



## Expertise

### Kontrolle der abgestrahlten Leistung (ERP) von Mobilfunk-Basisstationen



Quelle Nokia

**Laut Bundesgericht hat die Bevölkerung ein Anrecht darauf, sicher zu sein, dass die bewilligten abgestrahlten Leistungen von Mobilfunknetzen nicht überschritten werden. Das mit alleinigen Hardwarekontrollen zu bewerkstelligen, ist mit den heutigen modernen Sendersystemen wenig zweckmässig und könnte die Betriebskosten massiv ansteigen lassen. Daher bietet sich an, die durch Software gesteuerten Einstellungen zentral einzusehen und deren Zuverlässigkeit mit einem Qualitätssicherheitssystem sicherzustellen. Damit wären effiziente und umfassende Kontrollen möglich, welche den Betrieb eines Netzes kaum einschränken würden.**

Für den Bericht: BAKOM/Fachstelle EMV/EMVU, dipl. EI.-Ing. ETH Markus Riederer, 30.09.05

An: CercI'Air, Arbeitsgruppe NIS, c/o AWEL/LH, H. Limacher, Zürich

Kopie an: BS/BL: G. Theis, SICTA: C. George, BAKOM: vau, pap, hop, bur

## Inhaltsverzeichnis

|     |                                                             |   |
|-----|-------------------------------------------------------------|---|
| 1   | Ausgangslage .....                                          | 1 |
| 2   | Aufbau von Mobilfunk-Systemen .....                         | 2 |
| 2.1 | Fernsteuerung und -wartung der Sendeeinheiten.....          | 3 |
| 2.2 | Aufbau einer Sendeeinheit (BTS) .....                       | 4 |
| 3   | Kontrollmöglichkeiten.....                                  | 6 |
| 3.1 | Alleinige Kontrolle der Hardware.....                       | 6 |
| 3.2 | Kontrolle der Hardware und ihrer Softwareeinstellungen..... | 7 |
| 4   | Schlussfolgerungen .....                                    | 8 |
| 5   | Literaturverzeichnis.....                                   | 9 |

## 1 Ausgangslage

Will ein Betreiber eines Mobilfunknetzes Sendeanlagen aufstellen, so muss er u.a. darlegen, dass er die Bestimmungen der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV [ 1 ]) einhält. Das BUWAL hat dazu Vollzugsempfehlungen herausgegeben [ 2 ]. Laut ihnen müssen die Charakteristiken der abgestrahlten Leistungen (ERP) beschrieben und diese zur Berechnung der grösst möglichen Expositionen verwendet werden. Das Bundesgericht hat nun im Urteil vom 10. März 2005 (1A.160/2004 /ggs [ 3 ]) festgestellt, dass die abgestrahlte Leistung prinzipiell auf der maximal möglichen Leistung des Senders basieren soll, also einzig begrenzt durch die Hardwareausstattung des Senders ([ 3 ] Kapitel 3.3). Das Bundesgericht lässt jedoch die Möglichkeit offen, von diesem Grundsatz abzuweichen, falls dargelegt werden kann, dass die Einhaltung der maximal bewilligten ERP gewährleistet wird.

