



## 5G – massive MIMO

Runder Tisch EMF 05.03.2019

Dr. Michael Schüller

c1



# Übersicht

1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen
  - Vom Rundstrahler zur Multiband-Sektorantenne
2. Massive-MIMO-Funksysteme
  - Funktionsweise
3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme
4. Automatische Leistungsbegrenzung („Safe-Power-lock“)
5. Zusammenfassung



1.



**Evolution heutiger  
Mobilfunkantennen**

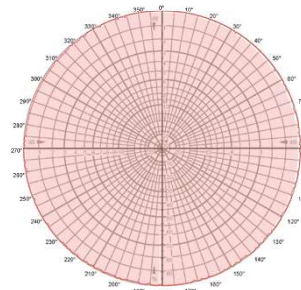


# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – Rundstrahler

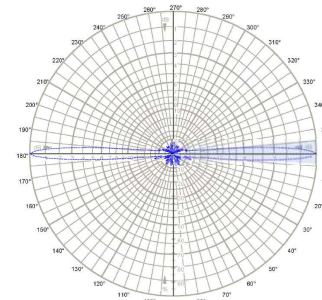
## Rundstrahler (omnidirektionale Antenne)

- Anfang der 1990-er Jahre wurden sehr häufig sogenannte **Rundstrahlantennen** eingesetzt. Mit Rundstrahlern ist eine gute Flächenversorgung möglich. Die Kapazität von Standorten mit solchen Antennen ist aber vergleichsweise gering.
- Das **Horizontaldiagramm** ist **kreisförmig** (●), das **Vertikaldiagramm** ist **gebündelt** (—).
- Schon früh wurden mehrere Empfangsantennen (multiple output, im Bild: 1 Sende- und Empfangsantenne und 1 Empfangsantenne) als erster Schritt in Richtung „**MIMO**“-Betrieb (multiple input multiple output) eingesetzt. Ziel ist hierbei eine bessere Übertragungsqualität.

Kathrein 736347



Horizontaldiagramm



Vertikaldiagramm



# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – Bauform/Diagramm

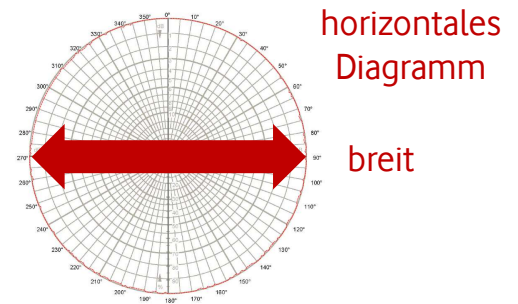


**Bauform**

kleine horizontale Ausdehnung,  
d.h. breites horizontales Diagramm

große vertikale Ausdehnung,  
d.h. schmales vertikales Diagramm

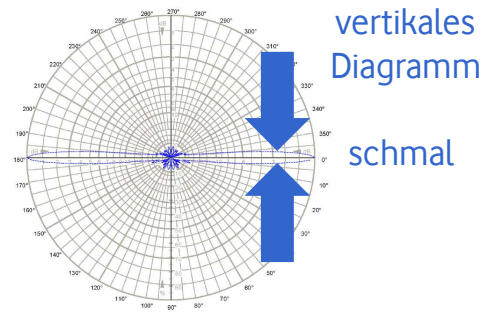
Generelle Regel:  
Ist die Ausdehnung der Antenne in der  
horizontalen / vertikalen Richtung klein bzw.  
groß, dann ist das zugehörige Diagramm  
breit bzw. schmal.



horizontales  
Diagramm

breit

**Diagramm**





vertikales  
Diagramm

schmal

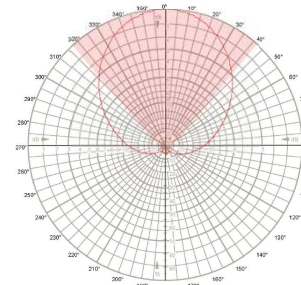


# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – Sektorantennen

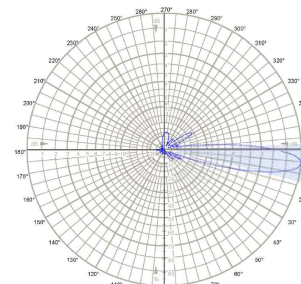
## Sektorantennen

- Um dem zunehmenden Kapazitätsbedarf zu genügen, werden heute i.d.R. sogenannte **Sektorantennen** eingesetzt.
- Das **Horizontaldiagramm** ist ein **sektorförmiger Kreisausschnitt** (  ), das **Vertikaldiagramm** ist **gebündelt** (  ).
- Durch eine Anordnung von meist 3 Sektorantennen ist eine gute Flächenversorgung möglich. Die Kapazität vergrößert sich entsprechend der Anzahl der Sektoren.
- „**MIMO**“-Betrieb ist ebenfalls vorgesehen.

