

Machbarkeitsstudie für ein Monitoring von Mobilfunkstrahlung mithilfe von Smartphones

Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

Zürich, 28. April, 2016

Autoren:

Jürg Fröhlich, Marco Zahner, Fabian Schneider, Philipp Bachmann

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm und NIS, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Fields at Work GmbH

Autoren: Jürg Fröhlich, Marco Zahner, Fabian Schneider, Philipp Bachmann

Begleitung BAFU: Andreas Siegenthaler

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

Zusammenfassung der Studie	5
1 Einleitung	6
1.1. Ausgangslage, Problematik, Zielsetzung gemäss Vertrag.....	6
1.1.1. Ausgangslage.....	6
1.1.2. Problematik.....	6
1.1.3. Zielsetzung gemäss Vertrag	7
1.2. Aufbau.....	7
2 Anforderungen an ein Monitoring mit Smartphones	8
3 Literaturübersicht	10
3.1. Bhatt et al. (2016): Instruments to assess and measure personal and environmental radiofrequency-electromagnetic field exposures. Australas Phys Eng Sci Med., Vol. 39 (1), pp. 29-42.....	10
3.2. Goedhart et al. (2015), Using Software-Modified Smartphones to Validate Self-Reported Mobile Phone Use in Young People: A Pilot Study, Bioelectromagnetics 36:538 – 543.....	11
4 Smartphones der aktuellen Generation und Monitoring	13
4.1. Aufbau eines aktuellen Smartphones	13
4.2. Schnittstelle zu den Betriebsdaten des Smartphones im Android OS.....	15
4.3. Technische Voraussetzungen für ein Monitoring mit Smartphones	17
4.3.1. Interessierende Betriebsparameter.....	18
4.4. Analyse der Unsicherheiten	18
4.5. Erfassung der Sendeleistung der mobilen Geräte	20
5 Experimentelle Evaluation	22
5.1. Vorgehensweise	22
5.2. Messstrecken	22
5.3. Messausrüstung	24
5.3.1. Smartphone und Smartphone App	24
5.3.2. Feldstärkemessung mittels Exposimeter	26
5.3.3. Messanordnung	26
5.4. Ergebnisse der Messreihen	27
5.4.1. Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungen.....	27
5.4.2. RSSI Messung aus der Smartphone App	29

5.4.1. Umrechnung der RSSI-Daten	30
5.5. Diskussion.....	32
5.6. Einschränkungen eines EMF-Monitorings mit Smartphones	32
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	33
7 Literatur	34

Zusammenfassung der Studie

Die technischen Möglichkeiten für ein Monitoring mittels Smartphones wurden anhand von Smartphones mit dem Open-Source Betriebssystem Android eingehend analysiert und anhand verschiedener Typen von aktuellen Smartphones evaluiert. Die relevanten Aspekte im Aufbau der Hardware und in den vorhandenen Programmierschnittstellen wurden herausgearbeitet. Es hat sich herausgestellt, dass die Anzahl durch Smartphone Apps direkt zugänglichen Betriebsparameter für die Messung von empfangenen Leistungen sehr klein ist. Bezüglich Leistungserfassung beschränkt es sich im Wesentlichen auf die Erfassung des internen Indikators für die Signalstärke (RSSI) im gewählten Frequenzband, des aktuell genutzten Mobilfunkstandards und der momentan aktiven Basisstation. Die meisten Betriebsparameter, die für den Gebrauch des Smartphones für die Telefonie oder die Datenübertragung verwendet werden, sind in einer durch die Programmierschnittstelle unzugänglichen Ebene versteckt. Diese proprietäre Ebene ist zudem von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich und auch aus Kompatibilitätsgründen für den direkten Zugriff gesperrt. Diese Tatsache schränkt die Verwendung der in einem Smartphone enthaltenen Hardware stark ein.