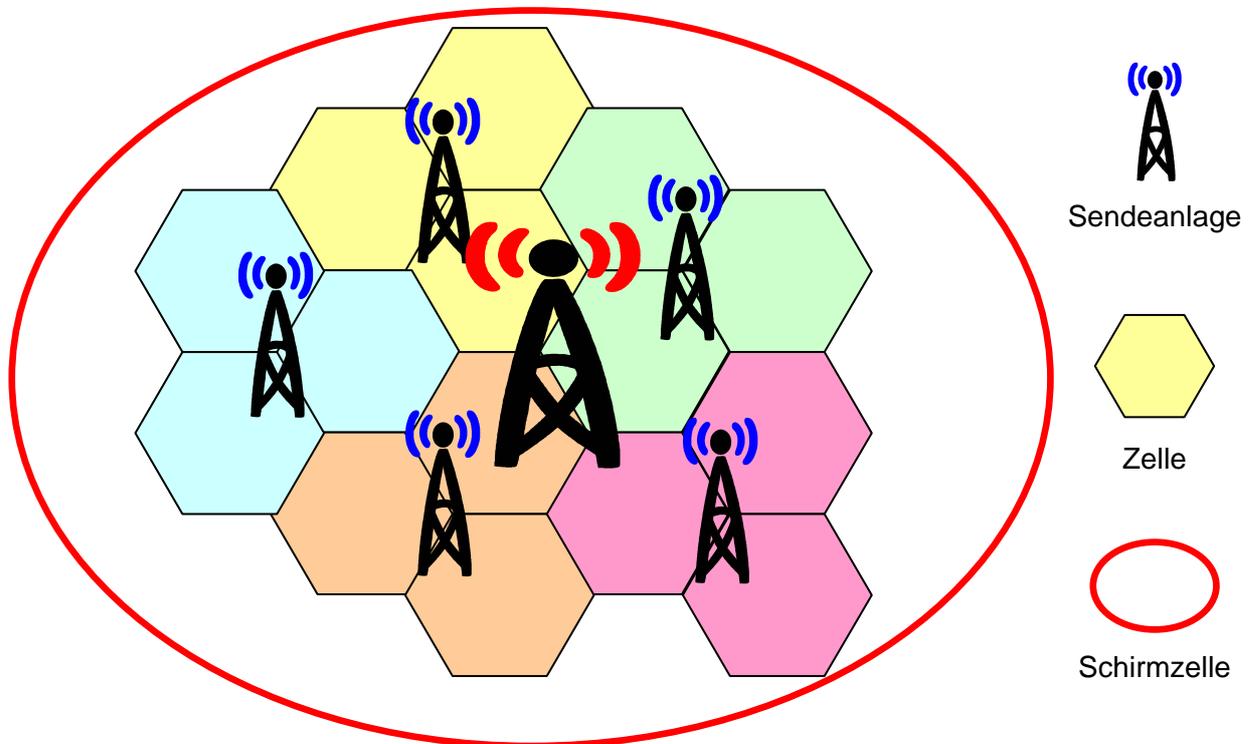
Im Brief vom 20. Juni 2005 [ 4 ] bat der Cercl'Air (Arbeitsgruppe NIS) das BAKOM, die Konsequenzen dieses Bundesgerichtsentscheides zu untersuchen und Alternativen aufzuzeigen.

Dem ist das BAKOM nachgekommen und hat die vorliegende Expertise verfasst: Sie beschreibt zuerst den Aufbau eines Mobilfunknetzes, insofern er für die Steuerung der Sendeleistung massgebend ist. Dann wird auf die Problematik einer Kontrolle der abgestrahlten Leistung eingegangen, welche einzig auf den Hardwareelementen beruht. Schliesslich wird ein alternatives Verfahren zur Kontrolle vorgestellt, welches die Softwaresteuerung mit einbezieht.

## 2 Aufbau von Mobilfunk-Systemen

Mobilfunksysteme sind grundsätzlich ähnlich aufgebaut. Deshalb beschränken sich die Ausführungen dieses Kapitels auf GSM-Systeme. Grundlagen dazu sind beispielsweise in [ 5 ] beschrieben. Gespräche mit namhaften Basisstationsherstellern lieferten Informationen über den heutigen Stand der Technik. Um das unten Beschriebene auf UMTS anzuwenden, kann [ 6 ] herangezogen werden. Die Prinzipien der verschiedenen Kontrollarten bleiben jedoch gleich. Mobilfunksysteme sind hoch komplex und werden laufend dem Stand der Technik angepasst: alle Aufbaumöglichkeiten darzustellen geht deshalb über den Umfang dieses Berichtes hinaus. Demzufolge vereinfachen die untenstehenden Beschreibungen die Sachverhalte so weit als möglich.

Die heutigen Mobilfunksysteme sind in Zellen organisiert (Abbildung 1). Jede dieser Zellen wird von einer Sendeeinheit versorgt (BTS: Base Transceiver Station). Im Allgemeinen werden drei Zellen von einer Sendeanlage aus versorgt. Kleinere Zellen können von grösseren, so genannten Schirmzellen, überlagert sein (rot in Abbildung 1).