Kathrein 739658



Horizontaldiagramm



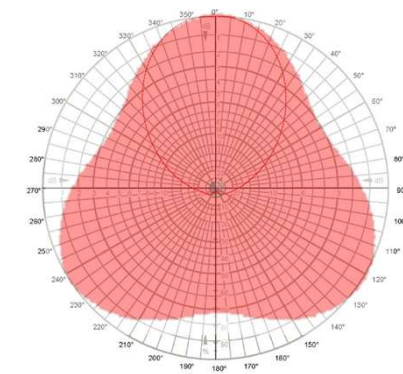
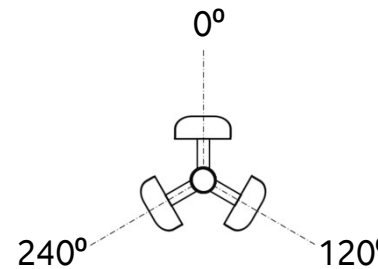
Vertikaldiagramm



# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – Sektorisierung

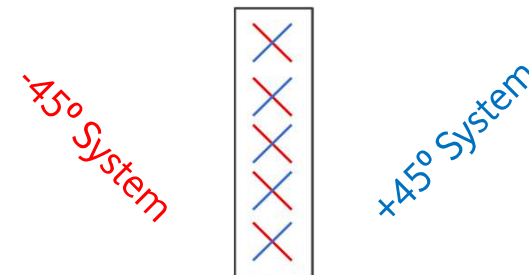
## Sektorantenne

- Durch eine Anordnung von meist 3 Sektorantennen ist eine gute Flächenversorgung möglich.
- Die Kapazität vergrößert sich entsprechend der Anzahl der Sektoren.



## MIMO durch Kreuzdipole

- Im inneren besteht die Antenne i.d.R. aus spaltenförmig angeordneten Dipolen.
- Die in  $+45^\circ$  bzw. in  $-45^\circ$  ausgerichteten Dipole bilden jeweils ein Antennensystem.
- Mit 2 Antennensystemen ist MIMO möglich.

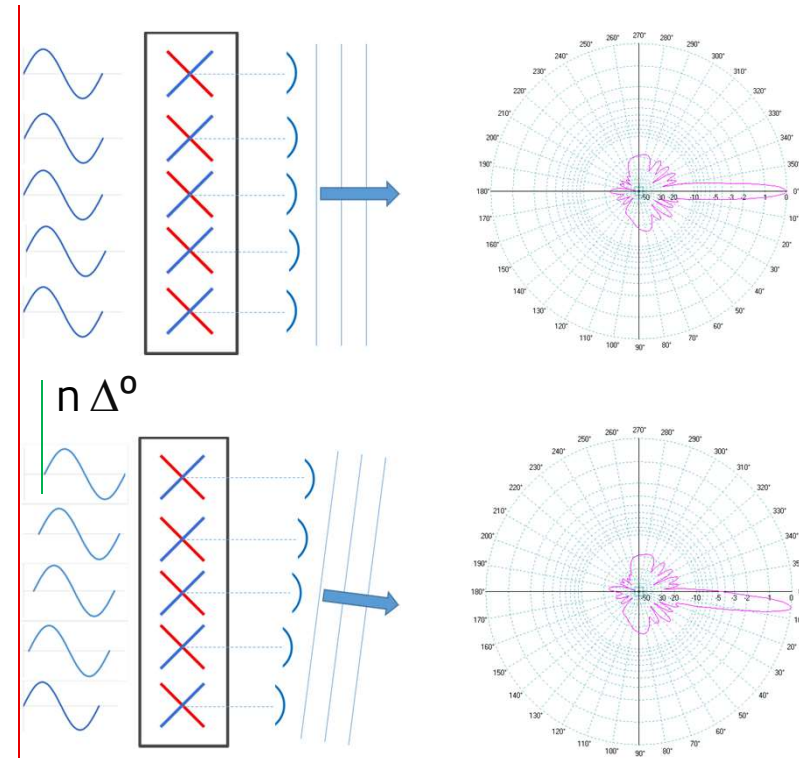




# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – elektrischer Downtilt

## Elektrischer Downtilt

- Um Störungen zwischen verschiedenen Funkzellen zu minimieren, wurden schon früh mechanische **Downtilt-Steller** eingesetzt, mit denen die Antenne **mechanisch** bezüglich der Senkrechten gekippt werden kann.
- Bei heutigen Sektorantennen kann dieser **Downtilt elektrisch verstellt** werden. Dazu wird die Laufzeit zu den einzelnen Elementarantennen über zusätzliche Leitungstücke verändert. Kommt das Signal bei allen Elementarantennen gleichzeitig an, zeigt das vertikale Diagramm in  $0^\circ$ -Richtung (oberes Bild). Kommen die Signale um  $\Delta^\circ$  versetzt an, weist das Diagramm einen Downtilt (unteres Bild) auf.

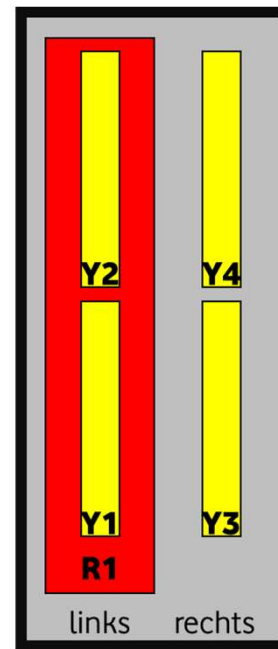




# 1. Evolution heutiger Mobilfunkantennen – Multiband-Sektorantenne

## Multiband-Sektorantenne

- Seit den 1990er Jahren ist die Anzahl der für den Mobilfunk genutzten Frequenzbänder kontinuierlich gestiegen – Dem 900MHz-Band („D-Netze“) und 1800MHz-Band („E-Netze“) folgten das 2100MHz-, 800MHz-, 1500MHz-, 2600MHz-, 3500MHz- und das 700MHz-Band. Aktuell kommt noch ein Band bei 26GHz dazu.
- Um die Anzahl der Antennen auf den Dächern nicht immer weiter ansteigen zu lassen, sind in modernen Sektorantennen mehrere Frequenzbänder in einem Gehäuse integriert. Man spricht von **Multiband-Antennen**.