In einer experimentellen Evaluation mit einem Smartphone und einer speziell dafür entwickelten und implementierten App wurden zwei Messrouten in der Stadt Zürich mit SIM-Karten verschiedener Netzbetreiber je zweimal abgelaufen. Die mit dem Smartphone gemessenen Daten für die Signalstärke des empfangenen Signals der Basisstation wurden in ein Feldstärke-Äquivalent umgerechnet. Die erhaltenen Werte wurden qualitativ mit den Feldstärken, gemessen mit einem Exposimeter, verglichen. Dabei hat sich klar gezeigt, dass die Summe der vom Smartphone erfassten RSSI der verschiedenen Netzbetreiber, weder als robuste Näherung noch als zuverlässige Grösse für die Erfassung von Änderungen in der elektrischen Feldstärke verwendet werden kann.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass ein Monitoring mit aktuellen Smartphones nicht realisierbar ist. Die Erfassung der Immissionen, die durch das Smartphone gemessen werden, beschränkt sich auf den Wert des Indikators für die Signalstärke (RSSI) der aktuellen Basisstation, der auf einer internen Leistungsmessung eines Teils des aktuell genutzten Frequenzbandes beruht. Um eine Verbesserung und eine Erweiterung der Messprozedur für die Zwecke eines Monitorings zu erreichen, wären Änderungen in der Softwareschnittstelle der Smartphones nötig, die mehrere proprietäre Teile des Smartphones betreffen. Dies würde ein entsprechendes Entgegenkommen der Smartphone-Hersteller voraussetzen, was als eher unwahrscheinlich angenommen wird. Ebenfalls müsste die Messung des RSSI erweitert werden, damit die vollständige Bandbreite der jeweiligen Bänder vermessen werden kann und nicht nur ein Teil davon. Im Weiteren müssten die verwendeten Smartphones mit den verschiedenen Quellen und Signalen, wie sie in den aktuell verwendeten Mobilfunkstandards vorkommen, kalibriert werden. Kombiniert mit einer regelmässigen Erfassung der umliegenden Basisstationen und einer direkten Erfassung der Feldstärke innerhalb der verschiedenen Bänder würde ein Monitoring der Mobilfunkbänder möglich. Um den vorgesehenen Betrieb eines Smartphones nicht zu beeinträchtigen wäre dazu eine zusätzliche, autonome Hardwareeinheit im Smartphone nötig.

1 Einleitung

1.1. Ausgangslage, Problematik, Zielsetzung gemäss Vertrag

1.1.1. Ausgangslage

In den letzten Jahren wurden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Alltagsexposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder entwickelt. Ein Ansatz ist die Bestimmung der Immissionen, die durch Festinstallationen erzeugt werden, anhand von numerischen Simulationen. Für diese Simulationen werden dreidimensionale Modelle von Landschafts- und Gebäudedaten erzeugt und die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen verschiedener Quellen berechnet. Dies erlaubt die Bestimmung der an definierten Punkten auftretenden Feldstärken. Andererseits ist dieser Ansatz durch die Genauigkeiten der Modellierung limitiert und erlaubt vor allem die Bestimmung der Feldstärken im Aussenbereich. Es existiert auch eine ganze Reihe von verschiedenen Messinstrumenten, mit denen die Feldstärken über grosse Frequenzbereiche erfasst werden können. Diese sind zum Teil recht gross und schwer und erlauben deshalb nicht eine extensive Messung über längere Zeit und grössere Strecken. Daher wurden auch tragbare sogenannte Exposimeter entwickelt, die von geschultem Personal aber auch Laien herumgetragen werden können. Diese Geräte erlauben die bandselektive Erfassung der relevanten Frequenzbänder über längere Zeit und auf grossen Routen. Die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden für das Monitoring elektromagnetischer Felder sind in der Übersichtsarbeit Dürrenberger et al. 2014 zusammengefasst. Über diese Möglichkeiten hinaus stellt sich immer wieder die Frage, ob eine Erfassung der Exposition nicht direkt mit teilweise modifizierten oder auch privaten Smartphones gemacht werden kann. Ansätze wie derjenige des ‚crowd-sensing‘ werden auch in anderen Zusammenhängen eingesetzt. Im Folgenden soll vertieft auf die Möglichkeiten und die Einschränkungen bei der Verwendung von Smartphones zur möglichst repräsentativen Erfassung der Exposition eingegangen werden. Dabei wird unter Exposition die Expositionsverteilung über die Allgemeinbevölkerung verstanden.