**Abbildung 1: Zellenstruktur von Mobilfunksystemen**

Die Zellen können verschieden gross sein. Einmal auf Grund der verschiedenen Umgebungsverhältnisse, aber vor allem aus Kapazitätsüberlegungen. Weil die maximale Kapazität pro Zelle aus technischen Gründen beschränkt ist, kann die Kapazität eines Netzes pro Flächeneinheit nur erhöht werden, indem grosse Zellen in mehrere kleinere aufgeteilt werden. Die Netzbetreiber passen die Zellenstruktur den Kundenbedürfnissen an: neue Netze bestehen vorerst aus wenigen grossen Zellen. Dort wo viel Verkehr anfällt, werden vermehrt kleine Zellen geschaffen. Dabei achtet ein Netzbetreiber darauf, dass jede Sendeeinheit möglichst wenig Leistung abstrahlt. So kann die Reichweite einer Zelle in Grenzen gehalten und die belegte Frequenz in weiter entfernten Zellen wieder verwendet werden. Die Uebertragungsparameter der Sendeeinheiten stimmt der Netzbetreiber so aufeinander ab, dass die Versorgung einer Zelle möglichst wenig ins Gehege mit den anderen Zellen kommt. Kom-

men neue Dienste auf, welche auf dem gleichen Uebertragungsnetz funktionieren wie SMS<sup>1</sup>, GPRS<sup>2</sup>, HSCSD<sup>3</sup> oder Positionsbestimmungsverfahren, so können sich die Kundenbedürfnisse ändern und der Netzbetreiber passt sein Netz wiederum an.

## 2.1 Fernsteuerung und -wartung der Sendeeinheiten

Die gesamte Zellenstruktur ist stark von jeder einzelnen Zelle abhängig: ändern sich die Parameter einer Zelle, so kann das Auswirkungen auf das ganze Netz haben. Deshalb nimmt ein Netzbetreiber Änderungen an der Netzstruktur nur periodisch vor: in der Regel alle 2 bis 3 Monate. Die Änderungen müssen gleichzeitig erfolgen, damit das Netz sofort wieder möglichst optimal funktionieren kann. Dies ist nur automatisiert möglich, weil pro Netz und Betreiber in der Schweiz Sendeanlagen in der Grössenordnung von einigen Tausend in Betrieb stehen.