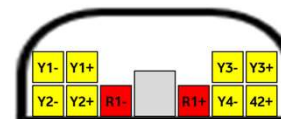


Antenne:

**Kathrein 80010892 V01**

schematischer Aufbau

Frequenzband	Array	Anschluss
698 - 960 MHz	R1	1 - 2
1710 - 2690 MHz	Y1	3 - 4
1710 - 2690 MHz	Y2	5 - 6
1710 - 2690 MHz	Y3	7 - 8
1710 - 2690 MHz	Y4	9 - 10



Anschlüsse (Unterseite)



2.



**Massive-MIMO-  
Funksysteme**



## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Intelligente Antennensysteme

### Intelligente Antennensysteme

- Die jüngste Entwicklung sind intelligente Antennensysteme (Smart Antennas) im **2600MHz- und 3500MHz-Band**.
- Bei diesen sind die Elementarantennen in Spalten und Zeilen („Array“) angeordnet (zum Vergleich: bei Sektorantennen gab es nur ein oder zwei Spalten).
- Damit wird eine **horizontale und vertikale Bündelung** zu schmalen Antennendiagrammen („Beams“) möglich.
- Da die Verstärker integriert sind, können die Beams elektronisch gesteuert werden.

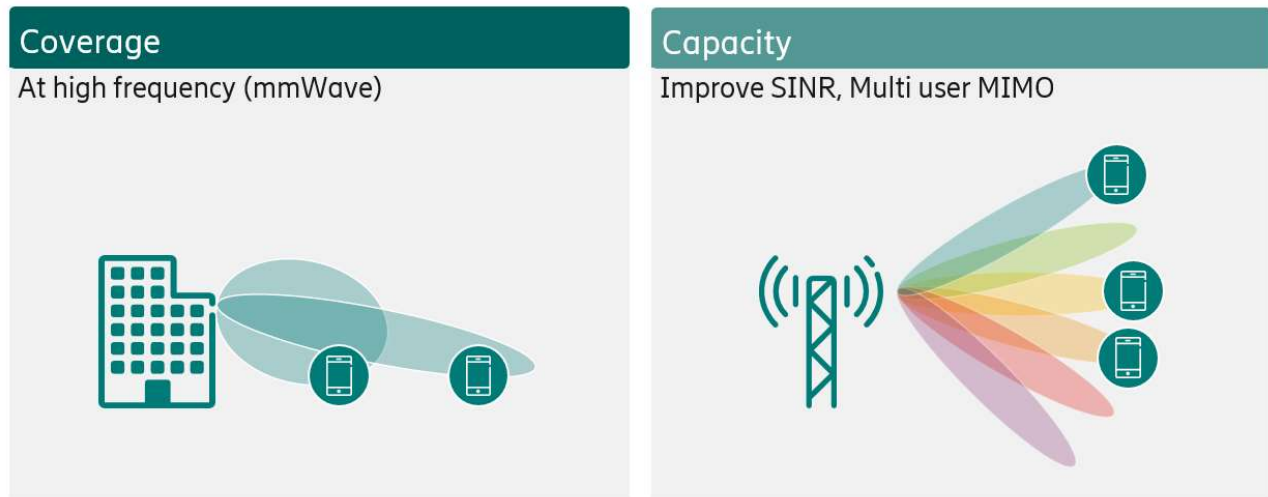


## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Vorteile

### Vorteile intelligenter Antennensysteme

- Haupttreiber für neue Entwicklungen sind **Versorgung** und **Kapazität**.
- Dies wird möglich durch intelligente Antennen im Millimeterbereich (26GHz) sowie den Frequenzen bei 2600MHz und 3500MHz.
- Durch **Beamforming** wird MIMO für viele Nutzer möglich (**massive MIMO**).

