



Mai 2018 / update

Gregor Dürrenberger, FSM / Pascal Leuchtmann, ETH-IEF

Immissionen von kleinzelligen und grosszellig- gen Basisstationsnetzen

Mobilfunkstrahlung von Basisstationen ist seit Jahren ein Politikum. Vorstösse zur Änderung der NISV haben einen schweren Stand. Schon zwei Mal hat der Ständerat Begehren zur Lockerung der Anlagegrenzwerte abgelehnt. In diesen Debatten wurde oft für kleinzellige Netze votiert, welche die Strahlenbelastung tief halten sollen. Das Argument ist politisch kaum bestritten, ist es aber physikalisch korrekt? Eine einfache Modellbetrachtung zeigt, dass die erforderlichen durchschnittlichen Sendepiegel zur Abdeckung eines Einzugsgebietes bei kleinzelligen und grosszelligen Netzen identisch sind, dass aber bei gegebener Kapazität kleinzellige Netze tiefere durchschnittliche Immissionen haben als grosszellige Netze.

Frage: Wenn man ein gegebenes Netz von Basisstationen in eine kleinzellige Struktur mit deutlich mehr Standorten – jeder aber mit tieferer Sendeleistung – überführt, reduziert man dann die durchschnittliche Exposition der Bevölkerung durch die Anlagen?

Annahmen: Zur Abschätzung der Immissionen im Raum verwenden wir zunächst ein sehr einfaches, idealisiertes Modell: Das Basisstationsnetz habe eine gitterförmige Struktur, d.h. jede Basisstation ist von 4 gleich weit entfernten, gleich stark sendenden anderen Basisstationen umgeben (siehe Abbildung 4). Grundsätzlich könnte auch eine andere geometrische Konfiguration gewählt werden. Für die prinzipielle Betrachtung, die wir hier anstellen, spielt das keine Rolle. Die Basisstationen werden als Punktstrahler, die gleichmässig in den freien Raum abstrahlen, modelliert. Die Reichweite einer Antenne wird über deren Leistung und eine minimal zu erbringende Feldstärke festgelegt. Diese zwei Parameter können frei gewählt werden und definieren die Antennendichte. Der konkrete Wert der Antennendichte ist zur Beantwortung der Frage ebenfalls nicht entscheidend. Als Beurteilungsgrösse verwenden wir die durchschnittliche Feldstärke im Raum. Sie errechnet sich als Quadratwurzel aus der quadratischen Summation aller Einzel-Feldstärken an einem Raumpunkt (siehe auch Anhang):

$$E_{\text{tot}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}$$

Man beachte: Die tiefsten Immissionen im Raum liegen über den definierten minimalen Feldstärken, weil Felder benachbarter Antennen zusammenwirken. Betrachtet man das im eindimensionalen Fall (siehe Abbildung 2), beträgt die tiefste Exposition etwa 1.4 mal die minimale Feldstärke (hauptsächlich 2 Anlagen wirken jeweils zusammen, Faktor $\sqrt{2}$). Im zweidimensionalen Fall (siehe Abbildungen 3 und 4) ist es etwa Faktor 2 (hauptsächlich 4 Anlagen wirken zusammen, Faktor $\sqrt{4}$).

Für die Berechnungen verwenden wir folgende (willkürlichen) Zahlen: Senderadius einer starken Anlage: 3 km; einer schwachen: 333 m. Minimale Feldstärke $E_{\text{min}} = 0.01$ V/m. Errechnete Leistung einer grossen Antenne: 18.3 W (ERP); einer kleinen: 0.2 W (ERP). Abbildung 1 zeigt die zwei Antennenkategorien. Zur Illustration ist zusätzlich noch eine dritte, stärkere Kategorie eingezeichnet (590 W ERP; Senderadius 17 km).