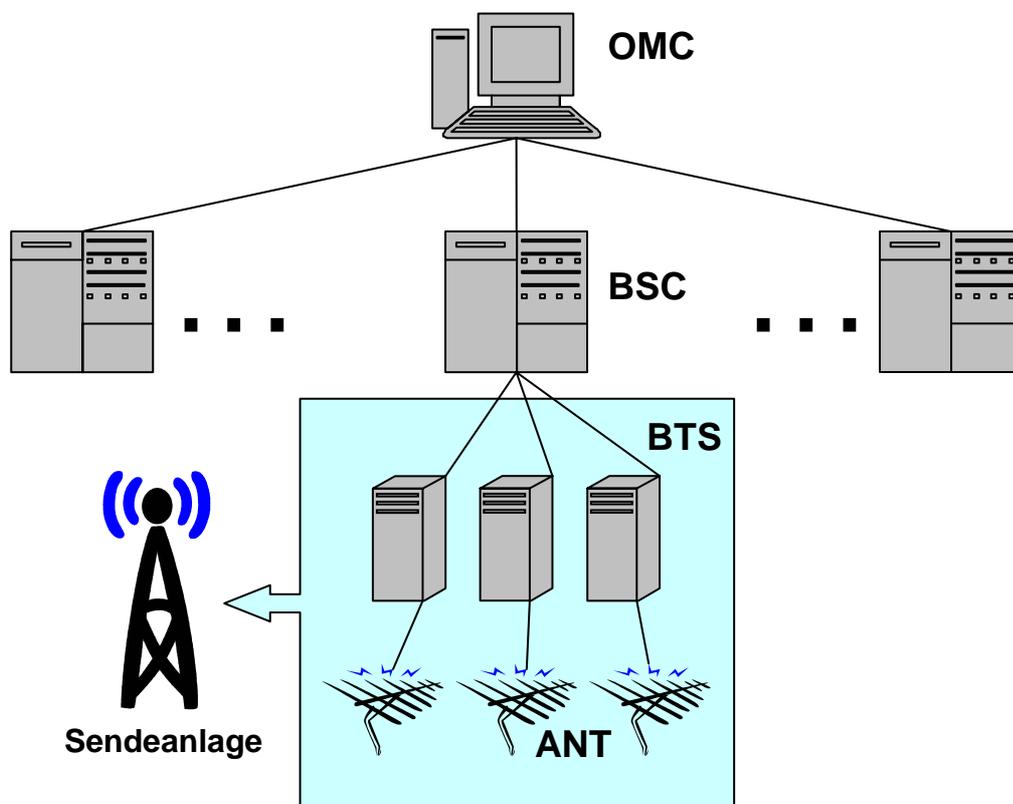


Abbildung 2: Steuerungsarchitektur

Abbildung 2 zeigt die Steuerungsarchitektur eines GSM-Mobilfunknetzes (damit die Darstellung übersichtlich bleibt, wurden die Nutzdatenpfade weggelassen): Das Steuerungszentrum (OMC: Operations and Maintenance Center) kontrolliert das ganze Netz. Die Sendeeinheiten (BTS: Base Transceiver Station) werden vom OMC über die BSC (Base Station Controller) gesteuert. Eine Sendeanlage kann aus mehreren Sendeeinheiten (BTS) bestehen. Das OMC selber kann den Status seiner Untereinheiten abfragen, den der BTS via die BSC.

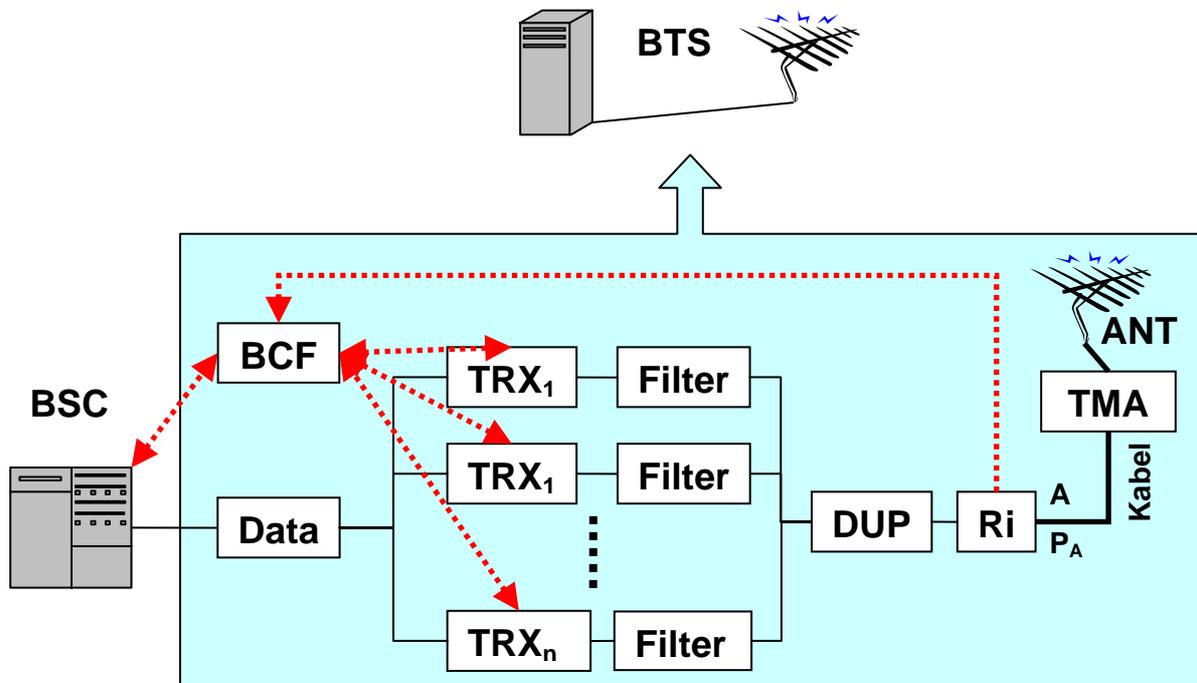
<sup>1</sup> Short Message Service: Kurzmitteilungen