### Drivers for Massive MIMO

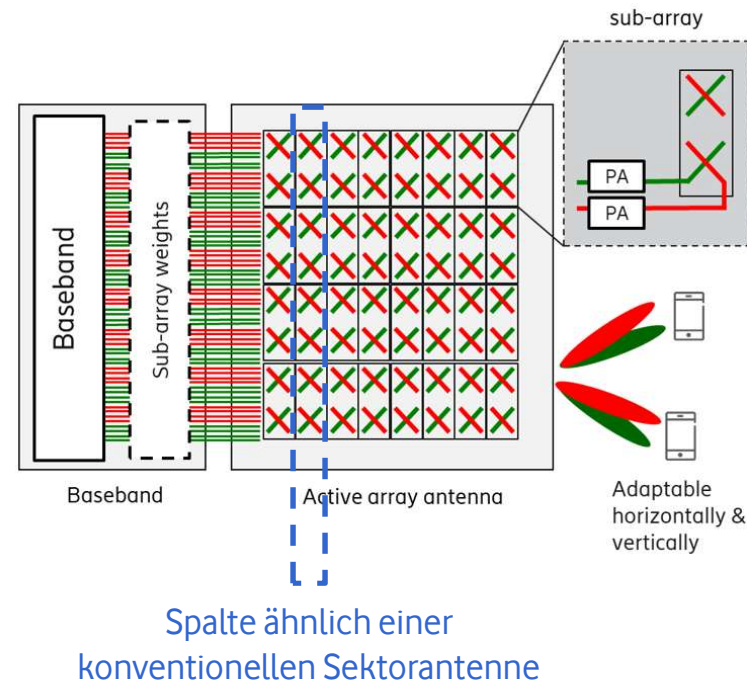


## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Prinzipaufbau

### Prinzipaufbau intelligenter Antennensysteme

- Die Antenne besteht aus einer Anordnung von Elementarantenne in Spalten und Zeilen (**active array antenna**) oder sub-arrays, die das Feld der Antenne horizontal und vertikal elektronisch formen können. Dazu verfügt jede Elementarantenne bzw. jeder sub-array über einen eigenen Verstärker (PA=**power amplifier**).
- Die zur Verbindung mit den Nutzern genutzten Beams werden entsprechend der jeweiligen zeitabhängigen Verteilung der Nutzer in der Zelle erzeugt („reziprok“).

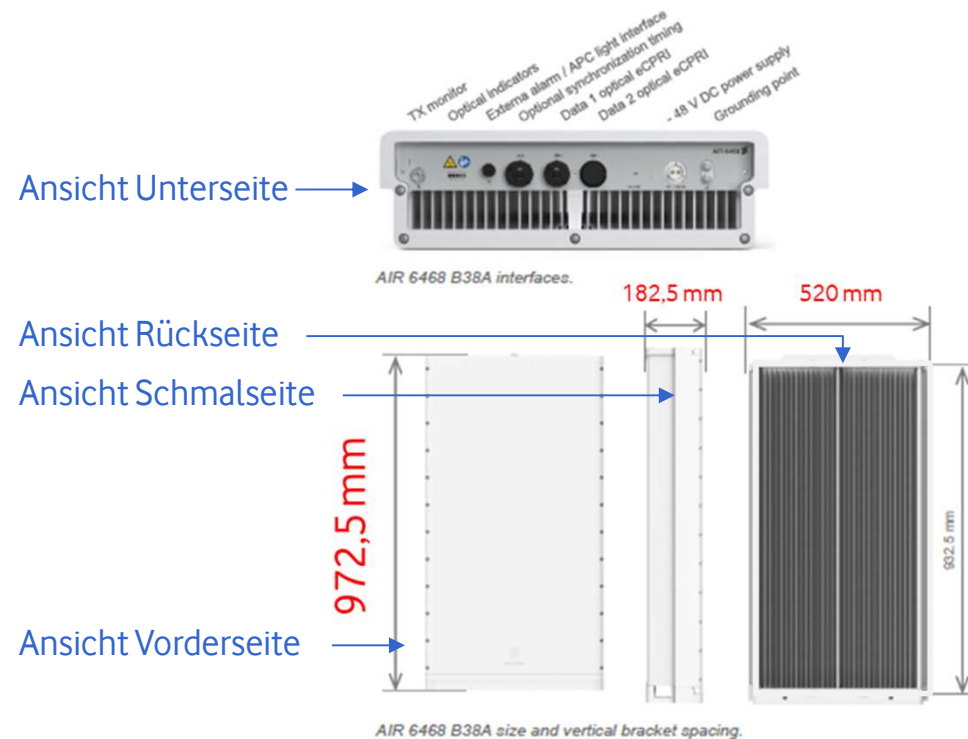
### Advanced antenna system



## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Größe

### Größe und Ansicht intelligenter Antennensysteme (Beispiel)

- Intelligente Antennen im Frequenzbereich von 2600MHz (Wellenlänge: 11,5cm) und 3500MHz (Wellenlänge: 8,6cm) sind in ihrer **Bauform** vergleichsweise **kompakt**.
- Beispiel: ca. 100cm x 52cm x 18cm.
- Da sie im Vergleich zur Wellenlänge groß sind, haben sie sehr gute Bündelungseigenschaften in der horizontalen und vertikalen Ebene.

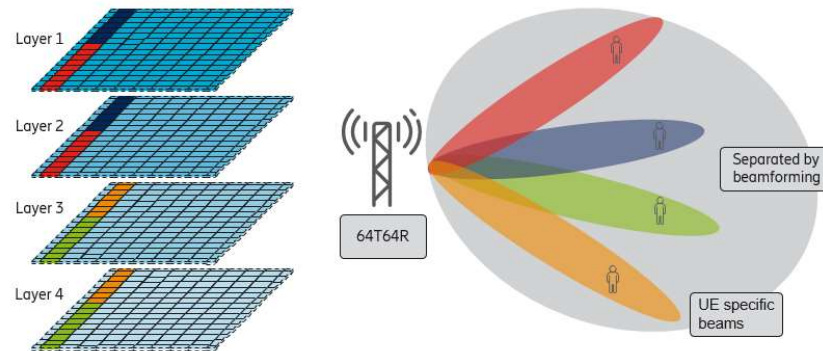


## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Multi user MIMO

### Multi user MIMO

- Daten zu verschiedenen Nutzern können nicht nur durch unterschiedliche Codes (wie bei UMTS und LTE, dargestellt in der Frequenz-Zeit-Ebene) übertragen werden, sondern räumlich separiert durch verschiedene „Beams“.
- Über verschiedene Codes können mehrere Nutzer in einem „Beam“ versorgt werden.