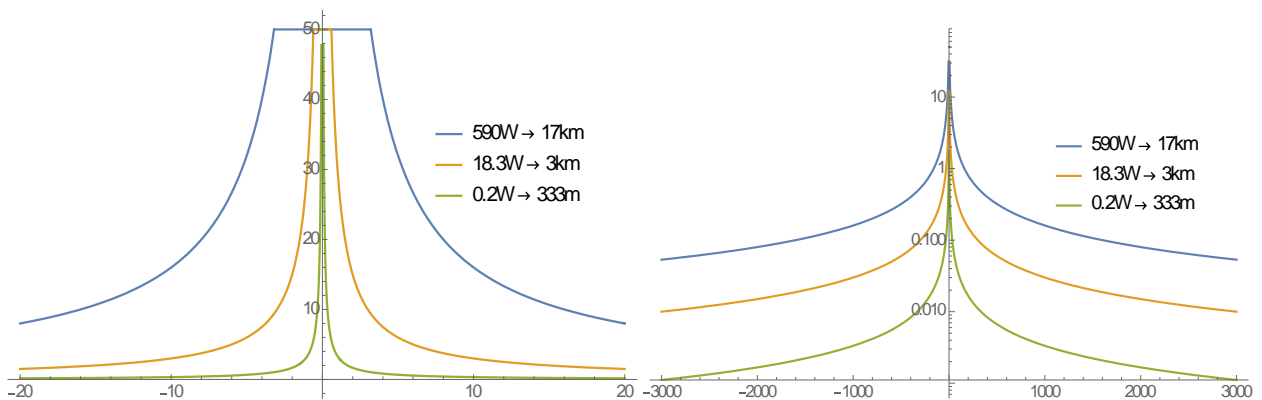


Abbildung 1: Felder von drei unterschiedlich starken Antennen im linearen (links) und im logarithmischen (rechts) Massstab. Vertikale Achse: Feldstärke in V/m, Horizontale Achse: Abstand in m. In der Legende: Distanz (in km bzw. m), in der die Grenzfeldstärke von 0.01 V/m erreicht wird.

Resultat: wir vergleichen die durchschnittliche Feldstärke eines Netzes mit starken (gelben) Antennen mit der durchschnittlichen Feldstärke eines Netzes mit mehreren schwachen (grünen) Antennen. Beide Netze gewährleisten dieselbe Abdeckung. Abbildung 2 zeigt die Situation in eindimensionaler Weise (auf eine starke Antenne kommen 9 schwache), Abbildung 3 zeigt das Netz der starken Antennen in einer Flächenperspektive (in dieser Betrachtung kämen auf eine starke 81 schwache Antennen; nicht eingezeichnet).

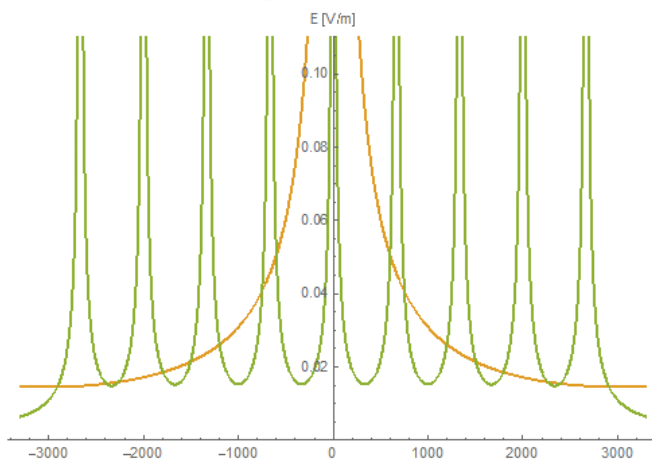


Abbildung 2: Mehrere Antennen in einer Reihe. Dort wo eine Antenne die minimale Feldstärke erreicht, liegt auch für die nächste Antenne das Minimum. Die Reihe endet, wo die starke Antenne die Grenzfeldstärke unterschreitet. Die vertikale Achse zeigt die Feldstärke in V/m. Die horizontale Achse zeigt die Distanz vom Zentrum in Meter.

