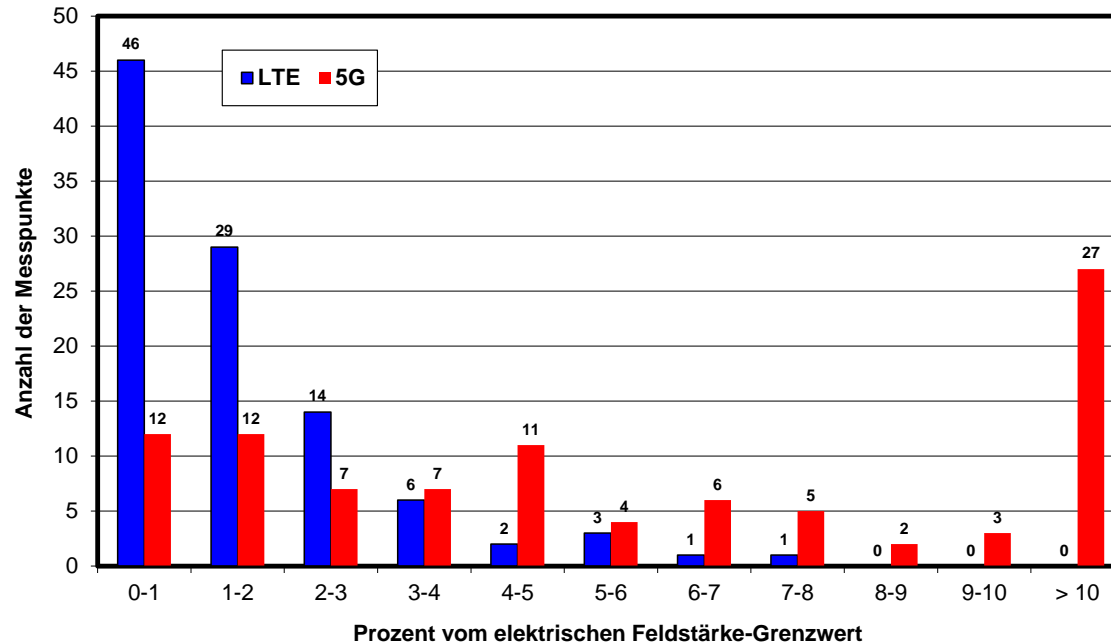
# Langzeitmessungen (IZMF-Studie)



- 380 m Abstand zur Anlage
- Sichtverbindung
- LTE-800 Anlage (Dig. Dividende)
- Alle 30 Sekunden ein Messwert (Momentanwert!)

→ Immissionen unterliegen tageszeitlichen Schwankungen  
→ Größte Nutzeraktivität am späten Nachmittag / Abend