<sup>2</sup> General Packet Radio Service: Datenübertragung

<sup>3</sup> High Speed Circuit Switched Data: Datenübertragung

## 2.2 Aufbau einer Sendeeinheit (BTS)

Abbildung 3 zeigt eine GSM-Mustersendeeinheit (BTS) mit den wichtigsten Bestandteilen. Je nach Anwendung sind andere Konfigurationen möglich; die Steuerungs- und Kontrollmöglichkeiten bleiben sich jedoch gleich. Im Gegensatz zu den gebräuchlichen Darstellungen von Herstellern wird die Kette bis zur Antenne beschrieben. Eine BTS beinhaltet im Zusammenhang dieses Berichtes also alle Einheiten, welche massgebend für die ERP sind.



|           |                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------|
| Data      | Nutzdatenaufteilung (bspw. Gespräche)           |
| ←- - - -> | Signalisierungsdaten (Steuer-/Messpfade)        |
| BCF       | Base station Control Function (Steuereinheit)   |
| TRX       | Transceiver (Sende-Empfänger)                   |
| DUP       | Duplexer (kombiniert/teilt Signale)             |
| Ri        | Richtkoppler (misst Leistungen)                 |
| $P_A$     | Ausgangsleistung                                |
| TMA       | Tower Mounted Amplifier (Empfangsvorverstärker) |
| ANT       | Antenne                                         |

**Abbildung 3: Aufbau Sendeeinheit (BTS)**

Die Basisstationssteuerung (BSC) tauscht mit der Sendeeinheit (BTS) Nutz- und Signalisierungsdaten aus. Die BTS verarbeitet die Signalisierungsdaten in der eigenen Steuereinheit (BCF). Von dort aus wird u.a. die Sendeleistung der Sende-Empfänger (TRX) eingestellt. Die Nutzdaten werden auf die verschiedenen Sende-Empfänger verteilt. Die resultierenden Hochfrequenzsignale passieren anschliessend Filter und werden im Duplexer (DUP) zusammengeführt. Ein Richtkoppler (Ri) misst die Leistung des Signals und prinzipiell wäre eine Rückmeldung an die Steuereinheit technisch möglich. Ueber ein Kabel wird das Ausgangssignal (mit der Leistung  $P_A$ ) zur Antenne geführt und erfährt dabei eine Dämpfung  $a_{k1}$ .

Dann passiert es den Empfangsvorverstärker (TMA), wo es zwar nicht verstärkt, aber vom Empfangssignal getrennt und somit weiter gedämpft wird ( $a_{TMA}$ ). Ueber ein weiteres Kabel (Dämpfung  $a_{k2}$ ) erreicht das Signal die Antenne (ANT), wo es mit einem Gewinn  $g$  in abgestrahlte Leistung (ERP) umgewandelt wird. Die ERP ist also folgendermassen von der Ausgangsleistung  $P_A$  abhängig:

$$ERP = \frac{P_A \cdot g}{a_{k1} \cdot a_{TMA} \cdot a_{k2}} = \frac{P_A \cdot g}{\prod_m a_m}$$

**Formel 1: Berechnung ERP aus Ausgangsleistung  $P_A$  <sup>4</sup>**

---

<sup>4</sup> Alle Dämpfungen  $a$  und Gewinne  $g$  werden als Faktoren angegeben. Werte in dB können wie folgt in Faktoren umgerechnet werden:  $Faktor = 10^{\frac{dB}{10}}$  (in Bezug auf Leistung).

### 3 Kontrollmöglichkeiten

Die Kontrollen sollen sicherstellen, dass die bewilligte abgestrahlte Leistung ( $ERP_{bew}$ ) nicht überschritten wird. (Mit  $ERP_{bew}$  ist  $ERP_n$  je einer Kolonne in Zusatzblatt 2 der Vollzugsempfehlung [ 2 ] gemeint. Alle  $ERP_n$  können sinngemäss behandelt werden.) Mit den jeweiligen Dämpfungen  $a_m$  und dem Antennengewinn  $g$  kann die bewilligte Ausgangsleistung  $P_{Abew}$  berechnet werden (Formel 1). Das heisst, die Spezifikationen aller Komponenten vom Richtkopplerausgang bis zur Antenne müssen bekannt sein. Die Summe der Leistungen der Sendempfänger  $P_{TRXi}$  verrechnet mit dem Produkt der Dämpfungen  $a_{ij}$  der nachgeschalteten Komponenten (Filter, Duplexer, Richtkoppler) muss kleiner gleich  $P_{Abew}$  sein:

$$\sum_i \frac{P_{TRXi}}{\prod_j a_{ij}} \leq P_{Abew}$$

**Formel 2: Bedingung für  $P_{TRXi}$  damit  $P_{Abew}$  nicht überschritten wird**

Formel 1 in Formel 2 eingesetzt: 
$$\sum_i \frac{P_{TRXi}}{\prod_j a_{ij}} \leq \frac{ERP_{bew} \cdot \prod_m a_m}{g}$$