1.1.2. Problematik

Die Exposition setzt sich aus zwei prinzipiell unterschiedlichen Anteilen zusammen. Der eine Anteil besteht aus dem Beitrag der sogenannten Fernfeldquellen, die sich in einem Abstand von mehr als 3-4 Wellenlängen weg von der Position der Personen befinden. Bei diesen Quellen handelt es sich vor allem um Festinstallationen, aber zum Teil auch um mobile Quellen, die von anderen Personen mit sich herumgetragen werden. Der zweite Anteil besteht aus der sogenannten Nahfeldexposition, die von den nahe am Körper betriebenen Geräten verursacht wird und im Gegensatz zum Fernfeldanteil eher lokal einwirkt. Die modernen Smartphones enthalten meistens eine Mehrbandantenne für die verschiedenen Mobilfunkfrequenzen und verschiedene andere Sensoren, die zum Betrieb des Telefons und der sogenannten Smartphone-Apps verwendet werden. Die Erfassung der verschiedenen Expositionsanteile soll durch diese vorhandenen Elemente möglich gemacht werden. Eine weitere Option besteht im Ausbau der bestehenden Hardware eines Smartphones, um dessen Funktionalität zu erweitern. Einige solcher Möglichkeiten wurden im Rahmen verschiedener Studien evaluiert, implementiert und getestet.

Die Hauptproblematik besteht in der Erfassung möglichst vieler expositionsrelevanter Parameter während des Betriebs des Smartphones für die verschiedenen Smartphone-Anwendungen.

1.1.3. Zielsetzung gemäss Vertrag

Das BAFU beabsichtigt, ein nationales Monitoring der Immissionen nicht ionisierender Strahlung (NIS) aufzubauen. Dieses soll Aussagen darüber machen, wie sich die Immissionen statistisch über die Bevölkerung verteilen, von welchen Quellen / Technologien sie stammen und welchen zeitlichen Trend diese Verteilungen im Laufe der Jahre entwickeln. Die Ergebnisse sollen für die Schweizer Bevölkerung in ihrem täglichen Lebensumfeld repräsentativ sein.

Als Vorbereitung wurde in den Jahren 2011/12 eine Konzept- und Machbarkeitsstudie erstellt.

In Ergänzung dieser Konzeptstudie soll ein neuer Ansatz evaluiert werden, die Exposition der Schweizer Bevölkerung durch Mobilfunkstrahlung (und weiterer Funkdienste wie WLAN) mithilfe von privaten Smartphones zu erfassen: Ein Grossteil der Bevölkerung besitzt heute ein solches Gerät. Smartphones sind mit mehreren Sensoren ausgestattet und können bis zu einem gewissen Grad den Empfangspegel verschiedener Funkdienste erfassen. Auch wenn diese Daten nicht sehr präzise sind, könnte allenfalls eine genügend grosse Stichprobe statistisch robuste Resultate liefern.

Ziel des Auftrags ist es, die Möglichkeiten und Grenzen eines Monitorings der Mobilfunkstrahlung mithilfe von persönlichen Smartphones auszuloten und in einem Bericht festzuhalten.

1.2. Aufbau

Die Machbarkeitsstudie für ein Monitoring von Mobilfunkstrahlung mithilfe von Smartphones ist in folgende Arbeitspakete eingeteilt:

AP 1: Literaturübersicht

AP 2: Zusammenfassung der technischen Möglichkeiten von Smartphones der aktuellen Generation

AP 3: Erarbeiten von möglichen Messprotokollen mit Smartphones

AP 4: Konzept einer App zur Erfassung aller relevanten Daten eines Smartphones

AP 5: Konzept für die Validierung der erfassten Daten

AP 6: Erarbeiten der Anforderungen an ein Monitoring mit privaten Smartphones

AP 7: Zusammenfassung der Möglichkeiten und Schlussfolgerungen

2 Anforderungen an ein Monitoring mit Smartphones

Die Vorteile eines Smartphone basierten Monitorings sind evident. Die Hardware für die Erfassung der Messdaten wird vom Studienteilnehmer zur Verfügung gestellt und muss nicht beschafft und gewartet werden. Einmal entwickelt kann eine entsprechende Smartphone App für die Erfassung einer grossen Anzahl Messungen mit verschiedenen Personen eingesetzt werden.

