

Emissionen von Mobilfunkbasisstationen

Vergleich berechneter Werte mit Messungen vor Ort

Wer in der Schweiz eine Mobilfunkbasisstation bauen will, muss für die Genehmigung darlegen, dass die Belastung durch elektromagnetische Strahlung die vom Bund bestimmten Grenzen einhält. Die Fachhochschule Supsi verglich im Tessin diese berechneten Werte mit den effektiven Feldstärken, die später im Betrieb auftreten. Die Datengrundlage bilden 91 Kontrollmessungen, die zwischen 2000 und 2005 ausgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass die Messwerte teilweise massiv von den berechneten Werten abweichen – meist aufgrund der limitierten Dämpfung in der Berechnungsmethode oder der Reflexionen an Gebäuden.

Die Verordnung über den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (NISV) [1] verfolgt auf der Basis des Umweltschutzgesetzes das Ziel, die Bevölkerung vor möglichen schädlichen oder lästigen Auswirkungen von Strahlung zu schützen. Die NISV bezieht sich auf Festinstalltionen wie Starkstromleitungen, Radio- oder Fernsehantennen, Mobilfunksendeanla-

A. Salvadè, A. Bernasconi, G. Bernasconi, M. Della Vecchia, M. Lanini

gen oder Telepage, die nicht ionisierende Strahlung im Frequenzbereich von 0 bis 300 GHz erzeugen. Die NISV definiert zwei Typen von Grenzwerten (Tabelle I):

Der Immissionsgrenzwert (IGW) gilt an allen Orten, wo sich Personen aufhalten können (sogenannte Orte für den kurzfristigen Aufenthalt, OKA). Er entspricht der Empfehlung der internationalen Kommission für den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (ICNIRP), die den Grenzwert auf die thermische Wirkung von nicht ionisierender Strahlung basiert.

Der strengere Anlagegrenzwert (AGW) gilt an Orten – meistens in Gebäuden – wo sich Menschen regelmässig während längerer Zeit aufhalten. Zu diesen sogenannten Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) zählen Wohnungen, Arbeitsplätze oder Schulen. Der Anlagegrenzwert ist ein Vorsorgegrenzwert, der Unsicherheiten über gesundheitliche Auswirkungen der Strahlung bei tieferen Intensitäten berücksichtigt.

Für die Umsetzung der NISV hat das Bundesamt für Umweltschutz (Bafu) Vollzugshilfen und unterstützende Instrumente erarbeitet. Dazu zählt das Standortdatenblatt, das die Grundlage für eine Bewilligung einer neuen oder geänderten Sendeanlage darstellt. Im Standortdatenblatt sind diejenigen OKA und OMEN auszuweisen, bei denen die Immission – verursacht durch die Anlage – gemäss der rechnerischen Prognose am höchsten sein wird.

Nach der Inbetriebnahme einer Sendeanlage kann die zuständige kantonale Stelle eine Kontrollmessung verlangen. Im Kanton Tessin werden dabei alle berechneten OKA und OMEN gemessen, teilweise verlangt die Kontrollinstanz Messungen an zusätzlichen Punkten. In ihrer Messempfehlung für Mobilfunkbasisstationen empfiehlt das Bundesamt für Umwelt (Bafu), Messungen bei denjenigen OMEN zu verlangen, bei denen die berechnete Immission über 80% des Anlagegrenzwertes beträgt.

Vereinfachte Berechnung

Die rechnerische Prognose der Immission an einem ausgewählten Ort geht vom Idealzustand aus – einem luftleeren Raum. Reflexionen oder Dämpfungen der Strahlung werden weitgehend vernachlässigt, sie spielen in der Realität aber eine wichtige Rolle. Die Verlässlichkeit von Simulationen ist aus diesem Grund eingeschränkt. Die Qualität der Berechnung hängt massgeblich von der



Bild 1 Mobilfunkbasisstation

Qualität der Parametrisierung des Modells ab (Höhenunterschied und Distanz des berechneten Punktes zur Antenne, Antenneneinstellungen wie Sendeleistung, Azimut, Elevation usw.).