**Formel 3: Bedingung für  $P_{TRXi}$  damit  $ERP_{bew}$  nicht überschritten wird**

Die Dämpfungen  $a_{ij}$  des Innenaufbaus der Sendeeinheit sind von der Konfiguration abhängig und können verschieden sein, sind aber bekannt.

#### 3.1 Alleinige Kontrolle der Hardware

Wird nur die Hardware kontrolliert, so müssen einmal die Dämpfungen bestimmt werden:  $a_{ij}$  aus den Herstellerangaben und  $a_m$  aus dem Aufbau der Installation. Der Gewinn  $g$  der Antenne ist ebenfalls spezifiziert. Die Leistungen der Sendempfänger (TRX) sind bei den heutigen Anlagen zwar vom Steuerungszentrum (OMC) aus über die BSC einstellbar (Abbildung 2 und Abbildung 3), können aber nicht über Hardwaremechanismen kontrolliert werden. Die einzige Begrenzung von  $P_{TRXi}$  liegt in der maximal möglichen Sendeleistung. TRX für Anlagen, welche den Anlagegrenzwerten unterliegen (Ziffer 6, Anhang 1 NISV [ 1 ]), werden nur noch mit 2 bis 3 verschiedenen maximalen Sendeleistungen gefertigt. So können die Fertigungskosten der TRX tief gehalten werden und die gleichen TRX sind universeller einsetzbar. Im verallgemeinerten Fall wird die benötigte Leistung  $P_{TRXi}$  kleiner als die maximal mögliche Leistung  $P_{maxTRXi}$  sein. Um nun sicherzustellen, dass die bewilligte  $ERP_{bew}$  nicht überschritten wird bei maximaler Softwareeinstellung, müsste der TRX mit maximaler Leistung betrieben und die überschüssige Leistung mit einem Dämpfungsglied reduziert werden. Das Dämpfungsglied am Punkt A (Abbildung 3) einzusetzen wäre sinnvoll, so dass nur ein einziges mit der Dämpfung  $a_z$  benötigt würde:

$$a_z = \frac{\sum_i \frac{P_{maxTRXi}}{\prod_j a_{ij}}}{\sum_i \frac{P_{TRXi}}{\prod_j a_{ij}}}$$

**Formel 4: Dämpfung  $a_z$  in Abhängigkeit gewünschten Sendeleistungen der TRX**

Formel 4 zeigt, dass jede Änderung der Leistung  $P_{\text{TRXi}}$  eines TRX eine Änderung des Dämpfungsgliedes zur Folge haben kann. In der Praxis würde das bedeuten, dass jede Neukonfiguration dazu führen kann, dass manuell das Dämpfungsglied auf einer Station geändert werden muss. Die heutigen gebräuchlichen Wartungs- und Fernsteuerverfahren wären nicht mehr möglich. Darunter würde einmal die Netzqualität leiden, zum ändern würden die Unterhaltskosten in die Höhe schiessen, weil u.a. die Kosten für Wartungstechniker, welche sich auf eine Station begeben müssen, hoch sind. Die Beschränkung auf alleinige Kontrollen der Hardware würde auch verhindern, wenn nicht gar verunmöglichen, zukünftige Smart Antennas (mit elektronisch steuerbarem Strahlungsverhalten, heute vor allem Tilt) einzusetzen.