In diesem Kapitel sollen die Anforderungen an ein Monitoring von elektromagnetischen Feldern im Radiofrequenzbereich zusammengetragen werden. Das Monitoring soll in der Lage sein, die für die Bevölkerung relevanten Immissionen zu erfassen. Wenn möglich soll auch die Sendeleistung der mobilen Geräte erfasst werden.

Ein EMF Monitoring mit Smartphones müsste demnach folgende Anforderungen erfüllen:

- Das Messprotokoll muss garantieren, dass Immissionen aller Mobilfunknetzbetreiber und aller Mobilfunktechnologien erfasst werden (Einbezug einer genügenden Anzahl von Nutzern der verschiedenen Mobilfunknetzbetreiber), insbesondere:
 - a. Erfassung des gesamten Frequenzbandes des jeweiligen (bzw. aller) Netzbetreibers
 - b. Erfassung aller genutzten Mobilfunkfrequenzen des jeweiligen (bzw. aller) Netzbetreibers
 - c. Regelmässiges 'Scanning' der 'sichtbaren' Basisstationen
- Kalibration der gängigsten Smartphone Modelle für die häufigsten Nutzungen mit bekannten Quellen für die verschiedenen Netzwerktypen und Technologien
- Wenn die Position des Smartphones bezüglich des Körpers der tragenden Person nicht vorgegeben ist, muss eine entsprechend valide Mittelung über mehrere Messungen und Personen sowie messbare Betriebsparameter, die Betriebsart und Bedienungsweise abbilden, erstellt werden, um einen repräsentativen Durchschnitt der Messwerte zu bekommen. Daher ist einerseits ein Proxy für die verschiedenen Positionen am Körper von Personen notwendig und andererseits ein Proxy für die verschiedenen Betriebsarten (Telefonieren, WLAN, mobile Daten, etc.), Standards und Frequenzbänder.
- Je nach Ansatz und Verfügbarkeit von Smartphonedaten können Rayons oder Routen bestimmt werden, die einen repräsentativen Querschnitt für die festgelegte Metrik für die Exposition ergeben (Repräsentativität für die schweiz. Bevölkerung). Wenn eine Expositionsverteilung über die ganze Schweiz angestrebt wird ist dieser Ansatz hinfällig.
- Erfassung der Daten von privaten Smartphones unter Gewährleistung der Datenschutzbestimmungen.
- Zugriff auf alle relevanten Betriebsparameter des Smartphones
- Identifikation der Leistungsanteile bezüglich Quellen und Technologien
- Möglichkeit zur Analyse von zeitlichen Trends, i.e. sammeln von Informationen, wie sich die Feldverteilungen im Laufe der Jahre entwickeln
- Minimale Beeinträchtigung des täglichen Gebrauchs durch die Erfassung der Monitoring-Daten

- Smartphone App kompatibel für alle gängigen Smartphone Betriebssysteme (Android, iOS, Windows)

Die Anforderungen an ein Messprotokoll, zum Erreichen einer für die Allgemeinbevölkerung repräsentativen Exposition, können für die Erfassung von Daten mit privaten Smartphones an existierende Studien wie die Studie Rösli et al. (2015), die für das BAFU durchgeführt wurde, erarbeitet werden. Hier sollen vor allem die technischen Anforderungen an die privaten Smartphones überprüft werden.

3 Literaturübersicht

Über die Erfassung der Exposition mit Smartphones gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die aber vor allem die Erfassung von Benutzungsdaten mittels spezieller Smartphone Applikationen zum Thema haben. In diesem Kapitel werden die Resultate zweier neuerer Publikationen zu vorhandenen Messinstrumenten und Softwareapplikationen für Smartphones zusammengefasst. Beide Studien stellen in ihrer Weise eine Übersicht über die aktuellen Instrumente und Methoden dar, die vor allem im Rahmen von epidemiologischen Studien verwendet werden. Für eine ausführlichere Darstellung der Methoden, die in der Epidemiologie zur Charakterisierung der Exposition verwendet werden, sei auf die entsprechenden Übersichtsarbeiten verwiesen (z.B. Roser et al. (2015)).