### Multi user MIMO (MU-MIMO)



Layers – Number of data streams transmitted or received  
Beam – A beam consisting of one or two polarizations  
Rank – Number of layers to a single UE (reported by UE)



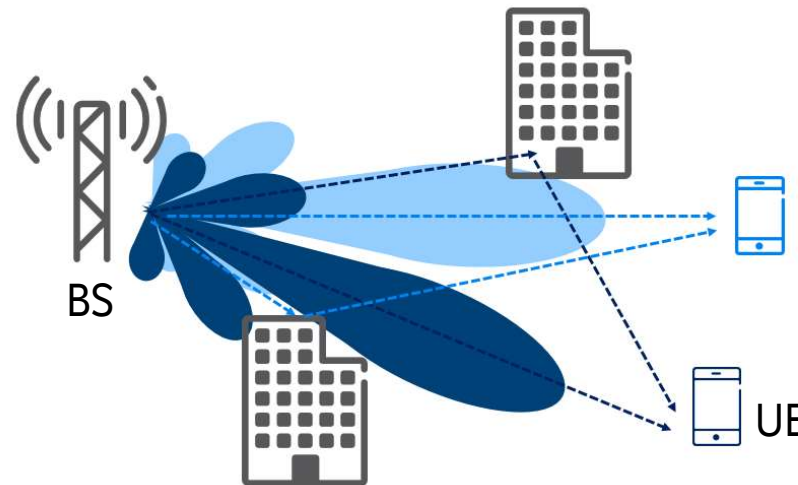


## 2. Massive-MIMO-Funksysteme – Multi user MIMO

**MIMO** = **M**ulti **I**nput **M**ulti **O**utput

- **Multi user MIMO** basiert auf dem Beamforming und einer Mehrwege-Ausbreitung zwischen Sender und Empfänger.
- Das von der Basisstation (Input) ausgesandte Signal gelangt über mehrere „Beams“ und Ausbreitungsweg zum Endgerät (UE=User Equipment) und wird dort empfangen (Output). Der Übertragungskanal zwischen BS und UE wird dabei als System mit Input und Output betrachtet.
- Vorteil: Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses.

Channel Properties (Multi Path Propagation) ≡



3

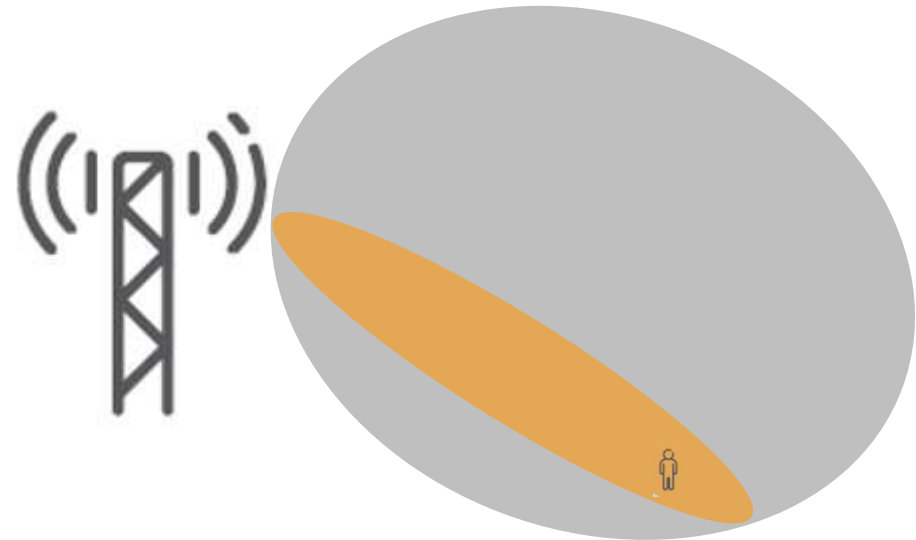
Standortbescheinigungen für  
massive-MIMO-Funksysteme