In der Berechnung wird die maximal bewilligte Sendeleistung eingesetzt. Gerade im Bereich Mobilfunk werden jedoch viele Antennen mit einer reduzierten Sendeleistung betrieben. Damit die Messwerte im Ist-Zustand einer Antenne mit den berechneten Werten vergleichbar sind, müssen diese auf die maximal bewilligte Leistung hochgerechnet werden. Die für die Messungen im Tessin gebrauchten Messinstrumente sind in Tabelle II verzeichnet.

Für die Interpretation der Studie ist zu bemerken, dass bis Juni 2002 bei der Berechnung der Immissionen eine Messungenauigkeit von 35% angenommen wurde. Nach der Revision der NISV wurde von diesem Vorgehen abgesehen.

Die Messmethoden

Jede GSM-Zelle übermittelt ein Signal, das sich aus einem Signalisierungskanal (BBCH) mit einer konstanten Sendeleistung und aus einem oder mehreren Gesprächskanälen TCH zusammensetzt (Bild 2). Die Leistung des BBCH ist typischerweise höher als jener der assoziierten TCH. Da die TCH-Leistung von der

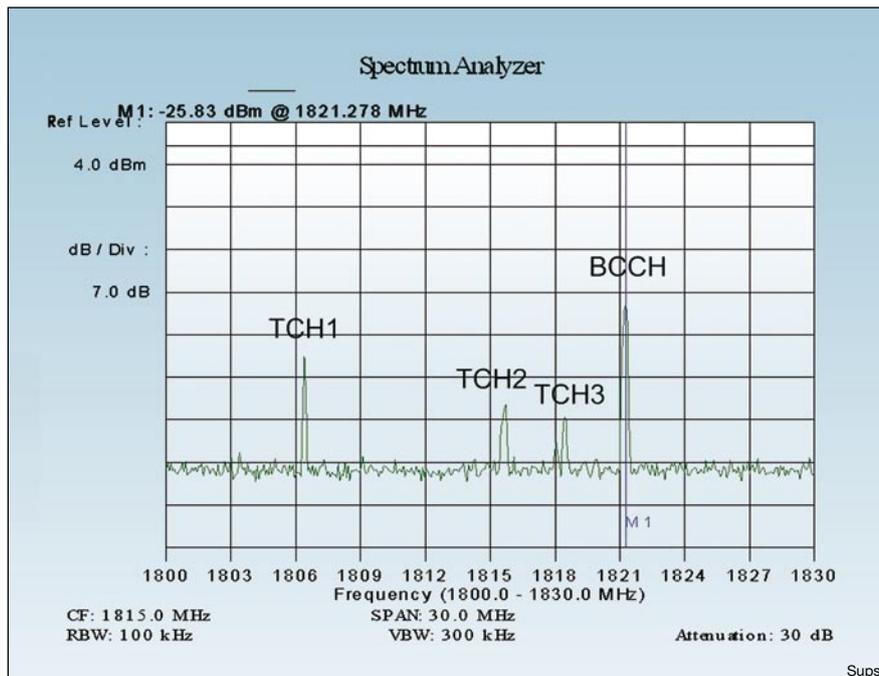


Bild 2 GSM-Spektrum

Benutzung abhängt, verlangen die Empfehlungen des Bafu zur Messung ausschliesslich die Analyse des BCCH-Kanals [2]. Dessen Feldstärke wird hochgerechnet auf die Anzahl Kanäle der Antenne sowie auf die maximale Sendeleistung (ERP), die im Standortdatenblatt [3] des Bafu deklariert ist. Diese Projektion wird anhand des Berichtigungsfaktors K_i wie folgt definiert:

$$K_i = \sqrt{\frac{ERP_{i, MAX}}{ERP_{i, BCCH \text{ istwert}}}}$$

Bei einer oder mehreren Zellen ist es möglich, das totale elektrische Feld E_{tot} eines Punktes mit folgender Formel zu berechnen:

$$E_{tot} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (E_i \cdot K_i)^2}$$

wobei

- K_i : Berichtigungsfaktor für die Zelle i
- $ERP_{i, BCCH \text{ istwert}}$: Sendeleistung (ERP) im Moment der Messung der Zelle i
- $ERP_{i, MAX}$: Deklarierte Sendeleistung der Zelle i
- m: Anzahl Zellen der Anlage
- E_i : Elektrisches Feld des BCCH, gemessen für die Zelle i (V/m)