### 3.2 Kontrolle der Hardware und ihrer Softwareeinstellungen

Das Steuerungszentrum (OMC) kann die Leistungen sämtlicher Sende-Empfänger (TRX) einstellen. Prinzipiell wären technisch auch Messungen der Ausgangsleistung  $P_A$  möglich. Für die Kontrolle der Kabel, des Empfangsvorverstärkers und der Antenne muss sowieso auf die Inventardaten des Netzbetreibers zurückgegriffen werden, es sei denn, zur Kontrolle wird der Mast bestiegen und die Sendeanlage abgeschaltet, was aber unverhältnismässig scheint. Die Bezeichnungen der eingesetzten TRX können vom OMC abgefragt werden; einige neuere Sendermodelle beinhalten auch Inventardateien, welche den ganzen Pfad von den TRX bis und mit der Antenne dokumentieren: eine Kontrolle vor Ort ist also nicht mehr unbedingt nötig. Ob die bewilligte ERP eingehalten wird, könnte also mit der nötigen Dokumentation im OMC kontrolliert werden. Folgende Massnahmen wären nötig:

1. Die Komponenten vom Ausgang A (Abbildung 3) bis und mit Antenne sind komplett dokumentiert (also u.a. auch Kabel und allfällige Empfangsvorverstärker).
2. Der Zusammenhang zwischen der Einstellung der Sendeleistung eines TRX und der daraus resultierenden Sendeleistung am Punkt A ist dokumentiert (dies liegt bei vorgefertigten Anlagen schon in der Dokumentation des Herstellers vor).
3. Der Prozess bei Anlageveränderungen an der Hardware ist definiert, die Verantwortlichkeiten sind festgelegt und die Änderungen dokumentiert.
4. Der Prozess bei Anlageveränderungen an der Software ist definiert, die Verantwortlichkeiten sind festgelegt und die Änderungen dokumentiert. Wichtig sind alle Änderungen, welche die ERP beeinflussen können: also u.a. die Anzahl und Leistungen der TRX. Hier könnte auch ein allfällig fernsteuerbarer Antennentilt und in ferner Zukunft die Fernsteuerung der Abstrahlrichtung berücksichtigt werden. Das hat zwar keinen Einfluss auf die ERP, berührt aber die Feldstärke an Orten mit empfindlicher Nutzung [ 1 ].
5. Die Software berechnet aus den eingestellten Leistungen der TRX die potentiell maximal mögliche abgestrahlte Leistung  $ERP_{\text{pot}}$  und vergleicht sie mit der bewilligten  $ERP_{\text{bew}}$ . Einstellungen der TRX, welche  $ERP_{\text{pot}} > ERP_{\text{bew}}$  zur Folge haben, sollen blockiert und gleichzeitig dokumentiert werden. Prozesse existieren, welche erlauben, derartige Einstellungsversuche zu reduzieren.
6. Optional kann aus der Leistung am Richtkoppler (sie entspricht der Leistung  $P_A$ ) mit den Spezifikationen der Uebertragungskette (Punkt 1)  $ERP_{\text{mess}}$  berechnet werden. Uebererschreitungen ( $ERP_{\text{mess}} > ERP_{\text{bew}}$ ) können dokumentiert und der Prozess zu deren Behebung definiert werden.  $ERP_{\text{mess}}$  wird bei grösseren Anlagen in den meisten Fällen unter  $ERP_{\text{pot}}$  zu liegen kommen, weil die Sender nur in den wenigsten Fällen mit maximaler Verkehrsleistung senden.  $ERP_{\text{mess}}$  zu erfassen kann dennoch sinnvoll sein, weil ein zweiter unabhängiger Mechanismus überprüft, ob  $ERP_{\text{bew}}$  eingehalten wird.

Prinzipiell entsprechen die obigen Punkte einem Qualitätssicherungssystem (QS-System). Das BAKOM könnte im Auftrag der Kantone nachprüfen, ob diese Punkte umgesetzt sind, beispielsweise als Fachexperte bei Audits bei schon vorhandenen QS-Systemen. Entsprechendes Know-how besitzt das BAKOM.

## 4 Schlussfolgerungen

Moderne zellulare Mobilfunknetze sind hoch komplex. Deren einzelne Komponenten sind räumlich von einander getrennt und deren Zusammenspiel muss notgedrungen ferngesteuert koordiniert werden. Deshalb verwundert nicht, dass heutige Sender prinzipiell keine manuellen Einstellungsmöglichkeiten vor Ort bieten, denn nur mit einer zentralen Steuerung kann sichergestellt werden, dass alle Komponenten optimal miteinander zusammenarbeiten.

