

**Entwicklung von Mess- und  
Berechnungsverfahren zur Ermittlung der  
Exposition der Bevölkerung durch  
elektromagnetische Felder in der Umgebung  
von Mobilfunk-Basisstationen**

*- Die Verfahren sollen zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein -*

**Dr. Christian Bornkessel, Markus Schubert  
IMST GmbH, Kamp-Lintfort  
bornkessel@imst.de**

# Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messreihen?

## FMK: Mobilfunkfelder liegen weit unter Grenzwerten Internationale Messreihen zeigen einheitliche Ergebnisse

Wien (pts, 29. Jul 2004) – Die elektromagnetischen Felder von Mobilfunkanlagen liegen weit unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte. Zu diesem übereinstimmenden Ergebnis kommen aktuelle Messreihen in Österreich, Deutschland, Großbritannien und der Schweiz.

D, TÜV/IZMF Hessen:	maximal <b>1,3 %</b> des gültigen Grenzwertes
GB, NRPB:	fast durchweg weniger als <b>0,1 %</b> vom Grenzwert
A, Steiermark:	höchster gemessener Wert <b>0,028 %</b> vom Grenzwert
D, Berlin:	maximal <b>15,6 %</b> , durchschnittlich <b>4,8 %</b> vom Grenzwert



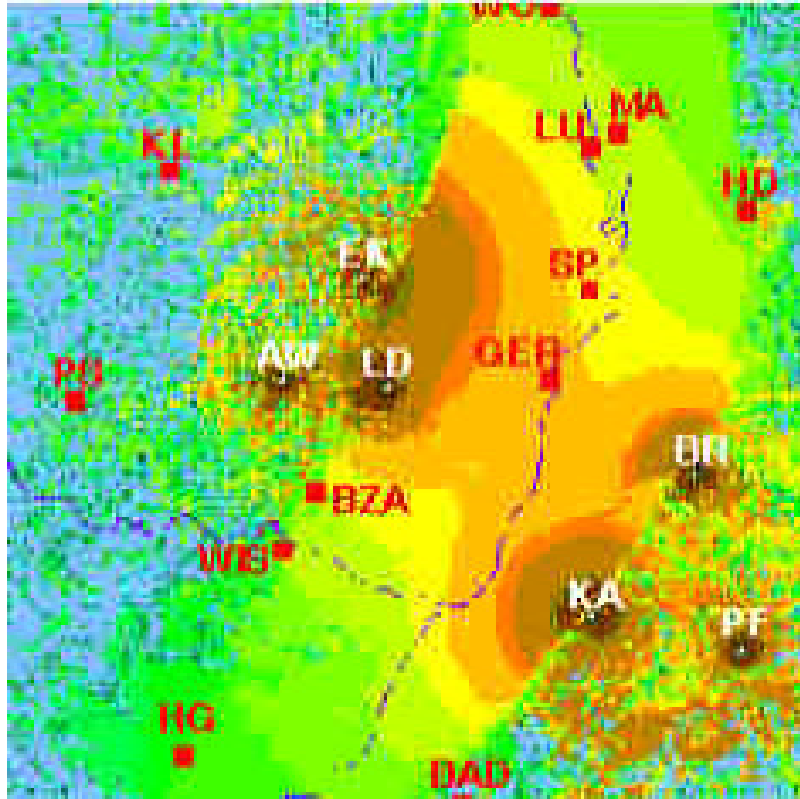
- Kann man den Werten trauen?
- Wird mit unterschiedlicher Leistung gesendet?
- Wo lagen die Messpunkte?
- Wie wurde gemessen?

# Projektgliederung

- Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren
- Analyse der Immissionsverteilung
- Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren

# Motivation Berechnungsverfahren

## Funknetzplanung



Unterschätzung / Mittelwerte

## RegTP Standortbescheinigung

**RegTP**   
Regulierungsbehörde für  
Telekommunikation und Post

**Außenstelle Meitmann**

Reg. TP - Außenstelle Meitmann / FV 11.11.11.11.11

Firma  
DeTeMobil  
Deutsche Telekom MobilNet GmbH  
Postfach 30 00 25  
50773 Köln

Im Zeichen, Ihre Reichweite vom: Max. Distanz, maximal Reichweite vom:  $\Sigma$  (2.1) 06: 13.05.2000  
VFZ-2 B 4741 12 1007 03 99 05 94-252 oder 95 94-0

**Standortbescheinigung**

Gemäß § 59 TKG in Verbindung mit § 8 TKZuV wird für die beantragte(n) 1 ortsfeste(n) Sendefunkanlage(n) die Einhaltung der derzeit gültigen Personenschutzgrenzwerte bescheinigt.

Diese ortsfeste(n) Sendefunkanlage(n) befinden sich am Standort:

(Ortsfestlegung nach Antragsunterlagen, P.L. Ort, Betriebsanweisung)  
Für diesen Standort wird ein Sicherheitsabstand festgelegt:  
**0,96 m worst case: BF(SrF, 2, 3)**  
Betriebs(B) u. Sektoren(S) s. bei. Zeichnung als Anhang zur Anlage

Dieser Sicherheitsabstand berücksichtigt die Feldstärken aller sich am Standort befindlichen Funksysteme unter Einbeziehung umliegender ortsfester Sendefunkanlagen (soweit deren Feldstärken für die Festlegung des Sicherheitsabstandes relevant sind).

Die festgelegte(n) Sicherheitsabstand bzw. Sicherheitsabstände ist/sind auf die Unterteile der Sendeleistung mit der jeweils geringsten Montagehöhe bezogen. Bei Einhaltung des festgelegten Sicherheitsabstandes, sind die dem Standortbescheinigungsverfahren zugrunde gelegten Grenzwertanforderungen erfüllt.

Nach den derzeitigen wissenschaftlich anerkannten Grenzwerten, die den heutigen Stand von Forschung und Technik darstellen, kann von keiner Gesundheitsgefährdung ausgegangen werden.

Diese Bescheinigung erlischt, wenn sich entweder die technischen Daten (Antrag) oder die Grenzwertanforderungen ändern.

Im Auftrag  

siehe Tabelle Zusammenfassung

Bestandteil	Technik	Stärke	Kategorie	Außenstelle
Sendeleistung	22.20 W/100 W	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann
Antennengewinn	2 dBi	2000	Sendeleistung	Meitmann

Worst Case / Überschätzung

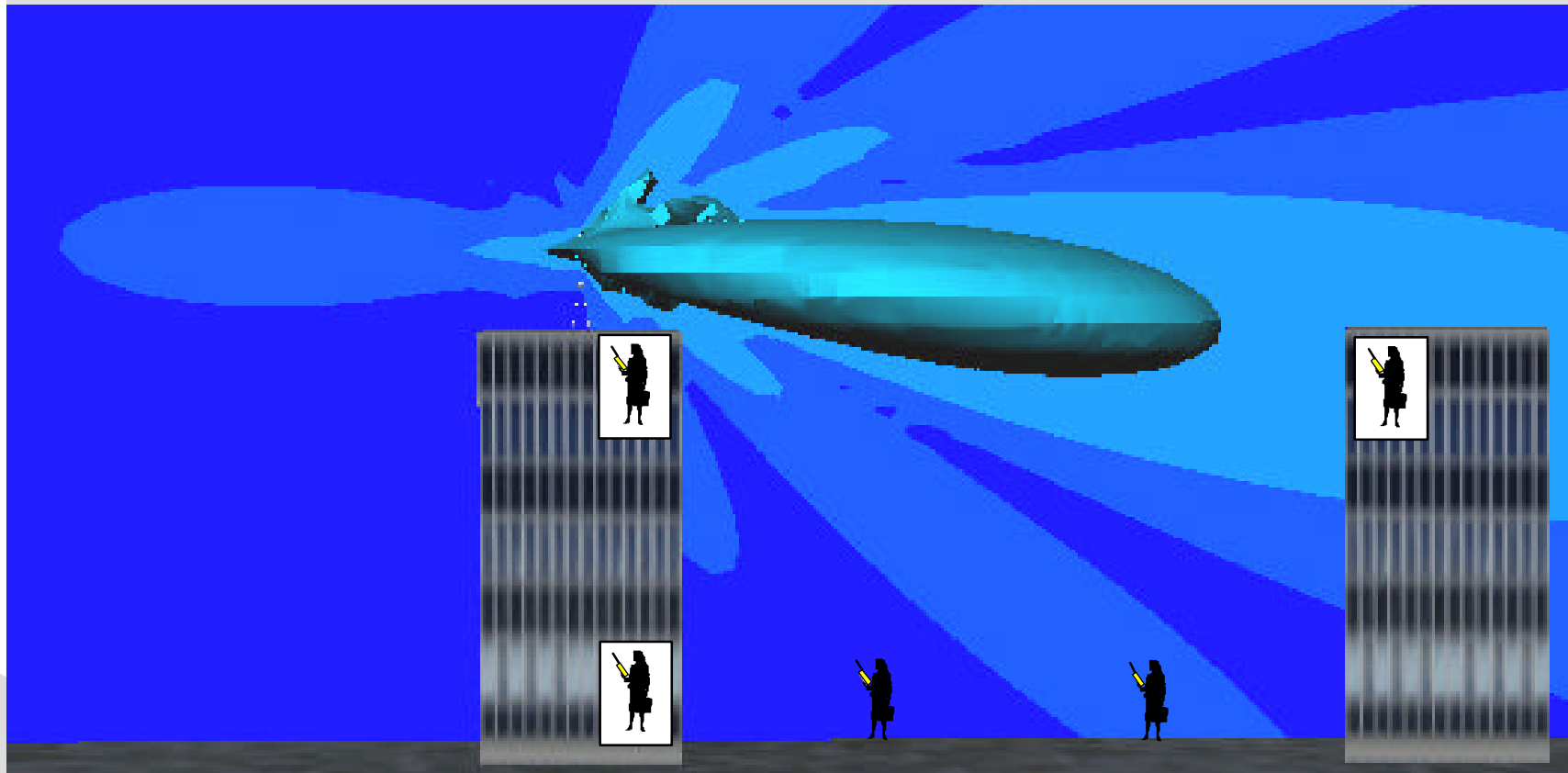
# Großskalige örtliche Immissionsvariation