5-jährige Messperiode

In der 5-jährigen Betrachtungsperiode wurden über 100 Anlagen mit unterschiedlichen Eigenschaften untersucht. Dazu gehören Anlagen in städtischem und ländlichem Gebiet, Anlagen mit unterschiedlicher Anzahl und Art von

Antennen oder unterschiedlicher Sendeleistung. In der Studie wurden ausschliesslich jene Anlagen miteinbezogen, bei denen seit 2001 Messungen durchgeführt wurden, da die Berechnung der Immission von Mobilfunkanlagen erst zu diesem Zeitpunkt eingeführt wurde. Insgesamt bezieht sich die Studie auf 91 Antennen und 400 OMEN.

Messwerte generell tiefer

Bild 3 vergleicht die Messwerte mit den berechneten Grössen. Theoretisch müssten die Messwerte mit den simulierten Werten übereinstimmen – also auf der Diagonalen liegen. Die meisten Messwerte liegen aber unter den berechneten Werten. Sie korrelieren nicht miteinander. Statistische Auswertungen zeigen, dass

die Werte im mittleren Bereich (Strahlungsintensität zwischen 2 und 4 V/m) noch etwas besser übereinstimmen als unterhalb von 2 V/m und oberhalb von 4 V/m, wo überhaupt kein Zusammenhang besteht.

Insgesamt wurde bei 22 Messpunkten eine Grenzwertüberschreitung festgestellt. Interessant ist, dass bereits bei OMEN mit mittlerer prognostizierter Immission die Grenzwerte überschritten wurden. Ein Vergleich der verschiedenen Dienste (GSM 900, GSM 1800 und UMTS) zeigt keine feststellbaren Unterschiede.

Bei Installationen mit gemischter Technologie (GSM 900 und DCS 1800) ist die Beziehung zwischen den Messwerten und den berechneten NIS-Immissionen allerdings grösser als bei Installationen mit nur einer Technologie.

Bild 4 zeigt die Abweichung vom berechneten Wert, wobei auf der x-Achse nicht der berechnete Wert direkt, sondern dessen Grösse im Verhältnis zum Grenzwert berücksichtigt wird. Auf diese Weise lassen sich alle Werte, unabhängig vom jeweiligen Grenzwert, in einer Grafik darstellen. Die Grafik zeigt, dass im Allgemeinen die gemessenen Werte tiefer sind als die berechneten Werte. Weiter wird deutlich, dass Grenzwertüberschreitungen bereits bei OMEN festgestellt wurden, wo die berechneten Werte lediglich 60% des AGW betragen. Dies ist in Bild 5 (Zoom) noch deutlicher ersichtlich.

Wie Tabelle III zeigt, wurden zirka 30% aller Grenzwertüberschreitungen bei OMEN festgestellt, bei denen die rechnerische Prognose zwischen 60% und 80% des Grenzwertes liegt.

Für die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung sind nach Auffassung des Supsi folgende Ursachen verantwortlich:

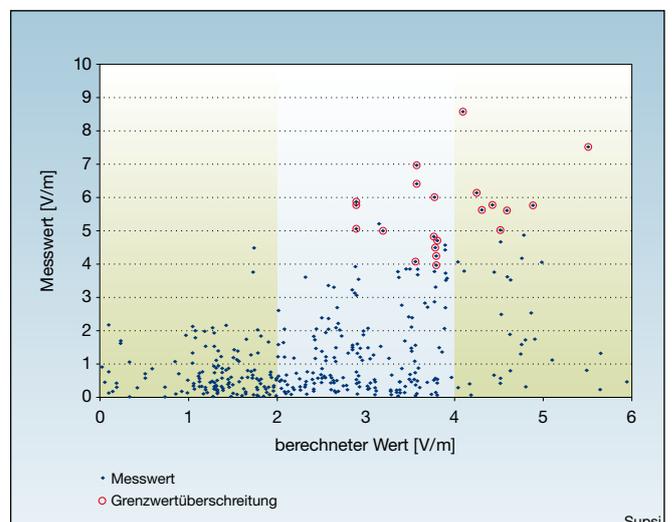


Bild 3 Gegenüberstellung zwischen Messwerten und berechneten Werten

Frequenz	AGW [V/m]	IGW [V/m]
GSM 900 MHz	4	41
GSM 1800 MHz	6	58
UMTS	6	63
GSM 900 + 1800 MHz	5	41-63*
Pager (147/169 MHz)	3	28

* Bei gemischten Anlagen werden die Strahlungen einzeln für jede angewandte Technologie gemessen, um den prozentualen Emissionswert zu erhalten. Für den Gesamtwert der Anlage werden die einzelnen Werte addiert.