### 3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme

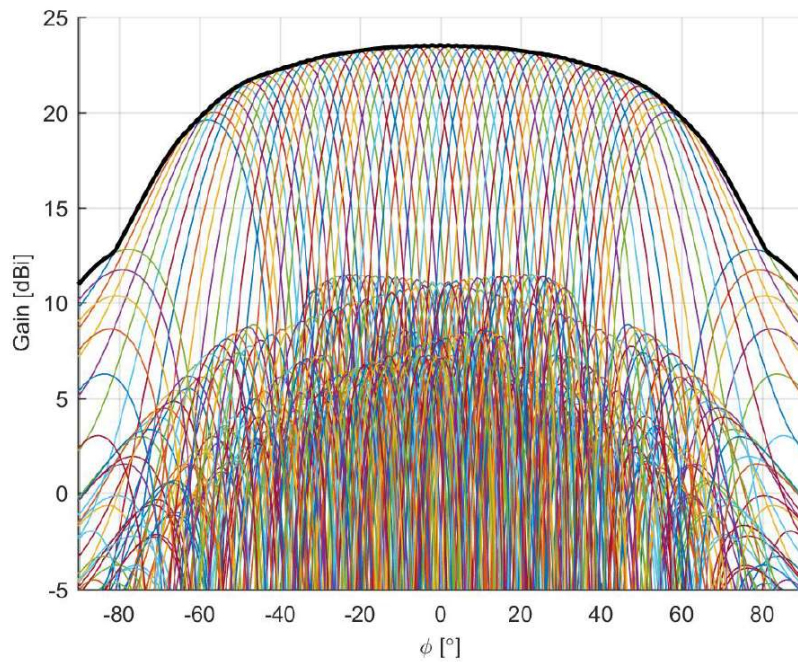
#### Antennengewinn

- Durch die **Bündelung in horizontaler und vertikaler Richtung** ist der Antennengewinn etwa um 6dB (Faktor 4 in Bezug auf die Leistung, Faktor 2 in Bezug auf die Feldstärke) größer.
- Eine **konservative Ermittlung der Sicherheitsabstände** muss so erfolgen, als ob die hohe Bündelung in jeder beliebigen Richtung auftritt.
- Deshalb muss im Rahmen des **Standortbescheinigungsverfahrens** eine **Hüllkurve über alle möglichen Beams** bestimmt werden.