# 5G mMIMO-Immissionen im Vergleich zu LTE (BfS-Studie 2022)

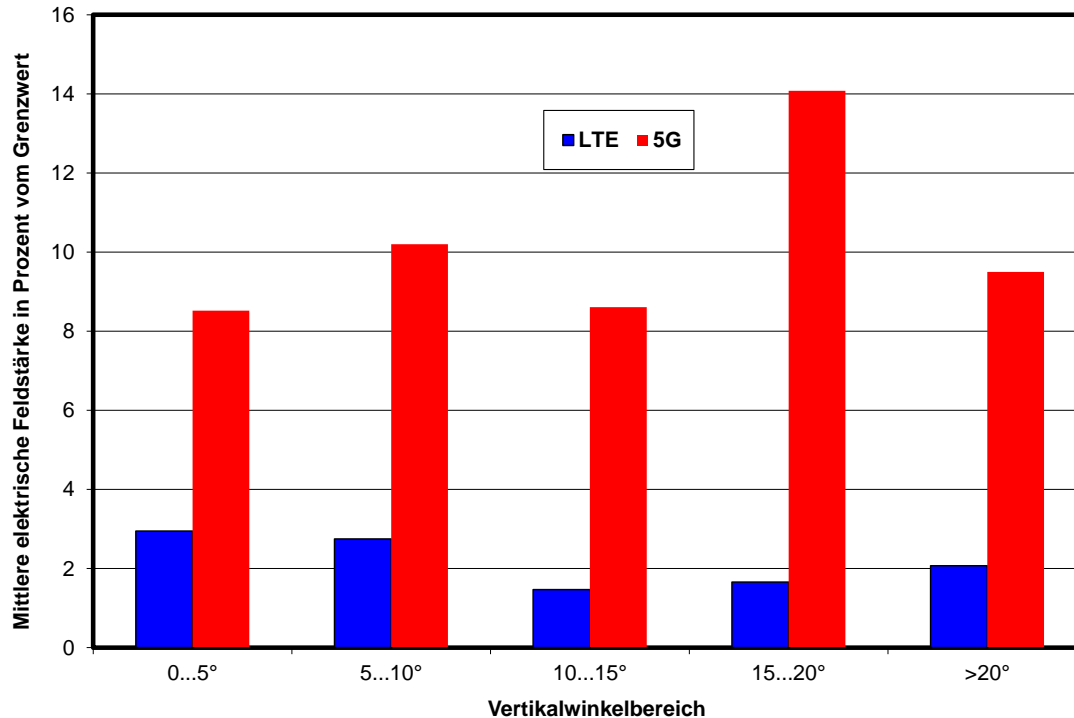


- 5G: 96 MP, aktuelle Studie 2022; LTE: 102 MP, Studie für BfS 2013
- Maximalwert 5G: 28,9%E; Maximalwert LTE: 7,3%E
- 5G-Verteilung gegenüber LTE zu höheren Grenzwert-ausschöpfungen verschoben
- Bezüglich Median ist 5G um 13 dB höher (5G: 4,7%E; LTE: 1,1%E)
- Begründung: 5G hat höhere Signalbandbreite und höheren Antennengewinn



# 5G mMIMO-Immissionen im Vergleich zu LTE

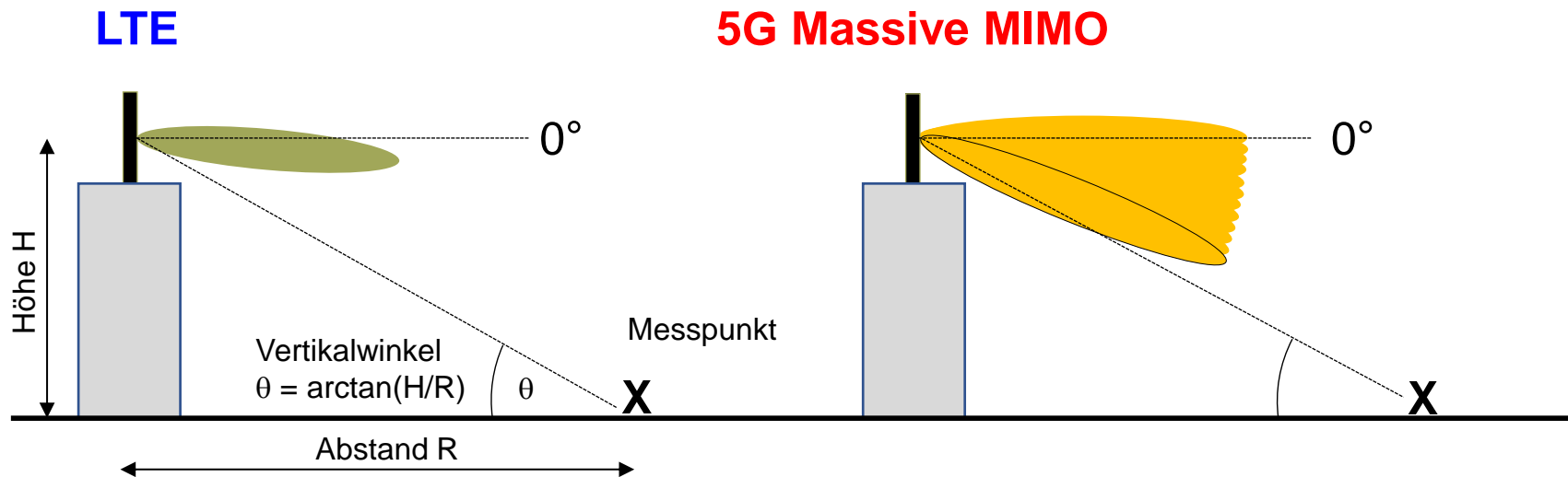
## Einfluss des Vertikalwinkels (BfS-Studie 2022)