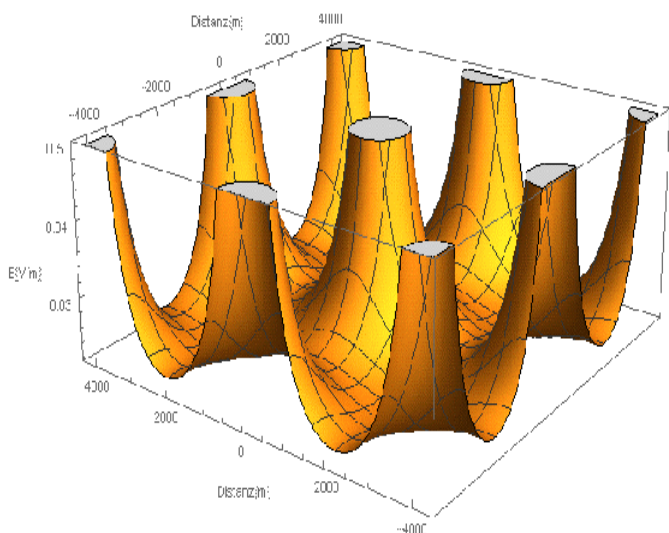


Abbildung 3: Mehrere Antennen auf der Fläche angeordnet. Die vertikale Achse zeigt die Feldstärke in V/m. Die horizontalen Achsen zeigen Distanzen in Meter. Die gelbe Fläche visualisiert die Feldstärkeverteilung (Immission) im Raum.

Resultate zur eindimensionalen Betrachtung: die minimale Immission beträgt $\sqrt{2} \cdot E_{\min} = 0.014 \text{ V/m}$. Der errechnete Immissions-Mittelwert für die zwei Konfigurationen (grün, gelb) ist identisch und beträgt 0.096 V/m .

Zweidimensionale Betrachtung: die minimale Immission beträgt $\sqrt{4} \cdot E_{\min} = 0.02 \text{ V/m}$. Der Wert ist grösser als im Falle der linearen Anordnung, weil am „tiefsten“ Punkt 4 Antennen (mit jeweils gleich starken Feldern) zusammenwirken, und nicht nur zwei wie in der eindimensionalen Anordnung. Auch in dieser Betrachtung ist die gemittelte Feldstärke der zwei Konfigurationen identisch. Sie beträgt 0.033 V/m .

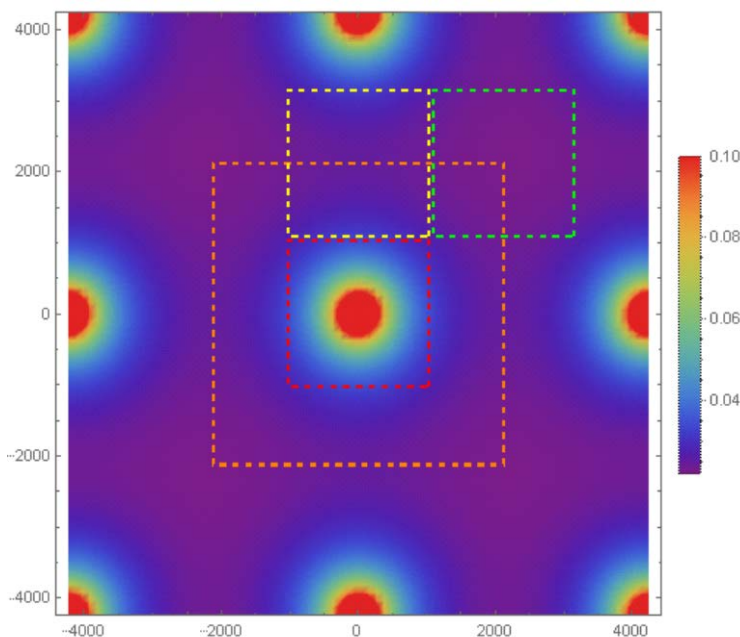


Abbildung 4: Flächendarstellung der Feldstärkeverteilung. Farbskala in V/m, Distanzskalen in m.