3.1. Bhatt et al. (2016): Instruments to assess and measure personal and environmental radiofrequency-electromagnetic field exposures. *Australas Phys Eng Sci Med.*, Vol. 39 (1), pp. 29-42.

In *Bhatt et al. (2015)* wird eine Übersicht über die aktuell existierenden Instrumente zur quantitativen Erfassung der RF-Exposition gegeben. Diese Messgeräte basieren entweder auf software- oder hardwaremodifizierten Mobiltelefonen oder sind eigenständige Exposimeter. Da in diesem Rahmen vor allem die Smartphone basierten Systeme von Interesse sind, sollen im Folgenden diese Systeme zusammengefasst und diskutiert werden. In 'Table 1' der Originalpublikation sind die existierenden Systeme zusammengefasst. Die verschiedenen Systeme werden verglichen und Stärken, Einschränkungen und Empfehlungen diskutiert. Die wichtigsten Punkte sind im Folgenden nochmals dargestellt:

XMobiSense: XMobiSense bezeichnet eine Smartphone App, entwickelt von den Whist Lab (gemeinsames Forschungslabor der Institute Mines-Telecom und Orange, Paris, Frankreich). Die App erfasst die Exposition der gängigen Mobilfunknetze (2G, 3G und LTE) und der Wi-Fi Netzwerke. Zusätzlich erfasst die App auch die Anzahl und die Dauer der Anrufe, Anzahl der SMS, Benutzungsdauer, Lateralität während der Nutzung am Kopf, Leistung der Downlink-Verbindung (Rx in dBm), Wi-Fi Rx Leistung (in dBm), empfangene und gesendete Datenmengen über die 2G, 3G und Wi-Fi Netzwerke (kb/s). Die Messunsicherheit der Rx - Leistungen ist vom jeweilig verwendeten Smartphone abhängig. In einer früheren Publikation [Gati et al. (2010)] wurde ein Zusammenhang zwischen der Rx und der Sendeleistung (Tx) von Mobiltelefonen bei Nutzung der GSM und UMTS Netzwerke gezeigt. Offensichtlich ist dieser Zusammenhang auch bei XMobiSense unterlegt. Als Einschränkung wird nur das Fehlen der Sendeleistungen der Wi-Fi Netzwerke angegeben. Bezüglich der Unsicherheiten in der Bestimmung der Sendeleistung in den Mobilfunknetzen ist nichts Näheres angegeben. Dieser Punkt müsste noch näher untersucht werden.

Quanta Monitor Applikation: In der Diskussion am Schluss des Papers wird auf die Einschränkung bezüglich der Erfassung der Sendeleistung noch weiter eingegangen. Es wird vorgeschlagen die Tx – Leistung mit der Quanta Monitor Applikation (Cellraid Ltd, Tietotie 2, 90460 Oulunsalo, Finland) zu erfassen. Die Applikation erlaubt gemäss den Herstellern die Erfassung der Rx und Tx - Leistungen in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ aller Mobilfunk- und Wi-Fi – Netzwerke. Mittels dem Abstandssensor wird auch die kumulative Exposition bei Nutzung des Telefons am Körper (bis zu 5mm Abstand vom Körper) in $\mu\text{Wh}/\text{m}^2$ erfasst. Die erwartete Messunsicherheit wird mit $\pm 1\text{dB}$ respektive $\pm 3\text{dB}$ im Falle von Wi-Fi

angegeben. Basierend auf den erfassten Daten wird über einen Algorithmus auch die entsprechende spezifische Absorptionsrate (SAR) berechnet. Entsprechende Validierungen der implementierten Algorithmen und den daraus resultierenden Messunsicherheiten fehlen bis jetzt und müssten noch nachgereicht werden. Die Applikation ist wie die meisten existierenden Applikationen auf Android basierte Smartphones beschränkt.