- LTE: Maximale Immission bei Vertikalwinkeln im Bereich typischer Downtiltwinkel ( $0^\circ \dots 10^\circ$ )
- 5G: Maximale Immission bei deutlich größeren Vertikalwinkeln
- Erklärung: nächste Folie

# 5G mMIMO-Immissionen im Vergleich zu LTE

## Erklärung Vertikalwinkel (BfS-Studie 2022)



- LTE: Downtilt nach unten begrenzt
- 5G: Beamsteering auch in Vertikalebene; Antenne kann „weiter nach unten strahlen“ als bei LTE
- Punkte näher an Anlage haben höheren Vertikalwinkel und höhere Immission (geringere Pfaddämpfung)

# 5G Immissionen: Maximal, typisch, aktuell

(BfS-Studie 2022)

	Mittelwert	Unterschied zur akt. Immission	Median	Unterschied zur akt. Immission
	[%]	[dB]	[%]	[dB]
aktuelle Immission	0,21	-	0,09	-
typische Immission	0,44	6,4	0,20	8,0
Maximalimmission	9,33	33,0	4,71	35,4

- Maximalimmission: Messung mit erzwungener Last
- Typische Immission: Stream eines Fernsehprogramms auf ein 5G-Endgerät am Messpunkt
- Aktuelle Immission: Messung ohne Endgerät

- 35 dB zwischen Maximal- und aktueller Immission: sehr geringer Anteil der Signalisierungsleistung an der Maximalleistung (hier: < 0,1%, im Vergleich zu 25-100% GSM, 10-20% UMTS, 10-25% LTE)
- Geringer Unterschied zwischen aktueller und typischer Immission (8 dB) im Vergleich zur Maximalimmission (35 dB): Ein Endgerät mit Livestream lastet 5G-Station nur sehr gering aus