Vor diesem Hintergrund ist zu verstehen, dass **alleinige Hardwarekontrollen** nicht alle Möglichkeiten ausschöpfen, um zu gewährleisten, dass die bewilligte abgestrahlte Leistung nicht überschritten wird. Demzufolge werden sich alleinige Hardwarekontrollen auf Worst-Case-Szenarien beschränken müssen. Das würde dazu führen, dass die Sender mit maximaler Leistung gefahren werden müssten. Weil heutzutage die Hersteller nur noch Sender in 2 bis 3 Sendeleistungskategorien anbieten, müsste die Sendeleistung der einzelnen Sender mittels nicht veränderbaren externen Komponenten angepasst werden, damit die einzelnen Zellen optimal nebeneinander funktionieren können. Konkret wären Dämpfungsglieder vorstellbar, welche die überschüssige Leistung in Wärme umwandeln würden. Diese Hardwarekomponenten müssten jeweils von Hand neu installiert werden, wenn das Netz angepasst wird. Weil die verschiedenen Zellen von einander abhängig sind, müssen sie gleichzeitig angepasst werden: das würde bei einem zwei- bis dreimonatigem Änderungsrhythmus grosse logistische Probleme aufwerfen. Würden also alleinige Hardwarekontrollen konsequent umgesetzt, so ist zu erwarten, dass die **Betriebskosten massiv ansteigen** werden.

Daher liegt nahe, die durch **Software gesteuerten Einstellungen** mit zu berücksichtigen. Die dazu gehörigen Daten liegen prinzipiell im Netzkontrollzentrum vor. Somit sollten Stichprobenkontrollen einfach und effizient möglich sein. Voraussetzung ist, dass Prozesse, Verantwortlichkeiten und Art der Dokumentation genau festgelegt sind. Dazu bieten sich **Qualitätssicherungssysteme** an. Das BAKOM ist grundsätzlich bereit, bei der Überprüfung dieser Voraussetzungen mitzuarbeiten.

Schliesslich bleibt anzumerken, dass die im vorliegenden Bericht beschriebenen Strukturen sich auf GSM beziehen und eine mögliche Musterkonfiguration beschreiben. Verschiedenste weitere Umsetzungen existieren, die zentrale Steuerung bleibt sich aber gleich. Wichtig ist, dass **der gesamte Pfad vom internen Sender bis und mit der Antenne lückenlos bekannt sein muss**, so dass die abgestrahlte Leistung bestimmt werden kann. Das Prinzip kann von GSM auf UMTS übertragen werden, wenn auch bei UMTS die Komponenten anders bezeichnet werden.

Zusammenfassend:

**Laut Bundesgericht hat die Bevölkerung ein Anrecht darauf, sicher zu sein, dass die bewilligten abgestrahlten Leistungen von Mobilfunknetzen nicht überschritten werden. Das mit alleinigen Hardwarekontrollen zu bewerkstelligen, ist mit den heutigen modernen Sendersystemen wenig zweckmässig und könnte die Betriebskosten massiv ansteigen lassen. Daher bietet sich an, die durch Software gesteuerten Einstellungen zentral einzusehen und deren Zuverlässigkeit mit einem Qualitätssicherheitssystem sicherzustellen. Damit wären effiziente und umfassende Kontrollen möglich, welche den Betrieb eines Netzes kaum einschränken würden.**

## 5 Literaturverzeichnis

- [ 1 ] Schweizerischer Bundesrat, "Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)", SR 814.710, 23.12.1999  
<http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.710.de.pdf>
- [ 2 ] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), "Mobilfunk und WLL-Basisstationen, Vollzugsempfehlung", Bern, BUWAL, 2002
- [ 3 ] Bundesgericht, "Mobilfunkantenne, Verwaltungsgerichtsbeschwerde gegen den Entscheid des Verwaltungsgerichtes des Kantons Berns vom 21. Mai 2004", 1A.160/2004/ggs, Lausanne, 10. März 2005
- [ 4 ] Cercl'Air, Arbeitsgruppe NIS, "Bundesgerichtsentscheid: Massgebende Sendeleistung für die Bewilligung von Mobilfunksendeanlagen", Zürich, 20. Juni 2005
- [ 5 ] Redl, Sigmund M.; Weber, Matthias K.; Oliphant, Malcolm W., "An Introduction to GSM", Boston, Artech House, 1995
- [ 6 ] Holma, Harri; Toskala, Antti, "WCDMA for UMTS", Chichester, Wiley, 2001