## Anlagenbezogene Faktoren:

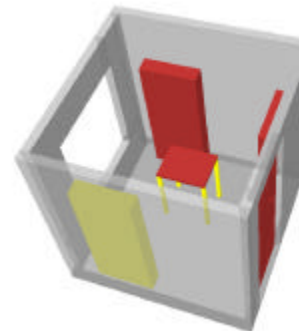
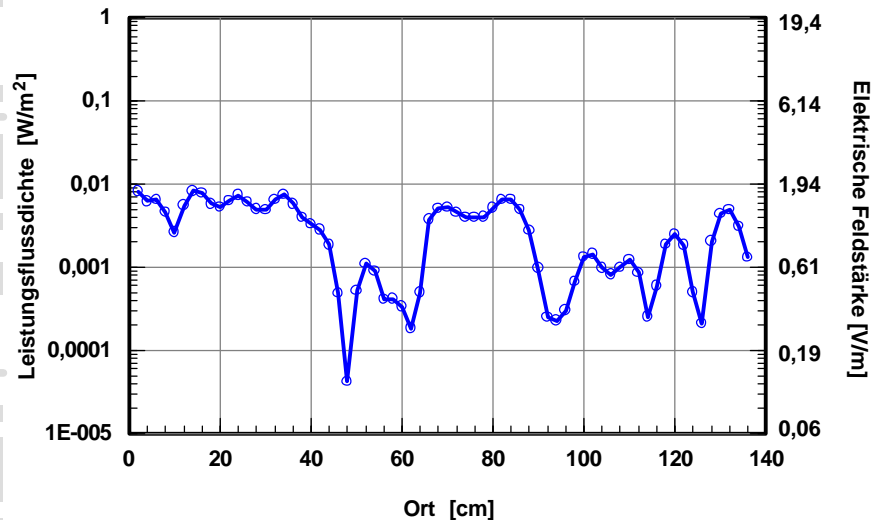
- Sendeleistung
- Höhe
- Antennentyp und Ausrichtung
- Downtilt

## Immissionsortbezogene Faktoren:

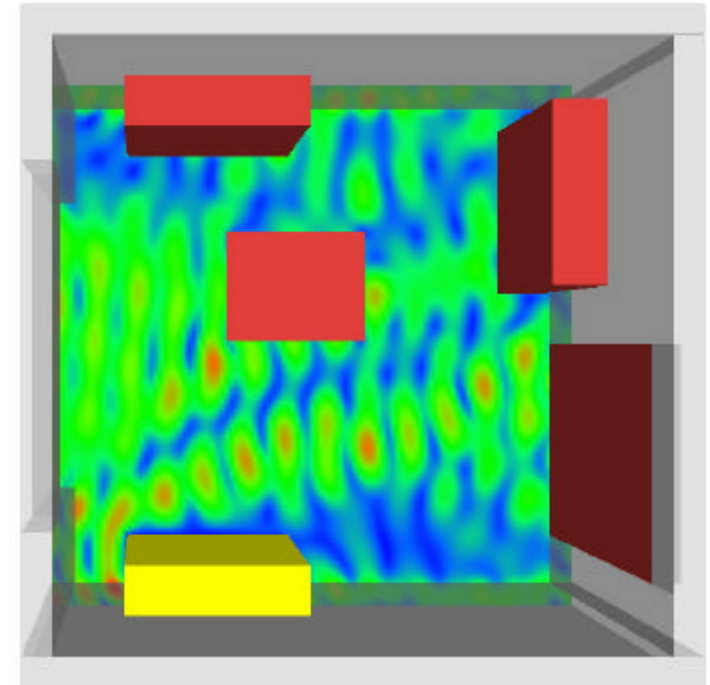
- Abstand
- Höhe
- Horizontale Ausrichtung
- Gebäudedämpfung/Sichthindernisse



# Kleinskalige örtliche Immissionsvariation

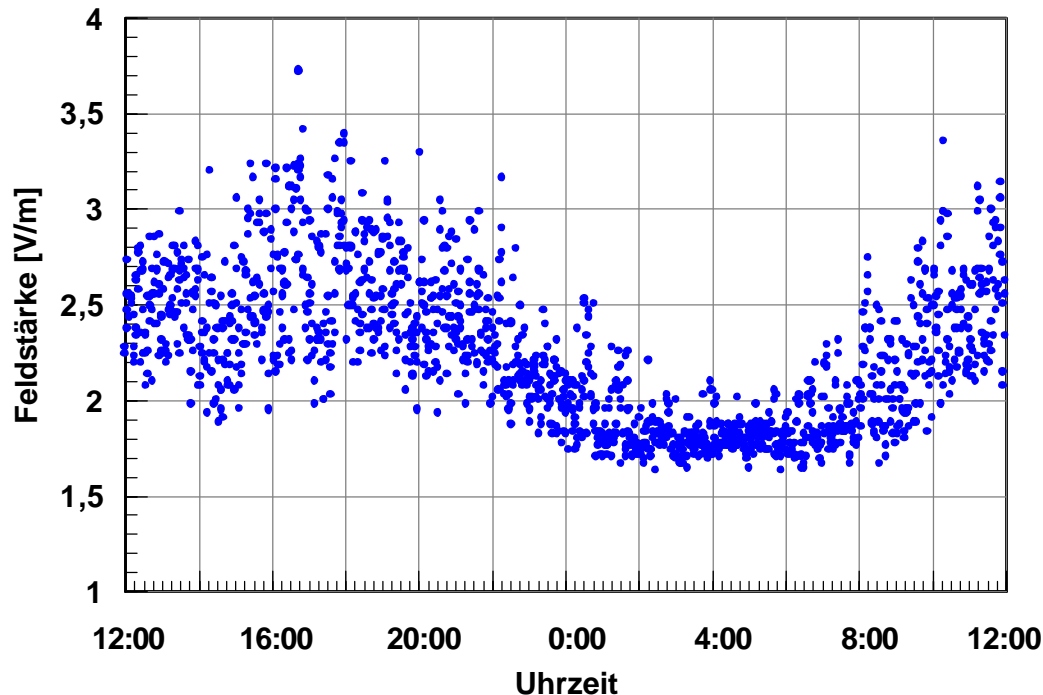


Simulation: GSM 900



- Kleinskalige Schwankungen (fast fading) vor allem innerhalb von Räumen durch Mehrwegeausbreitung
- Schwankungsamplitude 20 dB (Faktor 100 bzgl. Leistung) und mehr

# Groß- und kleinskalige zeitliche Immissionsvariation



- Messung mit Breitbandmessgerät
- 1 Messwert pro Minute
- Starke Abhängigkeit von Tageszeit
- Nachts: kleine Schwankungsbreite und niedriger Pegel
- Tags: große Schwankungsbreite (Leistungsregelung!)

# Einfluss unterschiedlicher Messvorgehensweisen

## Messvorgehensweise

## Unterschiedsfaktor (Leistung)

- Messortwahl 1.000 - 100.000
- 1-Punkt-Messung  $\leftrightarrow$  Maximierung im Volumen 10 - 100
- Örtliche Mittelung  $\leftrightarrow$  Maximalwerterfassung 2 - 3
- Zeitliche Mittelung  $\leftrightarrow$  Momentanwert  $\leftrightarrow$  Maximale Anlagenauslastung ca. 4
- Frequency Hopping korrekt  $\leftrightarrow$  nicht korrekt max. 2
- Messunsicherheit addiert  $\leftrightarrow$  nicht addiert 2
- Mobilfunk 1 Anlage  $\leftrightarrow$  Mobilfunk gesamt  $\leftrightarrow$  Gesamtmissionen ?