Der Wert ist kleiner als derjenige, den die lineare Anordnung geliefert hat. Das liegt daran, dass mit zunehmendem Abstand vom Antennenstandort die Flächen überproportional wachsen. Die Bereiche mit tiefen Feldstärken (sie liegen vom Zentrum entfernt) fallen daher mehr ins Gewicht als in der eindimensionalen (linearen) Situation.

Einige weitere Feldstärkenwerte: im antennen nahen Umfeld (rotes Quadrat in Abbildung 4) beträgt das Immissionsniveau 0.054 V/m (166% des Mittelwerts), im antennen fernsten Quadrat (grün) 0.023 V/m (72% des Mittelwerts).

Schlussfolgerung: Wenn man ein Gebiet mit Mobilfunk versorgt, spielt die Anzahl der Standorte für die durchschnittliche Immission, welche zur funktechnischen Abdeckung des Gebietes notwendig ist, keine Rolle. Die Überführung eines grosszelligen Netzes mit wenigen starken Antennen in ein kleinzelliges Netz mit vielen schwächer strahlenden Antennen entspricht einem Nullsummenspiel.

Aussagegrenzen: Das Modell basiert auf idealisierten Annahmen, die keine realen Gegebenheiten berücksichtigen. Das Resultat kann deshalb nicht unbesehen auf konkrete Situationen verallgemeinert werden (siehe unten). Es berücksichtigt auch keine Netz-Kapazitäten, die das reale Immissionsniveau wesentlich bestimmen.

Sodann wurden nur die Immissionen von Basisstationen betrachtet und die Endgeräte,



welche die persönliche Exposition stark prägen, unberücksichtigt gelassen.

Konkrete Situationen: Zur Beurteilung realer Expositionssituationen gilt es, die idealisierten Annahmen zu konkretisieren und Antennenart, Netztopologie, Gelände, Bauten, Bevölkerungsverteilung, Netz-Kapazitäten etc. zu berücksichtigen. Dafür sind Computermodelle entwickelt worden, die insbesondere in der Netzplanung verwendet werden. An dieser Stelle wollen wir mit drei Beispielen einerseits die Grenzen, andererseits den Nutzen des Modells qualitativ illustrieren.

(1) Gebäudedämpfung. Diese ist v.a. im urbanen Raum zentral und mitbestimmend für die Festlegung der Sendestärke einer Antenne. Grössere Senderadien bedeuten in der Regel mehr Dämpfung durch Gebäude (im Vergleich zu kleineren Senderadien). Das wird durch höhere Sendeleistung kompensiert. Aus diesem Grund kann ein kleinzelliges Netz im konkreten Fall eine tiefere durchschnittliche Exposition der Bevölkerung aufweisen als ein grosszelliges Netz.

(2) Kapazität, Fall 1: Vergleich kleinzellig vs. grosszellig bei konstantem Datenverkehr
Kleinzellige Netze haben eine höhere Kapazität im Vergleich zu grosszelligen Netzen. Eine Basisstation sei voll ausgelastet. Stehen anstelle dieser Station 5 Kleinzellen zur Verfügung, so wird jede dieser Kleinzellen (bei gleicher Funktechnologie und Daten-Nachfrage) nur zu 20% ausgelastet sein. Das durchschnittliche Immissionsniveau des Datenverkehrs ist somit im kleinzelligen Netz 5 Mal tiefer.