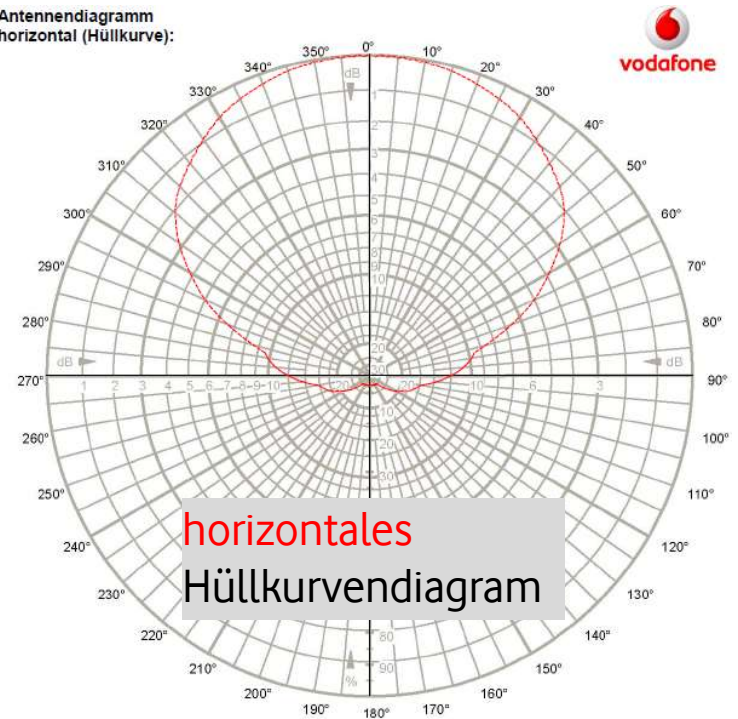


### 3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme

Hüllkurve als Überlagerung aller horizontalen Beams

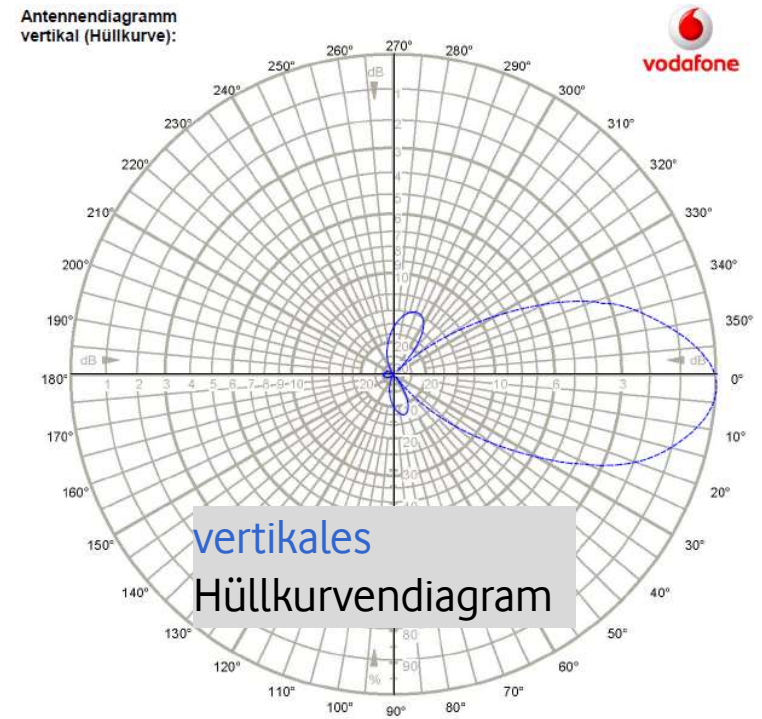
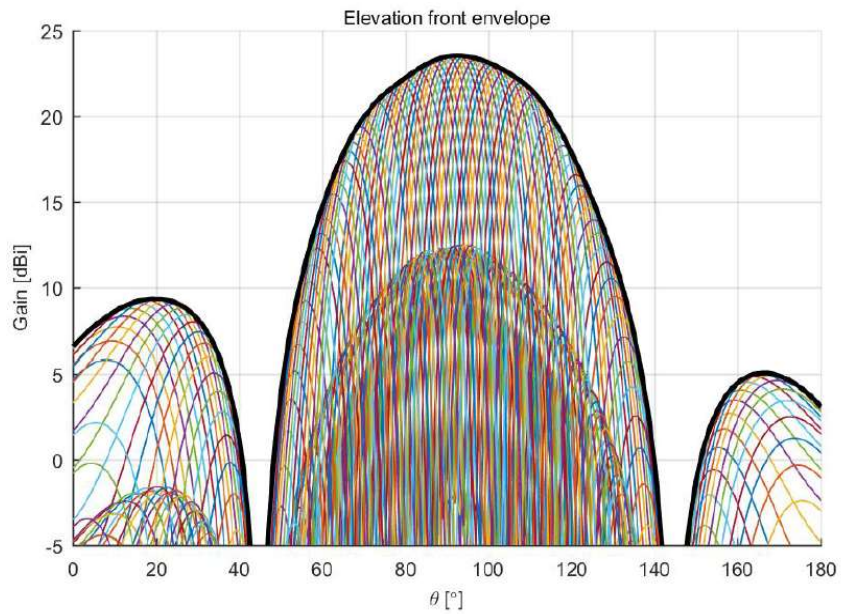


Antennendiagramm horizontal (Hüllkurve):



# 3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme

Hüllkurve als Überlagerung aller vertikalen Beams

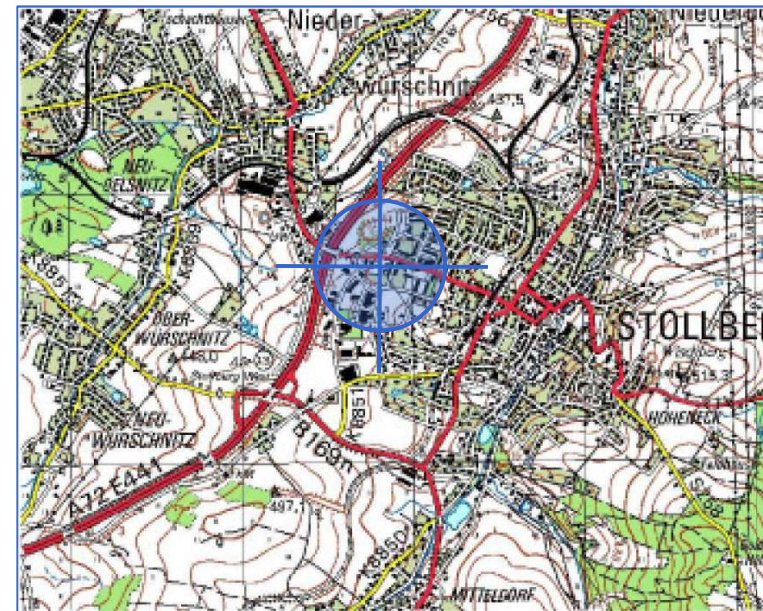
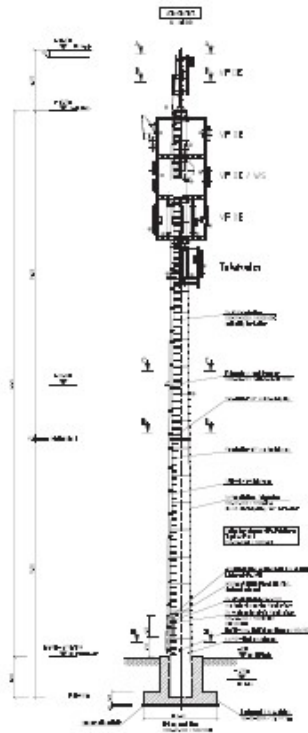




### 3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme

#### Standort: Stollberg (Erzgebirge)

- 1 Mitnutzer (GSM900 und UMTS2100)
- 4G-massive-MIMO-System der Vodafone GmbH  
Frequenz: 2580MHz  
Leistung: 210W  
Antennengewinn: 24dBi



### 3. Standortbescheinigungen für massive-MIMO-Funksysteme

#### Standort: Stollberg (Erzgebirge)

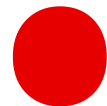
- Die Vorabschätzung bei der Planung liefert in guter Näherung eine Aussage über die Sicherheitsabstände der Standortbescheinigung (STOB).
- Die Sicherheitsabstände sind so groß, dass auf einem Dachstandort bei gleicher Leistung Antennenhalter mit einer Höhe (Bauhöhe der Antennen plus Sicherheitsabstand) errichtet werden müssen, die eine Baugenehmigung erfordern.