➤ Dies ist beim Vergleich unterschiedlicher Messreihen zu berücksichtigen!



# Anforderungen der 26. BImSchV / LAI-Hinweise

- Die Grenzwerte werden angegeben als
  - Effektivwerte der
  - Elektrischen und magnetischen Feldstärke,
  - Quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle
- Die Messungen sind bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen
- Immissionen anderer ortsfester Sendeanlagen sind zu berücksichtigen
- Die Messungen sind am Einwirkungsort mit der stärksten Immission durchzuführen
- Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf Basis der maximal gemessenen Werte der Feldstärke oder Leistungsflussdichte am Messort

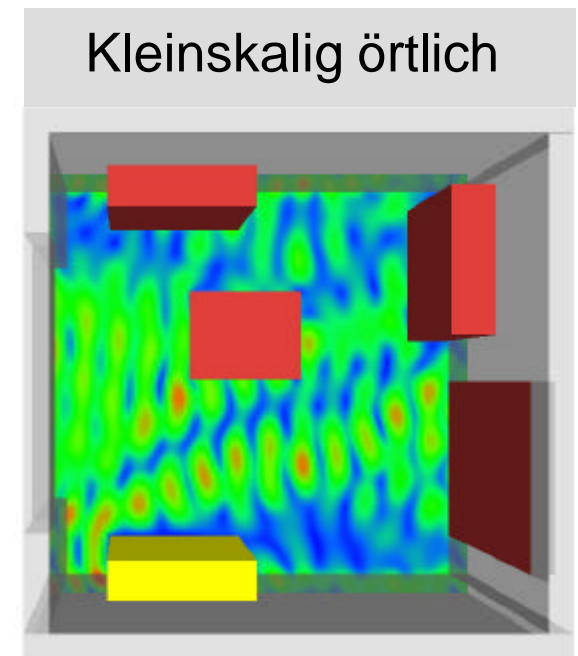
# Berücksichtigung der großskalig örtlichen Variationen

- Sofern die Messpunkte nicht im Vorhinein vorgegeben sind: Orte
  - mit direkter Sicht zur Anlage,
  - die sich auf gleicher/geringfügig niedriger Höhe wie die Basisstation befinden,
  - die sich in direkter horizontaler Ausrichtung zu einer Antenne befinden (Sektormitte),
  - die sich in geringem lateralen Abstand zur Anlage befinden;
  - Fenster, Balkontüren öffnen
- Ansonsten auch möglich:
  - Orte mit potenziell hoher Immission durch Überblickmessungen mit Breitbandsonde bestimmen,
  - Sensible Orte



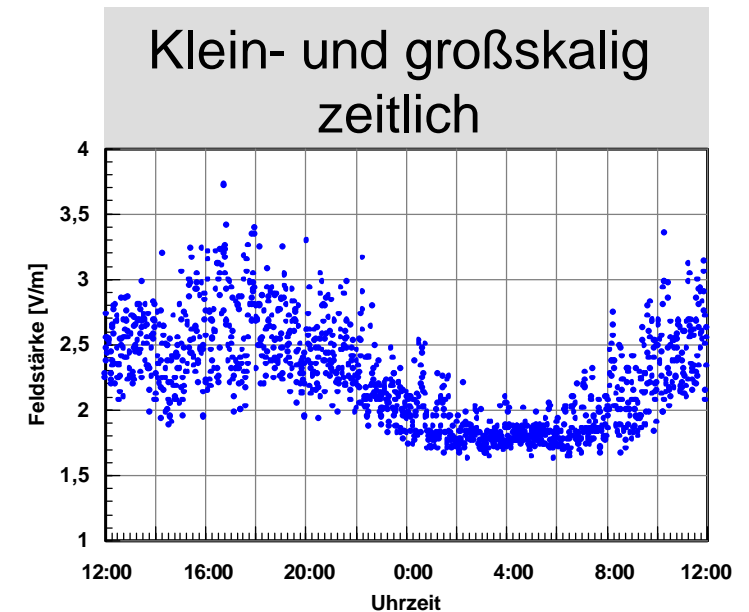
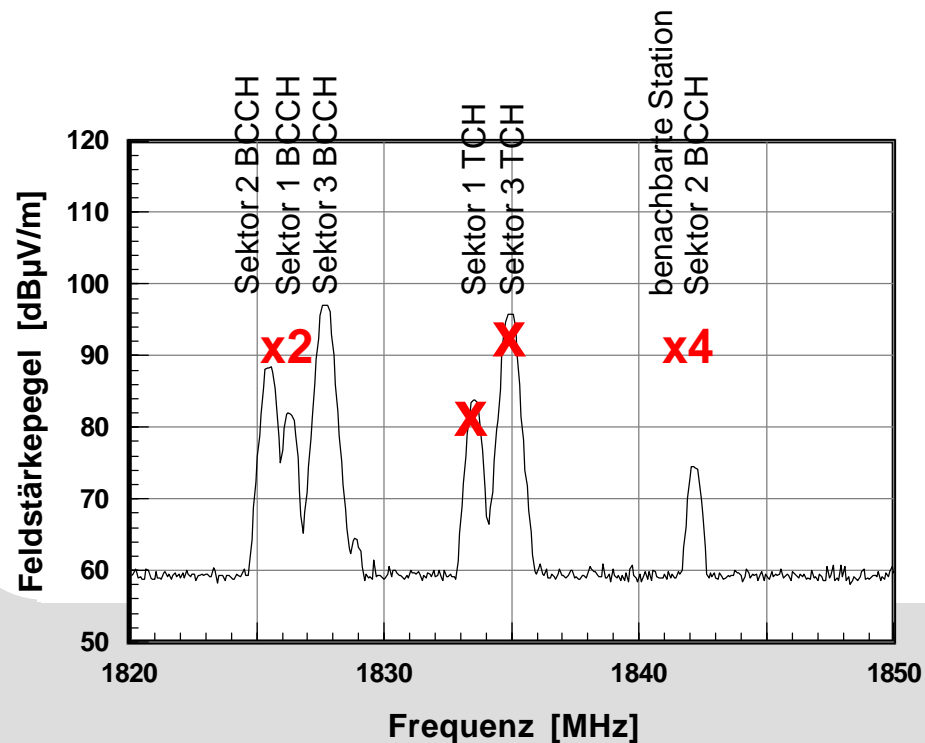
# Berücksichtigung der kleinskalig örtlichen Variationen

- Messungen an einem fixen Ort (z.B. Antenne auf Stativ) nicht sinnvoll
- Maximierung der Immission in einem örtlich begrenzten Volumen
  - Schwenkmethode,
  - Drehmethode,
  - Punktrastermethode
- Weitere Auswertung anhand des gemessenen Maximalwertes



# Berücksichtigung der zeitlichen Variationen

- Erfassung der (zeitlich konstanten) BCCH-Kanäle
- Multiplikation der BCCH-Immission mit der Wurzel aus der max. Kanalzahl des betreffenden Sektors (Feldstärke)



- Quadratische Addition der Immissionen von allen Sektoren / Basisstationen

# Prinzipielle Messtechniken

## Breitbandig



- + Mobilität, Kosten, Schnelligkeit
- keine Frequenzselektivität, geringe Empfindlichkeit

Übersichtsmessungen

## Frequenzselektiv



- + Frequenzselektivität, Empfindlichkeit
- Kosten, Messaufwand, (Mobilität)