(3) Kapazität, Fall 2: Vergleich Kapazitätszubau an bestehenden vs. neuen Standorten
In einer Region werde 5G eingeführt. 5G wird zunächst dieselben Frequenzen nutzen und eine vergleichbare Zellenstruktur besitzen wie die bisherigen Mobilfunk-Generationen. Wird die benötigte neue Kapazität an bestehenden Standorten montiert (Situation A), werden die Immissionen den höheren Antennenleistungen entsprechend steigen. Werden die Kapazitäten an neuen Standorten in der Nähe der bisherigen Anlagen montiert (Situation B), werden die Antennenleistungen dieser Standorte in etwa den zusätzlich montierten Leistungen in Situation A entsprechen (ähnliche Umgebungs- und Sendeparameter). Die durchschnittlichen Immissionen der zwei Situationen unterscheiden sich deshalb nicht. Im Umfeld der Anlagen in Situation A sind die Pegel jedoch höher, dafür an entfernteren Orten tiefer als in Situation B mit insgesamt mehr Anlagen.

Fazit: Die für die funktechnische Versorgung eines Gebietes notwendige durchschnittliche Feldstärke von kleinzelligen und grosszelligen Netzen ist, mit dem einfachsten denkbaren Modell gerechnet, identisch. Kein Netztyp (grosszellig, kleinzellig, Kombination) hat in dieser Hinsicht einen prinzipiellen Vorteil gegenüber einem anderen Netztyp.

Basisstationen mit grosser Sendeleistung weisen natürlich in ihrem näheren Umfeld höhere Pegel auf als kleine Basisstationen in ihrer Nähe. Dafür sind aber bei einem „grossen“ Standort die nötigen Empfangspegel in weiter Entfernung tiefer im Vergleich mit einem kleinzelligen Netz, das an diesen Orten Sendeantennen benötigt.

Für Aussagen zu konkreten Situationen muss die Betrachtung mit Topographie, Gebäuden, Bevölkerungsverteilung und vor allem mit der Netz-Kapazität erweitert werden. Dann können sich Netze hinsichtlich der durchschnittlichen Bevölkerungsexposition aus Anlagen deutlich unterscheiden. Bei einem gegebenen Verkehrsaufkommen schneidet ein kleinzelliges Netz immer besser ab als ein grösserzelliges.



Anhang: Analytische Betrachtung

Dieser Anhang zeigt als Ergänzung zum Gesagten noch eine analytische Betrachtung zur mittleren Feldstärke einer einzelnen (idealisierten) Antenne.

Die Feldstärken E_{\min} und E_{\max} bestimmen zwei Radien. Es seien $E(r_0) = E_{\max}$ und $E(r_n) = E_{\min}$. Unterstellt man ein $1/r$ -Verhalten, dann gilt:

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{r_0}{r_n}$$

Definiert man die Feldstärken, kann man nur einen Radius frei wählen. Wir geben den nahen Radius r_n vor und finden $r_0 = r_n \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$. Nun sei:

$$E(r) = \begin{cases} E_{\max}, & \text{falls } r < r_n \\ E_{\max} \frac{r_n}{r} = E_{\min} \cdot \frac{r_0}{r}, & \text{sonst} \end{cases}$$

Der Flächenmittelwert der Befeldung in einem Kreis mit Radius $R > r_n$ lautet:

$$\begin{aligned} E_{\text{mittel}} &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R E(r) 2\pi r dr = \frac{2}{R^2} \left(\int_0^{r_n} E_{\max} r dr + \int_{r_n}^R E_{\max} r_n dr \right) = \frac{2E_{\max}}{R^2} \left(\frac{r_n^2}{2} + r_n(R - r_n) \right) \\ &= \frac{E_{\max} r_n}{R^2} (2R - r_n) = \frac{E_{\min} r_0}{R^2} (2R - r_n). \end{aligned}$$

Setzt man noch $R = r_0$, dann ergibt sich:

$$E_{\text{mittel}} = 2E_{\min} \left(1 - \frac{r_n}{2r_0} \right) = 2E_{\min} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right) \approx 2E_{\min}.$$

Die mittlere Befeldung im Versorgungsgebiet ($r < r_0$) ist somit unabhängig von der Antennenreichweite etwa gleich der doppelten Minimalfeldstärke.