Standort Stollberg (Erzgebirge)				
	Sicherheitsabstand [m] Vorab-Abschätzung		Sicherheitsabstand [m] STOB 29.05.2018	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
bestehende Systeme	17,97	4,99	17,68	4,93
4G m-MIMO	25,94	6,16	25,94	5,94
alle Systeme	31,56	7,93	31,39	7,72





4



**Automatische Leistungsbe-  
grenzung („Safe-power-lock“)**



## 4. Automatische Leistungsbegrenzung („Safe-power-lock“)

### Safe-Power-Lock (oder Smart-Power-Lock)

- Die im Abschnitt 3 beschriebene Berechnung der Sicherheitsabstände ist sehr konservativ. Es wird angenommen, dass in jeder Richtung die maximale Leistung des massive-MIMO-Funksystems nur über einen einzigen Beam mit hohem Gewinn abgestrahlt wird. Dies tritt in der Praxis aber nicht oder nur sehr selten auf.
- Statistische Untersuchungen haben gezeigt, dass aufgrund der Anzahl der Nutzer die tatsächliche Leistung auf mehrere Beams verteilt wird und die Leistung je Beam meist deutlich kleiner als die maximale Leistung ist.
- Wenn sich zum Beispiel die **Leistung** auf mindestens **4 Nutzer in 4 Beams aufteilt**, ist nur noch ein **halb so großer Sicherheitsabstand** für das massive-MIMO-Systems erforderlich wie im Fall eines Beams.



## 4. Automatische Leistungsbegrenzung („Safe-power-lock“)

### Safe-Power-Lock (oder Smart-Power-Lock)

- Integriert man in das massive-MIMO-Funksysteme einen Regelkreis („**smart**“), der überwacht und sicherstellt („**safe**“), dass sich die Leistung auf 4 Beams mit einer Leistung von weniger als 25% der Maximalleistung je Beam aufteilt und – soweit dies nicht der Fall ist – dass die Leistung je Beam automatisch auf 25% abgeriegelt wird, ergibt sich für das Funksystem mit Überwachung ein um 50% reduzierter Sicherheitsabstand.
- Analogie: Wie bei ABS oder ESP beim Auto greift ein Regelkreis ein, wenn es notwendig ist, und gewährleistet den sicheren Betrieb.
- Mit **Smart-Power-Lock** können massive-MIMO-Funksysteme auf Dächern auch mit Antennenträgern der heutigen Bauhöhe sicher betrieben werden. Damit werden **weniger neue Standorte** benötigt.



## 4. Automatische Leistungsbegrenzung („Safe-power-lock“)

### Sicherheitsabstände bei Leistungsabriegelung bei 25% je Beam.

- Realisierung auf einem Gebäudedach wird möglich.
- Höhe des Antennenträgers: 10m
- Bauhöhe der Antennen: 3,5m – 4,0m
- Vertikaler Sicherheitsabstand: <6m

Standort Stollberg (Erzgebirge)				
	Sicherheitsabstand [m] Vorab-Abschätzung		Sicherheitsabstand [m] STOB 29.05.2018	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
bestehende Systeme	17,97	4,99	17,68	4,93
4G m-MIMO („Safe-power-lock“)	25,94:2= 12,97	6,16:2= 3,08	25,94	5,94
alle Systeme	22,17	5,87	31,39	7,72



# 5. **Zusammenfassung**



## 5. Zusammenfassung

- Massive-MIMO-Systeme/Beamforming-Systeme sind eine konsequente Weiterentwicklung der bisherigen Mobilfunkantennen.
- Massive-MIMO-Antennen sind elektronisch steuerbare Antennen, die eine Beam-Steuerung und –Bündelung in vertikaler und horizontaler Richtung erlauben.
- Solche Antennen sind aus der Radartechnik schon lange bekannt.
- Beim Mobilfunk erlaubt die Bündelung eine Erhöhung der Übertragungsrate durch ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis.
- Die Sicherheitsabstände von massive-MIMO-Antennen sind im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens konservativ bestimmbar.
- Die Realisierbarkeit auf Dachstandorten soll zukünftig durch ein intelligentes Leistungsabriegelungssystem („Safe-Power-Lock“-Feature) ermöglicht werden.





**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit**

Dr. Michael Schüller  
Leiter „EMF und Umweltschutz“  
Vodafone GmbH  
E: [michael.schueller@vodafone.com](mailto:michael.schueller@vodafone.com)  
M: 0172 2914665

c1

29

05.03.2019





# Danksagung, Quellen und weiterführende Artikel

Weiterführende Links:

- [https://www.gesetze-im-internet.de/bimsv\\_26/26\\_BImSchV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_26/26_BImSchV.pdf)
- <http://www.gesetze-im-internet.de/bemfv/BEMFV.pdf>
- <https://www.gsma.com/publicpolicy/resources/5g-internet-things-iot-wearable-devices>
- <https://www.vodafone.de/unternehmen/soziale-verantwortung/verbraucherthemen.html>

Bildnachweise

- Vodafone GmbH, Düsseldorf, oder Fotos des Autors, soweit nicht anders vermerkt.

Danksagung:

Für die freundliche Bereitstellung der Bilder und Grafiken auf den Folien 12-16, 18, 19 links und 20 links möchte ich mich bei der Firma Ericsson GmbH, Düsseldorf, herzlich bedanken.