Detailmessungen

# Schwenkmethode



Zeitaufwand: typisch 2 Minuten

- ◆ 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

# Drehmethode



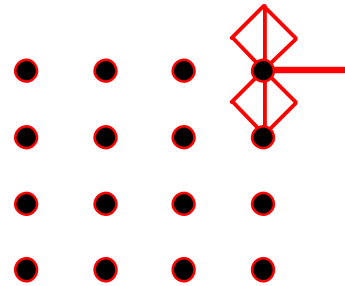
Zeitaufwand: einige 10 Minuten

- ♦ 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



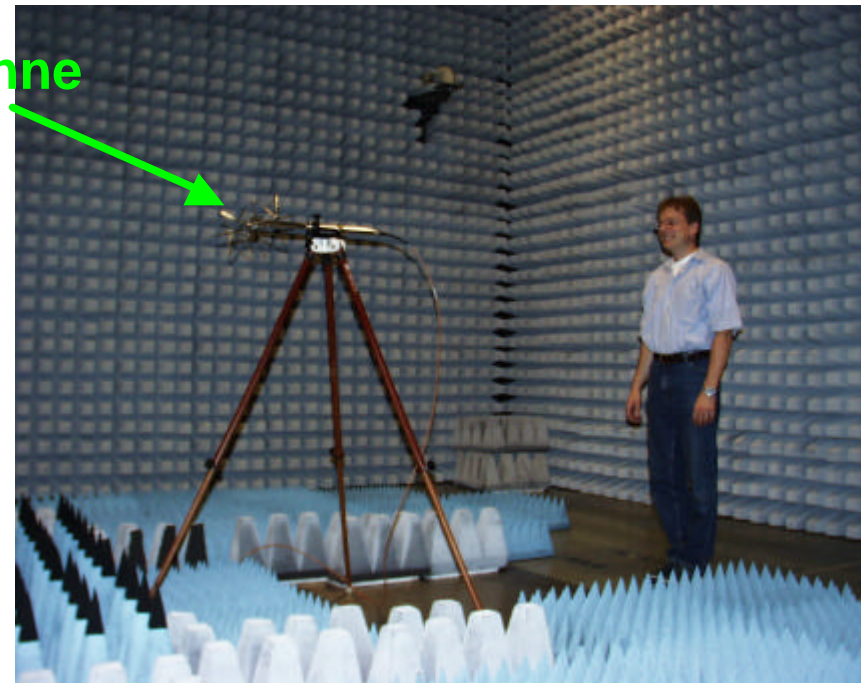
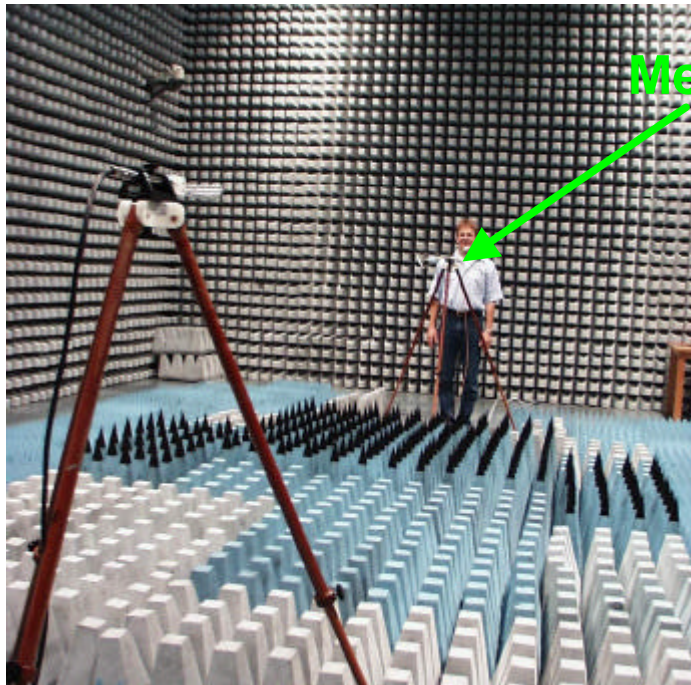
- ◆ Abtastung eines Punktrasters
- ◆ Unterschiedliche Rastergeometrien möglich
- ◆ Isotrope Messung (keine Richtantennen einsetzbar)
- Maximalwert oder Mittelung



# Bewertung der Messmethoden

- Schwenk-, Dreh- und Punktrastermethode liefern bei sorgfältiger Durchführung 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 aufwändigeren Punktrastermethode nicht besser als bei relativ einfacher Schwenkmethode)
  - Punktrastermethode gestattet als einzige Methode Mittelung (aber bislang keine "allgemein gültige" Mittelungsgeometrie verfügbar, Geometrie hat großen Einfluss auf Messergebnis!)
- **Schwenkmethode wird als am besten geeignet beurteilt**

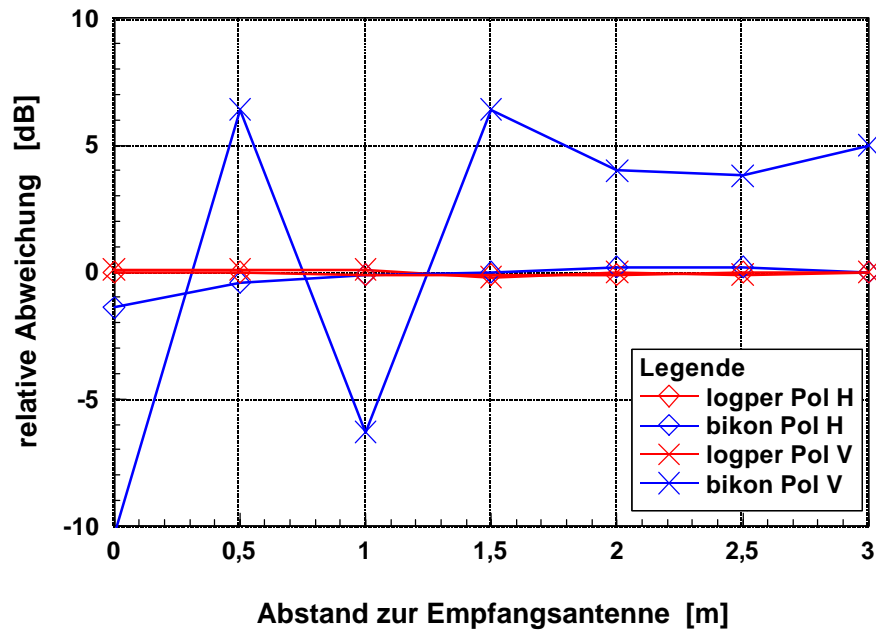
# Einfluss des Messenden



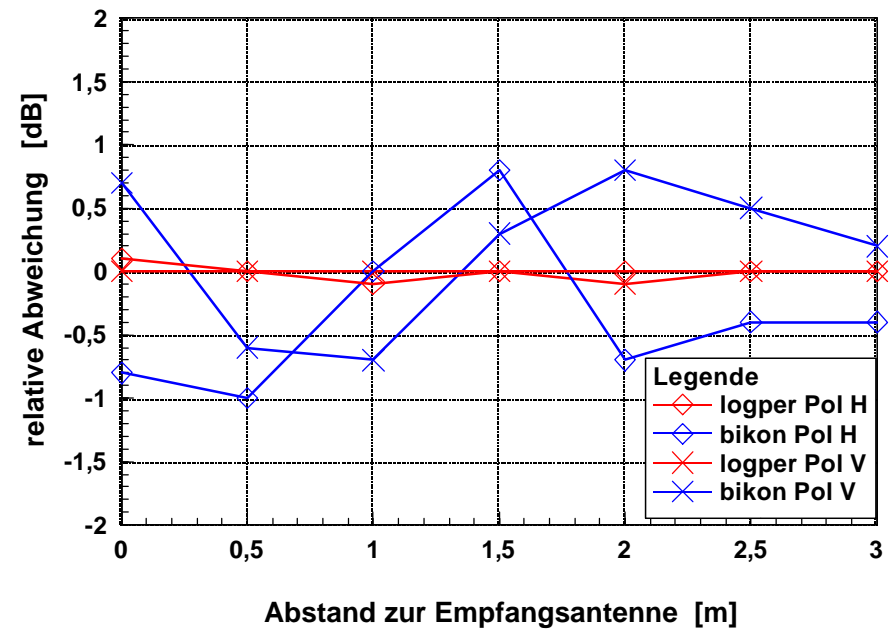
- Aufbau einer Messstrecke in einer Absorberkammer
- Tests verschiedener Messantennen auf Einfluss des Messenden
- Parameter: Bodenbelegung, Frequenz, Abstand des Messenden

# Beispiel: 945 MHz

ohne Bodenabsorber



mit Bodenabsorbern



- **Teilweise extreme Beeinflussung der Messergebnisse durch den Messenden bei der bikonischen Antenne!**

# Zusammenfassung

- Die Immission im Umfeld von Mobilfunk-Basisstationen variiert
  - örtlich großskalig (Einflussfaktoren!)
  - örtlich kleinskalig (fast fading)
  - zeitlich groß- und kleinskalig
- *Die Ergebnisse unterschiedliche Messreihen können völlig differieren*
- Die Vorgaben der 26. BImSchV verlangen Maximalwertsuche und Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung
  - Orte mit direkter Sicht in Hauptstrahlrichtung
  - Maximierung der Immissionen in einem Volumen
  - Hochrechnung auf Basis der zeitkonstanten BCCH-Kanäle
- Als Maximierungsverfahren wird die Schwenkmethode mit Einsatz von logarithmisch-periodischen Antennen empfohlen
- Die Messungen erfordern HF-Kenntnisse und Erfahrungen!