Tawkon App: Die Firma Tawkon (Tawkon Ltd., Israel, tawkon.com) bietet eine Applikation an, die aus einem internen Messsystem besteht, das Informationen wie Netzwerktyp, GSM-Band, UMTS, CDMA Kanal, Signalstärke und Telefonmodell erfasst. Im Weiteren geben die Hersteller an, über einen Algorithmus in der Lage zu sein, die Sendeleistung und die daraus resultierende SAR basierend auf FCC Nahfeld-Expositions-Standards zu berechnen (<http://tawkon.com/>). Die Applikation ist zudem von einem akkreditierten Radiofrequenztechnik Labor kalibriert und auch durch Patente geschützt (US8787996 B2). Die Applikation beinhaltet eine Warnfunktion, die den Benutzer auf Expositionswerte über einem bestimmten voreingestellten Wert hinweist. Dies soll helfen, die Exposition des Benutzers so klein wie möglich zu halten. Die Applikation wurde bisher weder im Rahmen von Studien getestet noch breiter unabhängig validiert.

Exposimeter: Im Weiteren sind noch alle aktuell erhältlichen Exposimeter dargestellt, verglichen und diskutiert. Die Autoren kommen zum Schluss, dass alle vorhandenen Geräte und Apps eine Verbesserung der Erfassung der Exposition und daher eine zuverlässigere Klassifikation im Rahmen von epidemiologischen Studien erlauben. Alle zurzeit erhältlichen Geräte und Apps weisen aber spezifische Vor- und Nachteile auf. Die Autoren schlagen für zukünftige Entwicklungen eine Erweiterung der erfassten Bänder, tiefere untere Detektionsgrenzen, längere Batterielaufzeiten und eine Reduktion bezüglich Grösse und Gewicht vor.

3.2. Goedhart et al. (2015), Using Software-Modified Smartphones to Validate Self-Reported Mobile Phone Use in Young People: A Pilot Study, *Bioelectromagnetics* 36:538 – 543.

In diesem Paper werden die Resultate einer Pilotstudie über den Einsatz der Software Applikation *XMobiSense* zur Erfassung der Charakteristik des Gebrauchs des Mobiltelefons bei jungen Menschen rapportiert. Die erfassten Daten werden zudem mit dem selbst angegebenen Mobiltelefongebrauch verglichen. Folgende Parameter wurden in dieser Studie erfasst:

- Datum und Zeit,
- Dauer der Gespräche, verwendetes Kommunikationssystem (2G oder 3G Mobilkommunikation, General Packet Radio Service [GPRS, 2.5G], Enhanced Data Rates for GSM Evolution [EDGE, 2.75G], Universal Mobile Telecommunications System [UMTS, 3G], High-Speed Downlink Packet Access [HSDPA, 3.5G], und "andere" Systeme),
- Lateralität während dem Gespräch (Gesprächszeit während derer das Mobiltelefon entweder ausschliesslich oder kombiniert auf der linken oder rechten Seite des Kopfes oder aber weg vom Kopf, i.e. bei der Verwendung eines ‚hands-free sets‘ oder Lautsprecher Modus, gehalten wurde)
- Datenübertragung und –empfang mittels 2G/3G oder Wi-Fi (kilobytes [kb] pro Tag)

Als ‚Lautsprecher Modus‘ werden Phasen gekennzeichnet, wenn das Mobiltelefon während eines Gespräches nicht in der Nähe des Kopfes war und kein ‚hands-free set‘ angeschlossen war. Die Nähe des Kopfes wurde über die eingebaute Funktion des Abschaltens des Smartphone Bildschirms bewerkstelligt. So werden auch die Phasen während des Annehmens und des Auflegens eines Anrufes erfasst.

Im Rahmen einer Pilotstudie wurde die App auf den Smartphones von 26 Freiwilligen in Frankreich, Spanien und den Niederlanden installiert und über 4 Wochen die Daten erfasst. Nach diesen 4 Wochen wurden die Teilnehmenden bezüglich ihres Mobiltelefongebrauchs befragt. Dabei stellte sich eine Unterschätzung der Anzahl getätigter Anrufe, aber eine Überschätzung der gesamten Gesprächsdauer heraus. Das Mobiltelefon wurde von den Teilnehmern zu 90% der Zeit am Kopf gehalten und zwar auf derjenigen Seite, die von Ihnen als die bevorzugte angegeben wurde. Limitierungen bezüglich dem Aufzeichnen des Lautsprecher-Modus wurden festgestellt. Die Applikation kann zur Verbesserung der Modellierung der Exposition von Studienteilnehmern im Rahmen von epidemiologischen Studien verwendet werden.