Tabelle I Grenzwerte für Mobilfunkbasisstationen und Telepage

Instrument	Hersteller	Art
Spectrum Analyzer	Anritsu	Site Master S332B
Spectrum Analyzer	Rohde & Schwarz	FSH3
Antenne	Rohde & Schwarz	HE200

Tabelle II Eingesetzte Messinstrumente

Berechneter Wert AGW	Messpunkte, die AGW nicht einhalten	Mobilfunkbasisstationen, die AGW nicht einhalten
60-80%	7 (32%)	5 (39%)
80-100%	15 (68%)	12 (71%)

Tabelle III Statistik der Grenzwertüberschreitungen

Gruppe	Anzahl Anlagen	AGW eingehalten	AGW überschritten
A	33 (36%)	23	10
B	37 (41%)	31	6
C	21 (23%)	19	2
Total	91 (100%)	73	18

Tabelle IV Aufteilung der Anlagen in die drei Untergruppen

- Rechnungsmethode (Vereinfachung der Realität, z.B. indem Reflexionen oder Dämpfungen unberücksichtigt bleiben)
- Standortparameter (fehlerhafte Angaben zu Distanz und Höhendifferenz zu den Antennen in der Berechnung)
- Antenneneinstellungen (fehlerhafte Angaben zu Azimut, Elevation, Sendeleistung usw. in der Berechnung)

Die untersuchten Sendeanlagen wurden entsprechend dieser Typen in drei Gruppen aufgeteilt. In der ersten Gruppe (A) sind Anlagen, bei denen sich berechneter und gemessener Maximalwert im selben Gebäude befinden. In dieser Gruppe sind die Simulationsparameter wahrscheinlich korrekt. Dennoch gibt es

Situationen, in denen der AGW überschritten wurde. Das ist mit grosser Wahrscheinlichkeit der Rechnungsmethode zuzuschreiben, in der die Realität vereinfacht wurde. Allenfalls können auch abweichende Antennenparameter für die Unterschiede verantwortlich sein, z.B. indem das Azimut nicht korrekt eingestellt wurde.

Die zweite Gruppe (B) bilden Installationen, bei denen sich der gemessene Maximalwert nicht in dem bei der Simulation prognostizierten Gebäude befindet, aber gleichwohl einem der im Standortdatenblatt berechneten Punkt entspricht. Wie bei der ersten Gruppe ist die Auswahl der OMEN korrekt. Dennoch ist es möglich, dass die verwendeten Parameter (Höhe der OMEN, Distanz zu den Antennen usw.) fehlerhaft sind.

Die dritte Gruppe (C) sind Installationen, bei denen der errechnete Maximalwert keinem Ort entspricht, der im Standortdatenblatt berechnet wurde. In dieser Gruppe können etliche Schätzungsfehler für Abweichungen zwischen Berechnung und Messung verantwortlich sein. Vor allem ist die Auswahl der OMEN nicht korrekt.

Tabelle IV zeigt die Aufteilung in die drei Gruppen A, B und C. Bei 6% der gemessenen OMEN, d.h. bei 18 Anlagen, wird der Anlagegrenzwert überschritten.

Schlussfolgerung

Beim Vergleich der Messwerte mit den berechneten Werten fällt auf, dass bei der Berechnung die Strahlungsintensität überdimensioniert wird: Bei 65% der untersuchten Messpunkte liegen die Messwerte deutlich tiefer als die berechneten Werte, bei 20% liegen sie über den berechneten Werten, und bei den übrigen Messpunkten liegen beide Werte in derselben Grössenordnung. Einer der Gründe, weshalb die berechneten Werte im Allgemeinen höher sind als die Messwerte, liegt darin, dass definitionsgemäss mit einer maximalen Richtungsabschwächung von 15 dB gerechnet wird, obwohl die Richtungsabschwächung teilweise deutlich höher ist.