## „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen“

### Teil 2: Berechnungsverfahren

**IMST GmbH**  
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2  
47475 Kamp-Lintfort  
Deutschland

Dr. Christian Bornkessel,  
Markus Schubert

# Vorgehensweise

- Eruierung der zu verwendenden Softwarepakete
- Simulationsparameter
  - Einflussfaktoren auf die Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkbasisstationsantennen
  - Geodaten, Basisstationsparameter, Materialparameter
- Voruntersuchungen (z.B. Einfluss von Mobiliar und Personen)
- Definition von typischen Basisstationsszenarien
- Messungen an unterschiedlichen Basisstationsstandorten unter der Berücksichtigung der Szenarien
- Modellierung und Simulation der Standorte
- Vergleich zwischen Messung und Berechnung
- Beurteilung der einzelnen Softwarepakete anhand von definierten Kriterien

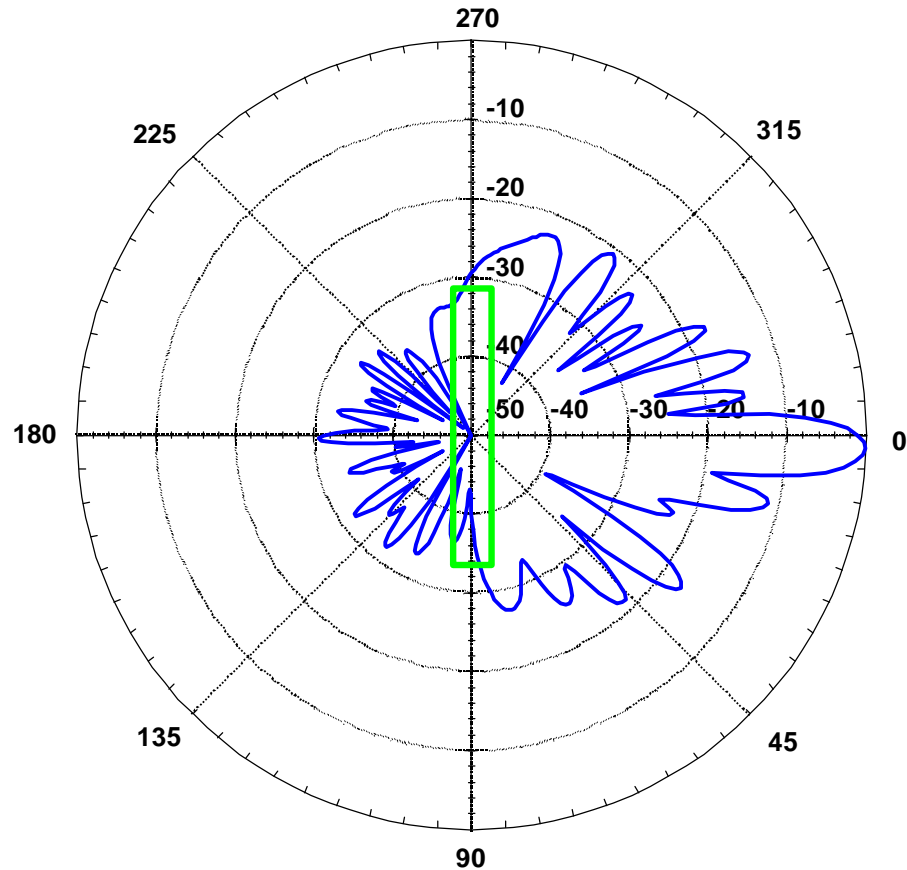
# Analytische Berechnungsverfahren

- Feldtheoretische Verfahren
  - Empire (IMST)
- Hybridverfahren
  - Feko (EMSS)
- Strahlenoptische Verfahren
  - EMF-Visual (Antennessa)
  - Wireless Insite (Remcom)
  - Quickplan (TeS)
- Freiraumausbreitung
  - EFC-400 (FGEU) – u.a. mit Gebäudedämpfung
  - Fieldview (EM Institut) – reine Freiraumausbreitung

# Abstrahlcharakteristik einer BS-Antenne

## Einflussfaktoren für die Abstrahlcharakteristik

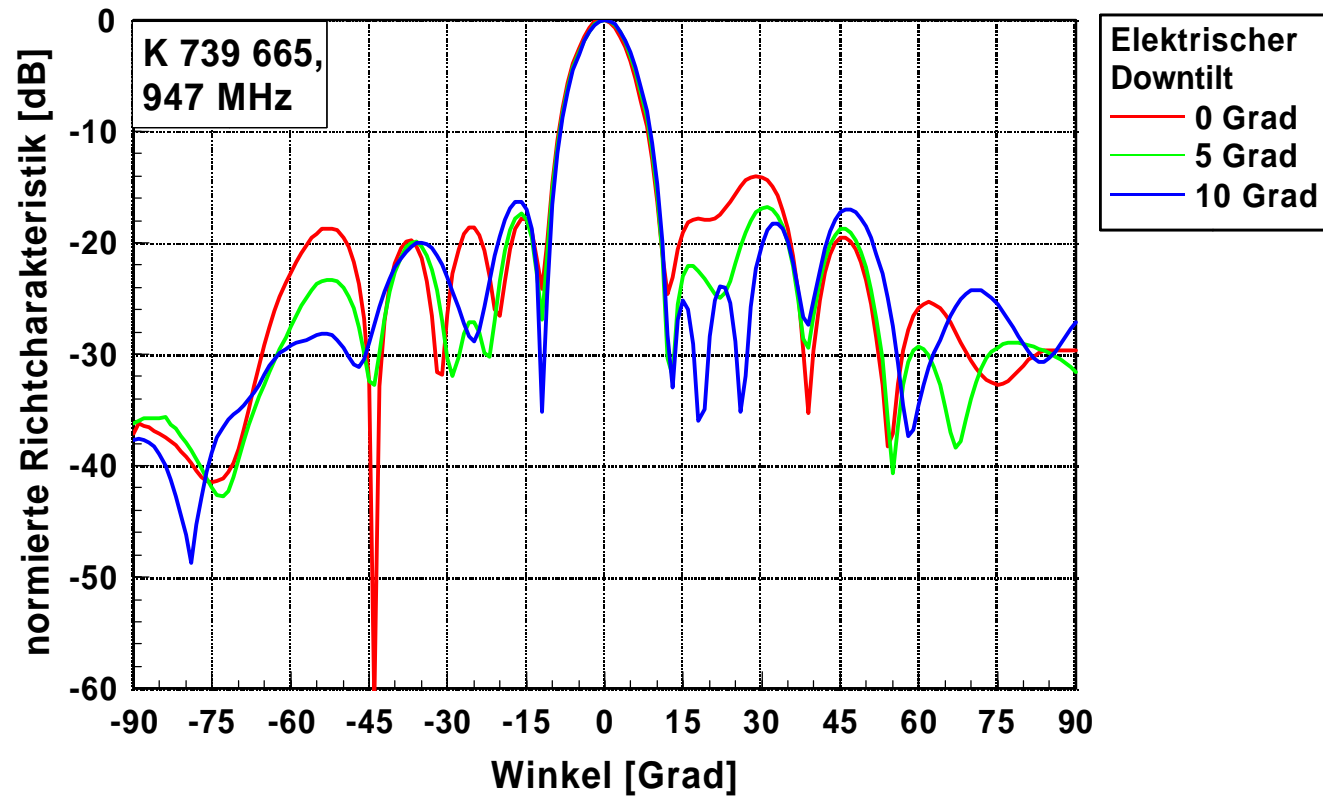
- Elektrischer Downtilt
- Frequenzabhängigkeit
- Montageumgebung