4 Smartphones der aktuellen Generation und Monitoring

Das Konzept einer Smartphone basierten Expositionserfassung fusst auf der Idee, die Hardware- und Software-Ressourcen eines modernen Smartphones als RF-EMF Exosimeter zu verwenden. Auch wenn ein Mobiltelefon nicht primär für die Leistungsmessung ausgelegt ist, verlangen die heute gebräuchlichen Telekommunikationsstandards die regelmässige Erfassung der Empfangsleistung zur Auswahl und Verbindung mit der jeweiligen Mobilfunkzelle oder zur Gewährleistung der adaptiven Leistungsregelung. Diese Mechanismen sind ein fundamentaler Bestandteil jedes Mobilfunkstandards zur Minimierung der Interferenz zwischen benachbarten Zellen und um kurzzeitige Feldstärkeschwankungen (Schwund) zu kompensieren. Bei diesen Prozeduren werden nicht nur die 'downlink' Signalstärken (RSSI) gemessen sondern auch die momentane RF Sendeleistung des Smartphones. Alle Messungen, die vom Telefon als Teil der Leistungsregelungsprozeduren ausgeführt werden, sind zudem frequenzselektiv, weil sie sich immer auf einen einzelnen Mobilfunkkanal beziehen.

Im Vergleich zur Verwendung eines separaten Exosimeters würde die direkte Messung der Sendeleistung des Telefons zur Verminderung der Unsicherheit bezüglich Nahfeldexposition durch das eigene Mobiltelefon beitragen. Eine Applikation, die auf dem Mobiltelefon den Wert der RF - Sendeleistung des Smartphones über die Zeit erfasst, würde eine billige und einfach anwendbare Möglichkeit ohne zusätzliche Hardware darstellen. Der prozentuale Anteil der Bevölkerung in den entwickelten Ländern, der ein Smartphone besitzt, hat in den letzten Jahren vor allem unter jüngeren Leuten stetig zugenommen. In der Schweiz war bereits im Jahr 2013 der Anteil der Smartphone-Benutzer in der Alterskategorie der 15- bis 29-Jährigen bei 90% [www.comparis.ch, Jan. 2016]. Diese grosse Verbreitung der Smartphone-Nutzer macht eine repräsentative Auswahl in der Bevölkerung für grosse Studien einfach.

In diesem Kapitel wird zuerst der Aufbau eines aktuellen Smartphones beschrieben. Danach wird auf die Schnittstellen zu den Betriebsdaten des Smartphones eingegangen. In einem weiteren Abschnitt werden die technischen Voraussetzungen für ein Monitoring mit Smartphones zusammengefasst und den momentanen Möglichkeiten der heutigen Smartphones gegenübergestellt.

4.1. Aufbau eines aktuellen Smartphones

Von aussen betrachtet besteht ein Smartphone aus einem Gehäuse mit integriertem Touchscreen, Lautsprecher, verschiedenen Bedienelementen und Anschlüssen für einen kabelgebundenen Kopfhörer und für das Ladegerät. Im Vergleich zu älteren Mobiltelefonen werden in den aktuellen Smartphones die meisten Betriebsfunktionen softwaremässig gesteuert. Die aktuellen Betriebssysteme und Bedienungsoberflächen werden denjenigen der Computer immer ähnlicher. Die auf den Smartphones installierten Programme werden Apps genannt. Im Folgenden wird daher im Zusammenhang mit Smartphone Programmen immer von Apps gesprochen.