# Immissionsvergleich Basisstation - Endgerät (LANUV-Studie 5G)

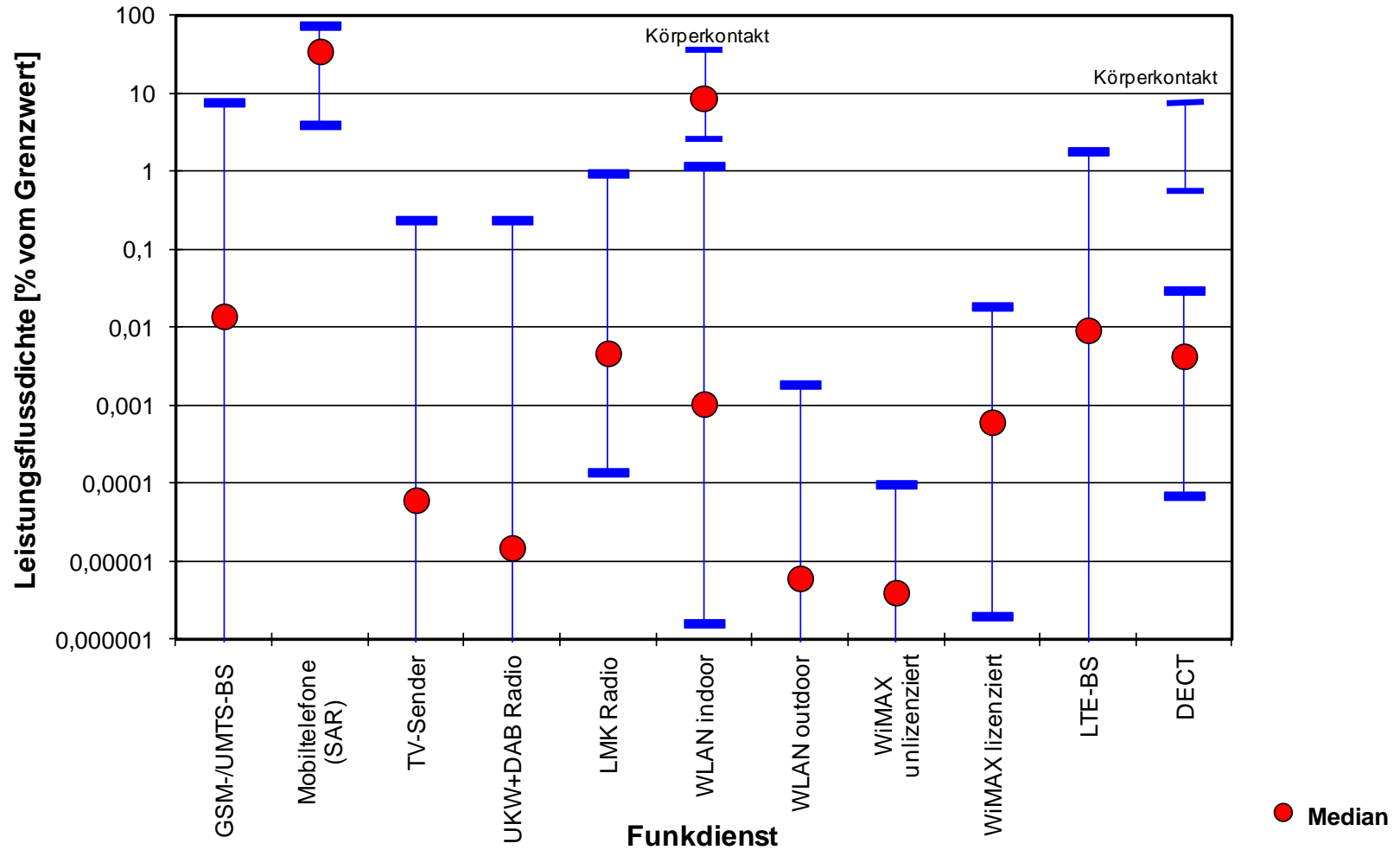


5G-Endgerät (Smartphone Samsung S20+ 5G)							
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	Abstand in [m]						
	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Medianwert	8,8	5,1	3,0	1,7	1,4	1,2	0,9

Basisstationen (aus Kapitel 3)	
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	5G
Medianwert	3,4

- Im Mittel werden in Abständen von etwa 1 m vom 5G-Endgerät vergleichbare Immissionen erreicht wie im Umfeld von Basisstationen
- Bei kürzeren Abständen überwiegen die Immissionen vom Endgerät