Elevationsdiagramm

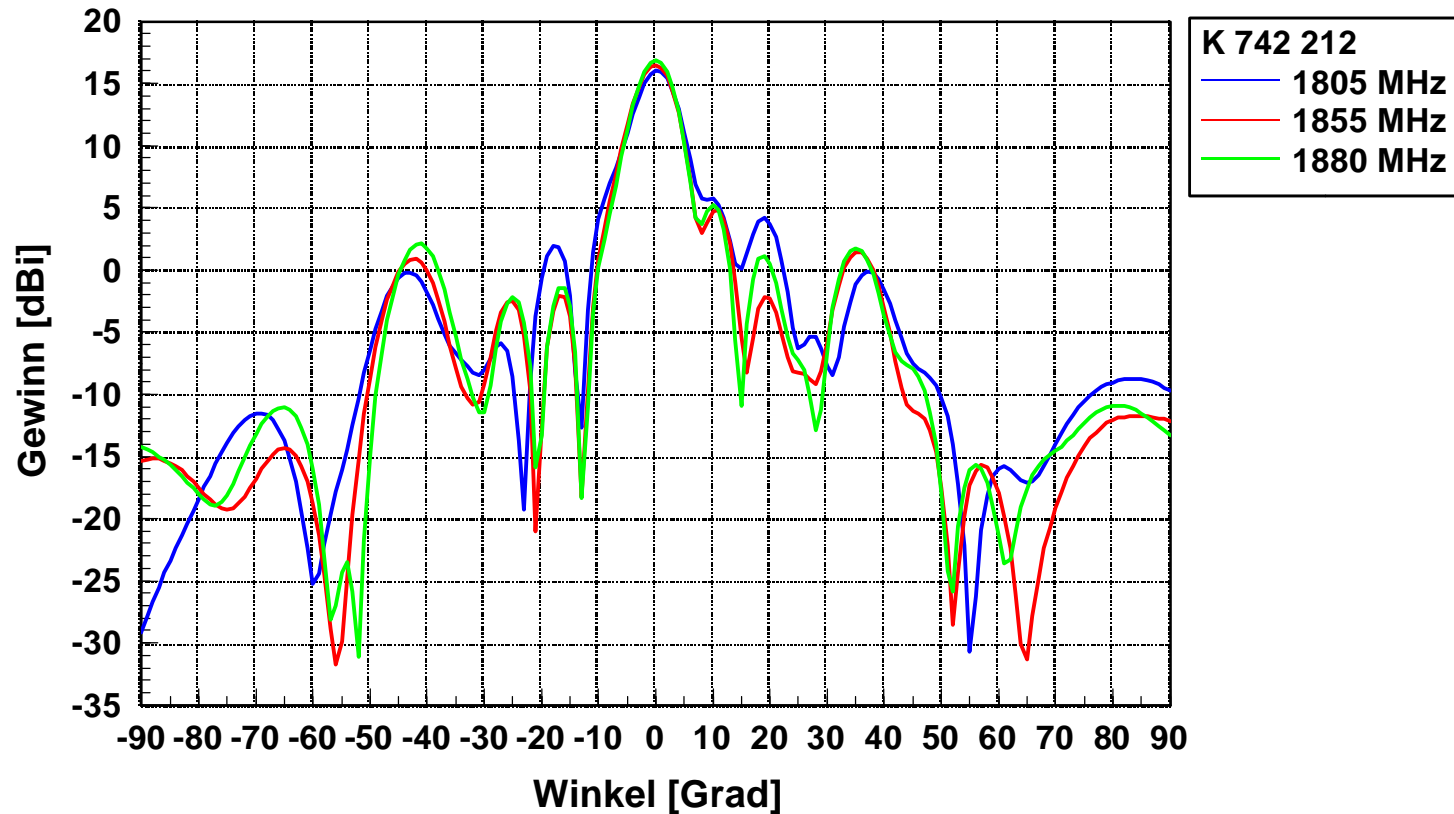


# Elektrischer Downtilt



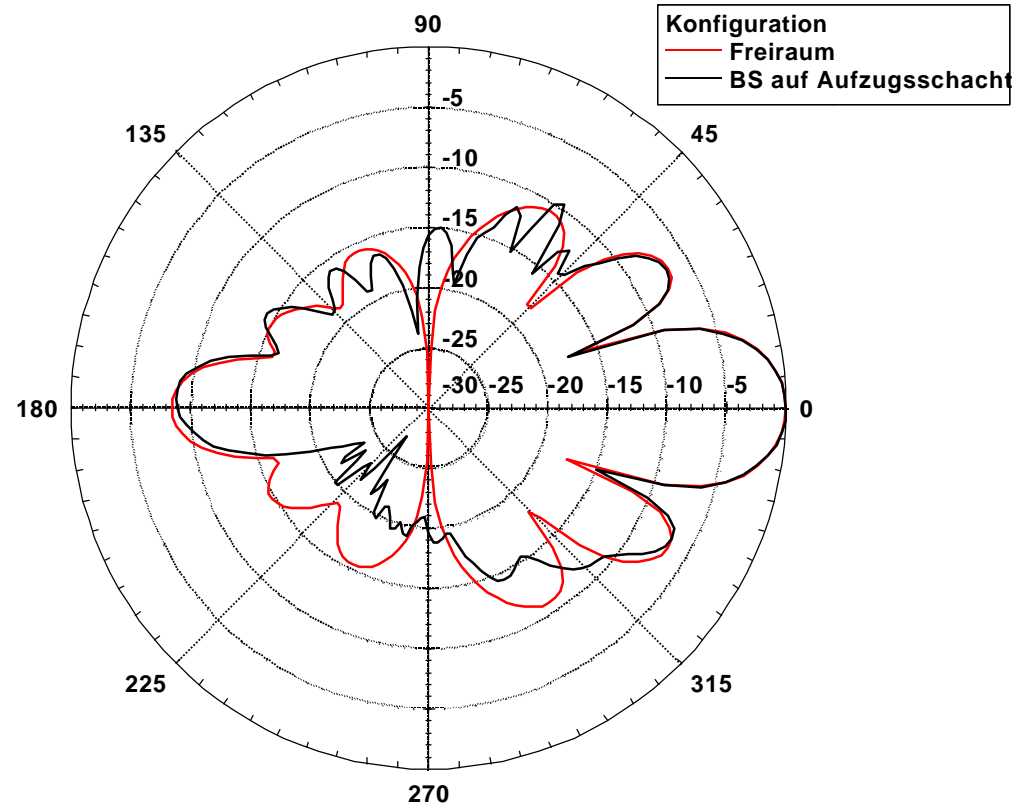
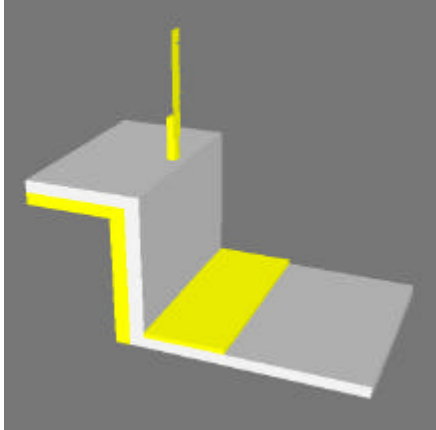
⇒ Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik vom elektrischen Downtilt

# Frequenzabhängigkeit



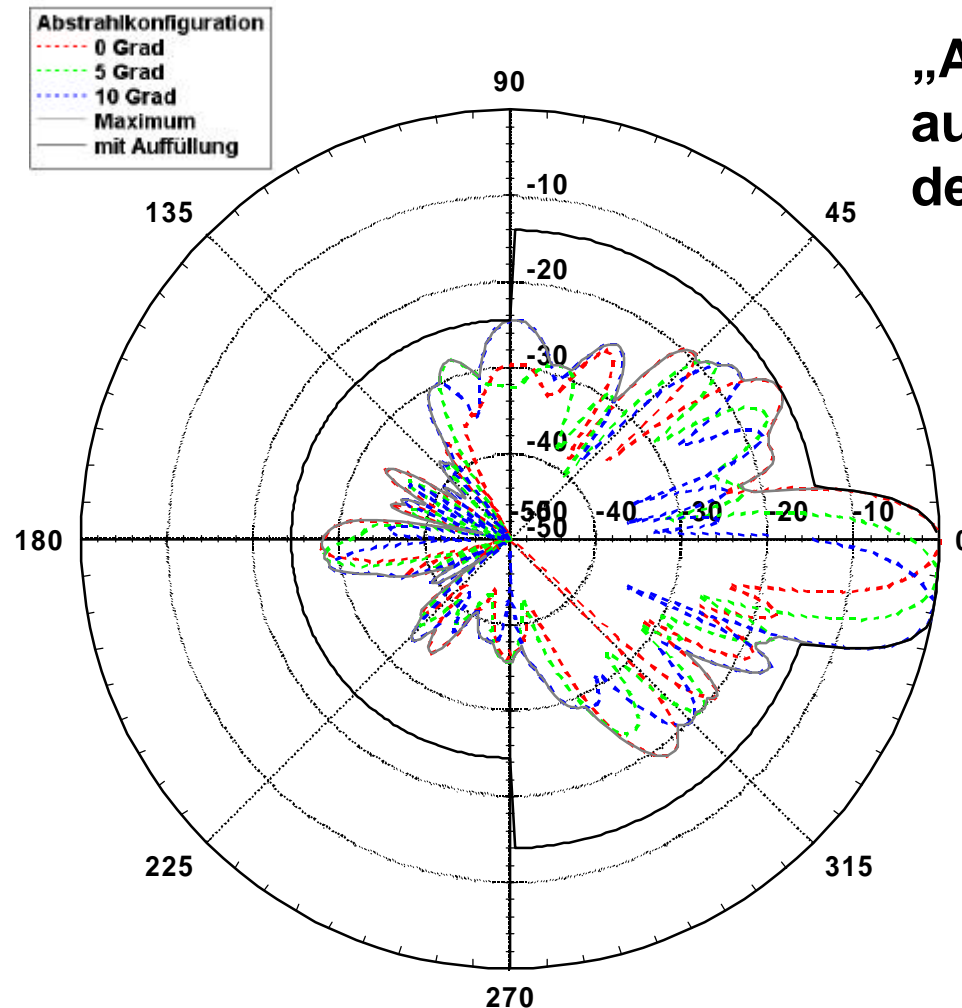
⇒ Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz

# Simulationen mit Empire und Feko



⇒ Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Montageumgebung

# Vorschlag für synthetisierte Abstrahlcharakteristik



„Auffüllen“ der Abstrahlcharakteristik auf den maximalen Wert im Bereich der Nebenzipfel!