Die Unterteilung in Gruppen erlaubt, die Probleme bei der Anwendung von mathematischen Modellen aufzuzeigen. Folgende Faktoren können für diese Ungenauigkeiten verantwortlich sein:

- Reflexionen und Dämpfung der Strahlung
- Berechnung mit falscher Höhendifferenz zwischen Antenne und Messwert
- Schwierigkeiten der mechanischen Integration der Antennen mit genauem Tilt und Azimut

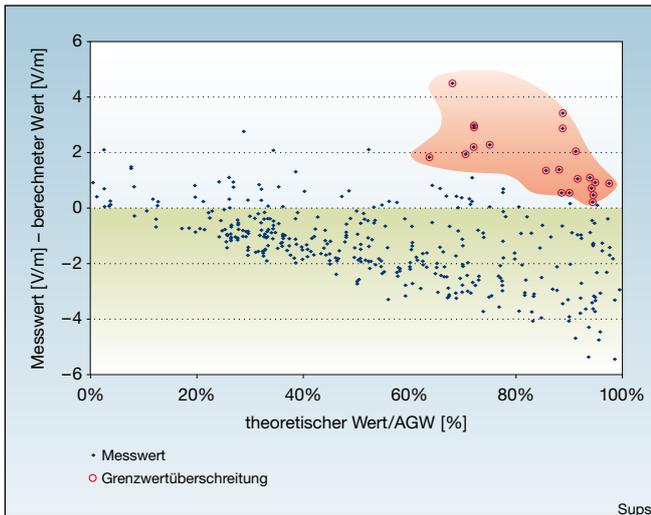


Bild 4 Vergleich der Punkte (ohne Berücksichtigung der Technologie)

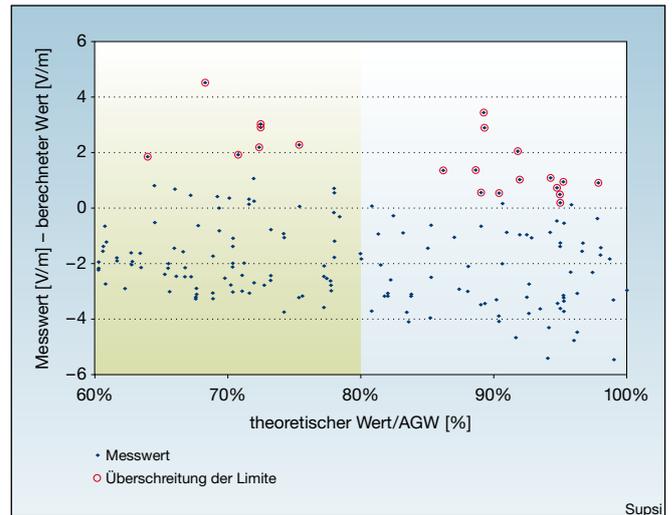


Bild 5 Zoom: Vergleich der Messpunkte ohne Berücksichtigung der Technologie

Supsi: Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana

Die Fachhochschule der italienischsprachigen Schweiz (Supsi) betreibt seit ihrer Entstehung im Jahr 1997 Forschung, Entwicklung und Technologietransfer zusammen mit industriellen Partnern. Seit 1998 entwickelt die Supsi Mikrowellensysteme für die berührungsfreie Erkennung von Materialien, Module für die Datenübermittlung und beschäftigt sich intensiv mit dem Thema der nicht ionisierenden Strahlung. Die Supsi ist durch das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS/SAS) für Messungen von GSM- und UMTS-Antennen akkreditiert. Die Abteilung TTHF der Supsi hat den Auftrag erhalten, Studien für Messvorgänge bei Produkten der Mobiltelefonie der dritten Generation (UMTS) durchzuführen, die heute in der Messempfehlung für Mobilfunkbasisstationen (UMTS) enthalten sind.