# Immissionsquellen im Vergleich

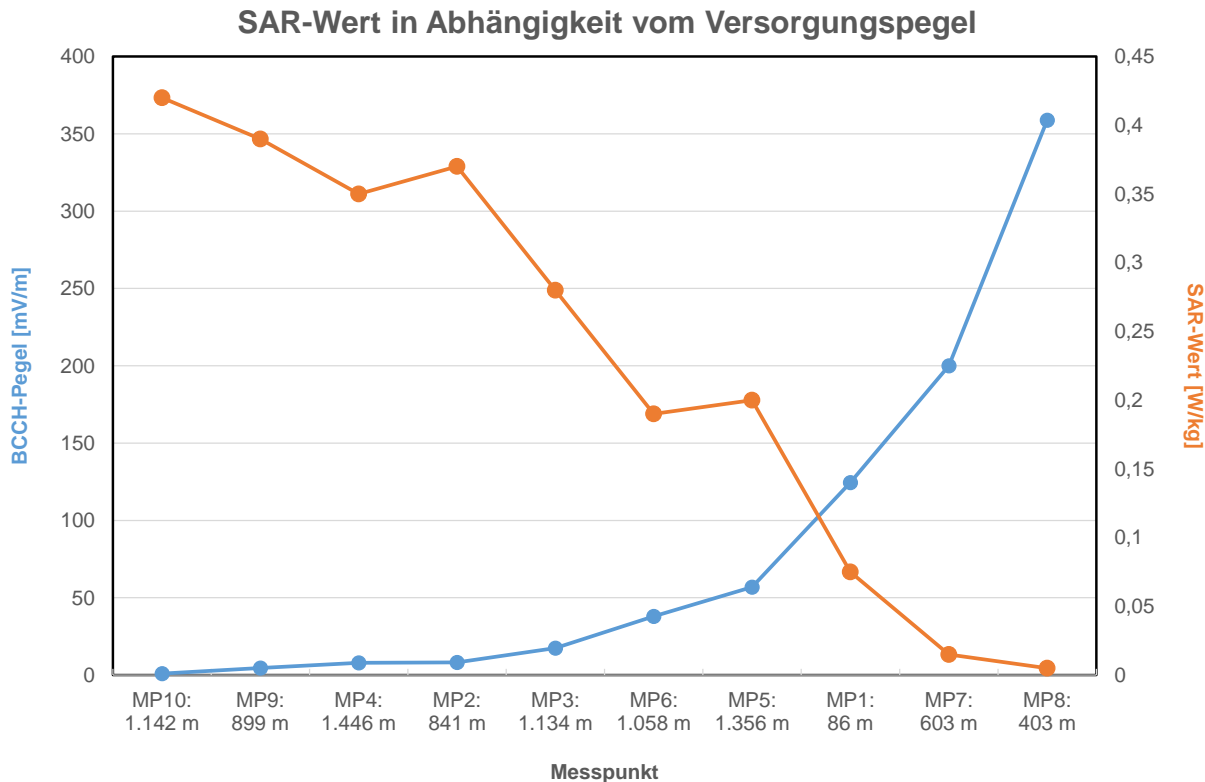


# Zusammenhang Versorgungspegel und Sendeleistung Handy bei GSM



- Untersuchung Zusammenhang Sendeleistung Handy und Versorgungsqualität
- Sendeleistung Handy: Messung SAR am Kunstkopf
- Versorgungsqualität: Messung BCCH-Pegel der versorgenden Basisstation

# Ergebnisse



- bei schlechter Versorgung regelt Handy Sendeleistung hoch
- da Handy Hauptquelle der persönlichen Exposition, ist ein gut ausgebautes Mobilfunknetz eine Maßnahme zur Minimierung der Gesamtimmission

# Zusammenfassung Messergebnisse und Einflussfaktoren

- In der Regel werden durch Mobilfunk-Basisstationen nur Bruchteile des Grenzwertes ausgeschöpft
- Folgende Erkenntnisse über Feldverteilung sind *typisch*:
  - Entfernung als maßgeblicher Faktor ungeeignet ("Schutzabstand"!)
  - Orientierung zur Hauptstrahlrichtung ist entscheidend
  - Gebäudedämpfung reduziert Immission maßgeblich
- Langzeitmessung zeigt Auslastungs-Schwankungen
  - nachts vergleichsweise geringe Immission
- Verhältnis Mobilfunk- zu anderen HF-Immissionen (Rundfunk, TV, DECT) von konkreter Situation abhängig
  - Hauptquelle der individuellen Exposition sind körpernahe/Körperkontakt-Geräte