## Auswirkungen:

- Modellierung der Montageumgebung kann entfallen (durch Antennendiagramm berücksichtigt)
- Feldtheoretische bzw. hybride Verfahren sehr aufwändig und verlangen großes Know How

# Simulationsparameter

## Geodaten:

- Geländehöhen (Digitale Geländemodelle)
- Gebäude
  - Katasterpläne (keine Angaben über Gebäudehöhen)
  - Satellitenaufnahmen

## Betriebsparameter:

- Montagehöhe
  - Downtilt
  - Antennentyp
  - Leistung
- } => Standortbescheinigung
- } => Mithilfe der Netzbetreiber notwendig

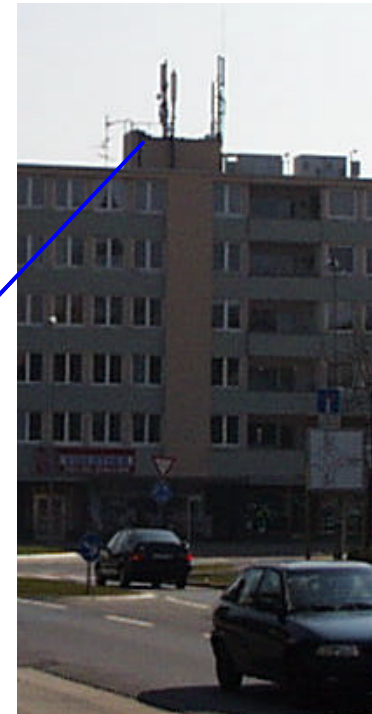
# Typische Szenarien

## Untersuchte Basisstationsszenarien:

- Freistehender Mast auf einem Feld (ländlich)
- Stadtgebiet
- Direkte Sicht zur Basisstation (LoS)
- Keine direkte Sicht zur Basisstation (nLoS)
- Basisstation auf einem Turm oder Hausdach und Untersuchung der Exposition auf einem Platz mit umliegenden Gebäuden
- Mikrozelle
- Inhaus
- Basisstation auf einem Haus und Exposition in einer darunter liegenden Wohnung

# BS Standort: Hombergerstr. 162, 47441 Moers

- Szenario: Stadtgebiet, Basisstation auf wesentlich höherem Gebäude

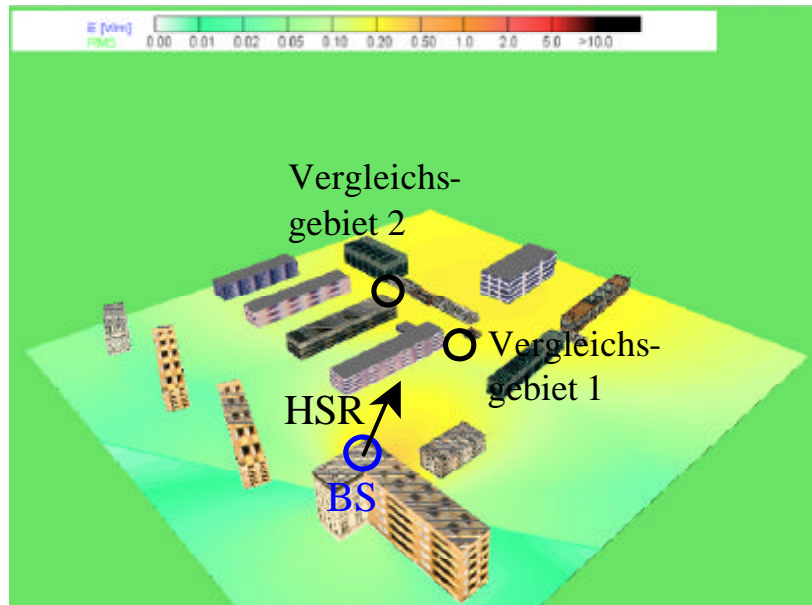


## Simulationsparameter:

- Frequenz: 1847,9 MHz
- Hauptstrahlrichtung: 330°
- Montagehöhe: 23,1 m (Antennenunterkante)
- K 739 490 (Länge: 0,662 m)
- Downtilt: 3° (mechanisch)
- BCCH-Leistung am Antenneneingang: 1,58 W

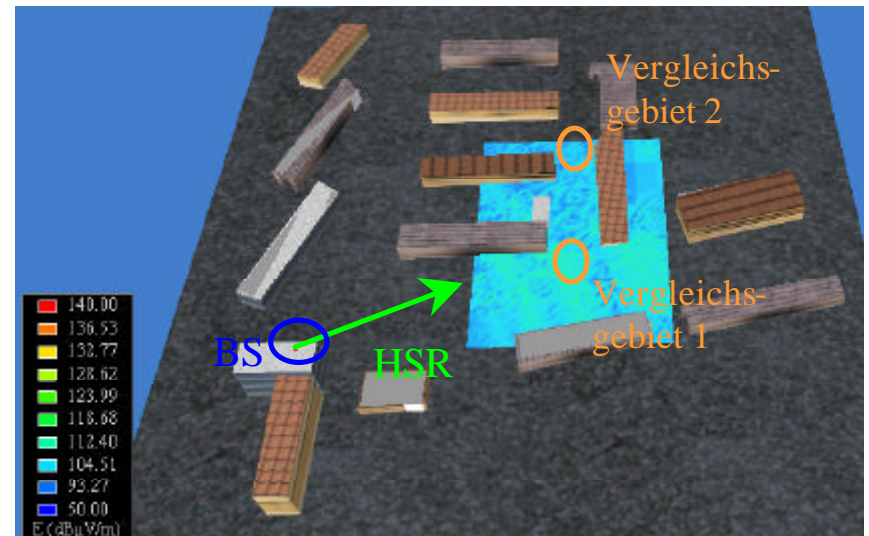
# Simulation (1)

EFC-400 (FGEU)



Methode: Freiraumausbreitung,  
Reflexion am Erdboden (70%),  
Gebäudedämpfung (3dB)

EMF-Visual (Antennessa)

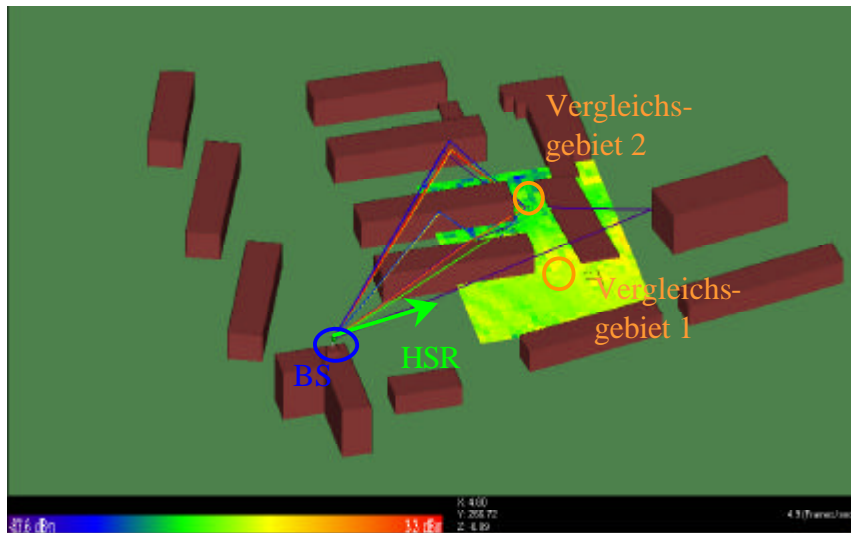


Methode: strahlenoptisch



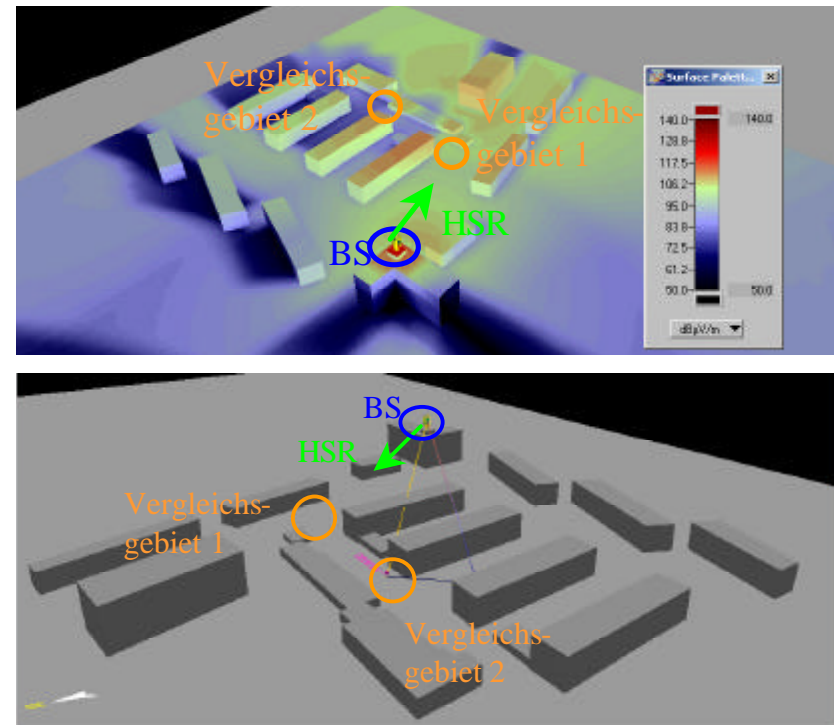
# Simulation (2)