Seit 2000 führt die Supsi im Auftrag des Kantons Tessin (Dipartimento del territorio del Cantone Ticino) Messungen von Mobilfunkbasisstationen durch. Das Ziel besteht darin, einen kantonalen Kataster aller Antennen unter Angabe der jeweils verursachten Immissionen aufzunehmen. Anhand dieses Katasters sollen diejenigen Antennen ausfindig gemacht werden, bei denen Grenzwertüberschreitungen vorliegen. Heute beschäftigt sich die Supsi – unter anderem in Zusammenarbeit mit dem Kanton Tessin (Ufficio prevenzione rumori) – mit der Entwicklung eines Messsystems für ein permanentes Monitoring nicht ionisierender Strahlung.

Giovanni Bernasconi, dipl. El.-Ing. ETH, war bei der Firma Landis & Gyr und bei der Groupe de physique appliquée der Universität Genf tätig. Seit 1991 arbeitet er bei der kantonalen Verwaltung des Tessins, seit 1998 im Bereich NIS. Seit Januar 2006 ist er Leiter des Amtes für Umweltschutz vom Kanton Tessin.

Dipartimento del territorio del Cantone Ticino, 6501 Bellinzona, giovanni.bernasconi@ti.ch

Mario Della Vecchia, dipl. El.-Ing. FH, ist seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung TTHF an der Fachhochschule in Manno.

Supsi-TTHF, 6928 Manno, mario.dellavecchia@supsi.ch

Matteo Lanini, dipl. El.-Ing. FH, ist seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung TTHF an der Fachhochschule in Manno.

Supsi-TTHF, 6928 Manno, matteo.lanini@supsi.ch

– Logistische Probleme (Vorhandensein von Gebäuden mit ihrer Morphologie wie z.B. Materialien der Wände, Position der Fenster gegenüber der Anlage, Inneneinrichtung)

Die Resultate zeigen, dass es nicht genügt, die Maximalwerte zu messen, wie dies in der Empfehlung des Bafu vorgeschlagen wird. Bei Messungen empfehlen wir eine vertiefte Bewertung der Situation vor Ort. Bei Abnahmemessungen sollten alle Punkte gemessen werden, bei denen die berechneten Werte über 60% des Anlagegrenzwertes liegen.

Referenzen

[1] Schweizerische Eidgenossenschaft: Verordnung über den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (NISV), 1. Februar 2000

[2] Bafu: Mobilfunk- und WLL-Basisstationen, Vollzugsempfehlung zur NISV, 2002

[3] Bafu: Standortdatenblatt für Mobilfunk- und WLL-Basisstationen, Anhang 1 zu [2]

Angaben zu den Autoren

Andrea Salvadè, dipl. El.-Ing. ETH, ist seit 2001 ordentlicher Professor für Telekommunikation und Hochfrequenz an der Fachhochschule der italienischen Schweiz (Supsi) in Manno. Seit 2001 ist er Leiter der wissenschaftlichen Abteilung TTHF (Telecom, Telematik und Hochfrequenz) an der Fachhochschule in Manno.

Supsi-TTHF, 6928 Manno, andrea.salvade@supsi.ch

Dr. **Angelo Bernasconi** ist seit 2004 Professor an der Fachhochschule der italienischen Schweiz (Supsi) in Trevano. Er ist Direktor des Institute of Applied Sustainability to the Built Environment (ISAAC) der Supsi. Seit 2001 ist er Mitglied der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene. *ISAAC-Supsi, 6952 Canobbio, angelo.bernasconi@supsi.ch*

Résumé

Les émissions des stations de base de téléphonie mobile

Comparaison des valeurs calculées aux mesures sur place. Avant de construire une station de base de téléphonie mobile en Suisse, il faut, pour obtenir l'autorisation, démontrer que l'impact du rayonnement électromagnétique sera dans les limites fixées par la Confédération. La Haute école spécialisée Supsi a comparé au Tessin ces valeurs calculées aux champs effectivement mesurés ultérieurement en service. La base de données est constituée à partir de 91 mesures de contrôle effectuées entre 2000 et 2005. Il s'avère que les valeurs mesurées s'écartent en partie largement des valeurs calculées – généralement en raison de l'atténuation limitée et des réflexions sur les bâtiments.