Wireless Insite (Remcom)



Methode: strahlenoptisch

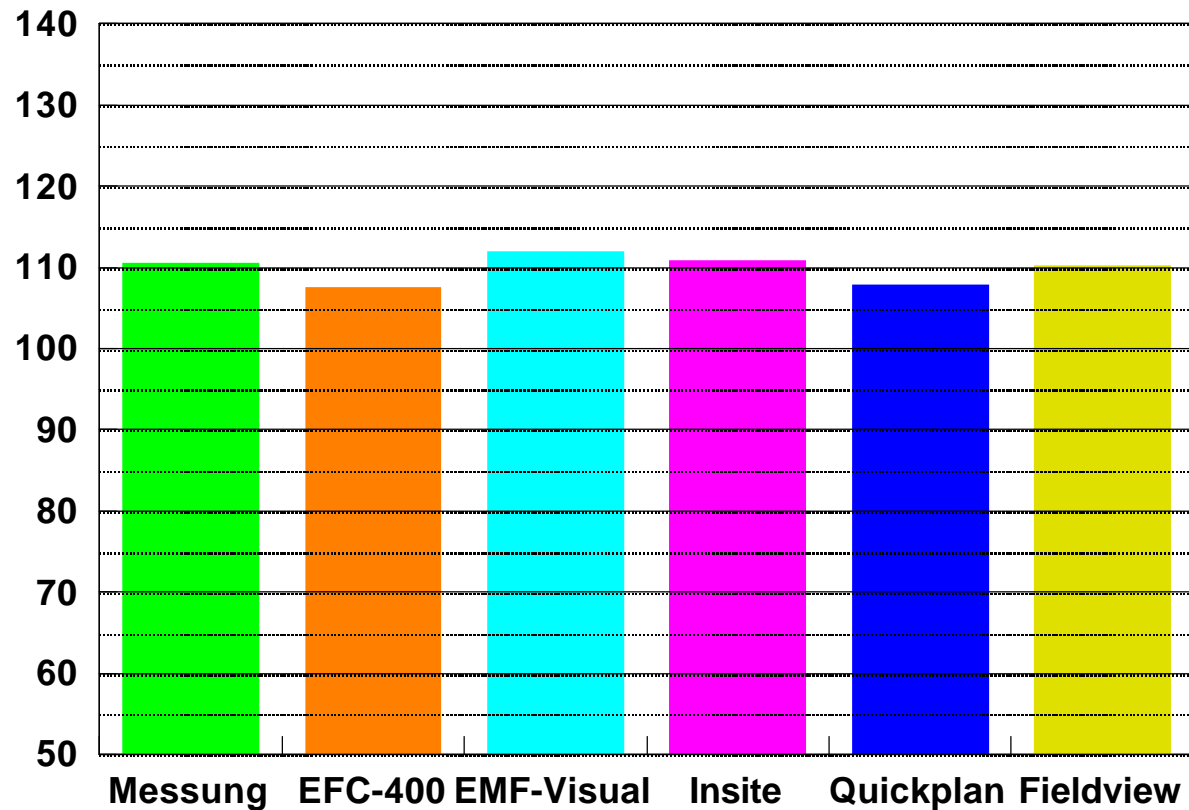
Quickplan (TeS)



Methode: strahlenoptisch

# Ergebnisse (1): LOS

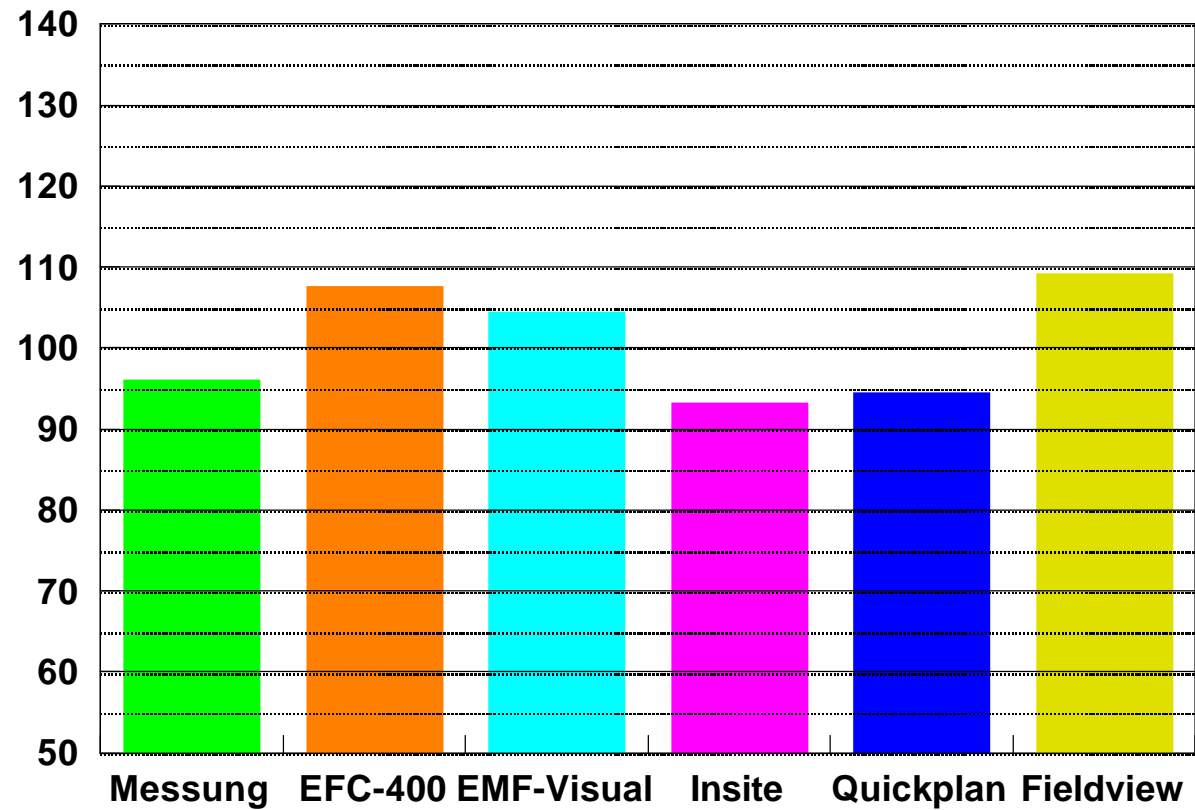
Elektrische  
Feldstärke  
[dB $\mu$ V/m]



=> Gute Übereinstimmung mit dem Messergebnis  
(aber Unterschätzungen zum gemessenen Wert möglich)

# Ergebnis (2): nLOS

Elektrische  
Feldstärke  
[dB $\mu$ V/m]



# Beurteilung

Beurteilungskriterium	EFC-400 (V5.04)	EMF-Visual (V2.1)	Wireless Insite (V1.4.4)	Quickplan (V.1.3.6)
Grenzwertüberprüfung	möglich	möglich	möglich	eingeschränkt möglich
Kombinierte Berechnung von Basisstationsbeiträgen	ja	ja	nein	Nur bei Oberflächenberech.
Bedienungsfreundlichkeit	gut	gut	gut	gut
Anwendungsbereiche	alle	alle	alle	nur outdoor
Auflösung	hoch	hoch	hoch	hoch
Umgang mit den Simulationsparametern	gut	bedingt gut	bedingt gut	sehr gut
Rechenzeit für typisches Szenario	mittel	sehr lang	mittel	kurz

Aussagen betreffen nur die obigen Programmversionen!