In Figur 1 ist ein vereinfachtes Blockdiagramm einer Smartphone Architektur gezeigt. Das Herzstück eines Smartphones ist der Hauptprozessor (Main Application Processor). Der Hauptprozessor ist der leistungsstärkste Prozessor des Gerätes. Dieser Prozessor wird zur Ausführung des Betriebssystems des Smartphones (z.B. Android, iOS, etc.), der grafischen Bedienungsoberfläche und für die

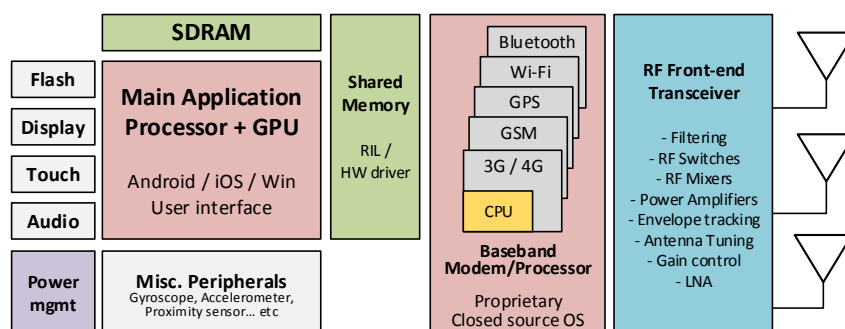
Ausführung der verschiedenen Apps verwendet. In heutigen Smartphones besteht dieser Prozessor meist aus einem Mehrkernprozessor mit integrierter Grafikeinheit (GPU).

Der Prozess der Generierung der modulierten Radiofrequenzsignale gemäss den verschiedenen Standards und die Demodulation dieser Signale in digitale Information werden durch eine dafür speziell gebaute Einheit bewerkstelligt. Diese Einheit wird als Modem/Baseband Prozessor bezeichnet. Das Modem ist entweder als Teil eines integrierten Systems on Chip (SoC) oder als separater Chip ausgeführt und enthält im Wesentlichen die Analog-Digital und Digital-Analog-Wandler sowie spezifische Signalverarbeitungskomponenten. Die Hauptaufgabe des Modems ist die Abwicklung der Kommunikation mit deren verschiedenen Protokollen. Wegen der Komplexität und der zeitkritischen Natur dieser Prozesse werden diese auf einem separaten und hochspezialisierten Prozessor mit einem entsprechend optimierten Betriebssystem ausgeführt. Diese Prozesse laufen völlig unabhängig vom Hauptprozessor. Auf den aktuellen Smartphones auf dem Markt sind die Betriebssysteme für den Modem/Baseband Prozessor in den meisten Fällen proprietär, herstellerspezifisch und nicht direkt zugänglich.

Zwischen dem Modem und der/den Antenne(n) des Smartphones befindet sich das RF-Frontend. Dieses beinhaltet alle analogen RF-Schaltkreise für die Erzeugung und den Empfang der Radiofrequenzsignale. Dies sind unter anderem Bandpassfilter, Frequenzumsetzer (Mischer), RF-Umschalter und die Sendeverstärker. Parameter wie die Betriebsfrequenz und die Sendeleistung der Verstärker werden im RF-Frontend eingestellt und direkt durch das Modem gesteuert.

Die Kommunikation zwischen dem Modem und dem Hauptprozessor ist meistens über einen gemeinsamen Speicherbereich realisiert, auf den beide Einheiten Zugriff haben (Shared Memory). Im Falle von Android geschieht der Zugriff seitens des Hauptbetriebssystems über einen sogenannten Hardwareabstraktionslayer mit der Bezeichnung Radio Interface Layer (RIL). Der Kern dieser Softwarekomponente ist der sogenannte RIL-Daemon. Dieser RIL-Daemon wird auf dem Hauptprozessor ausgeführt und stellt eine standardisierte Schnittstelle zwischen den Telefoneservices von Android und dem geschlossenen Betriebssystem des Modems her. Der RIL besteht aus einem generischen Teil für die Android-Seite, sowie einem herstellerspezifischen Hardwaretreiber, der vom Modem-Hersteller in Form einer vorkompilierten Datei geliefert wird.

Die Abstraktionsebene ist aus Kompatibilitätsgründen implementiert, weil sie es dem Betriebssystem ermöglicht, verschiedene Hardwarearchitekturen mit denselben Anweisungen anzusprechen.

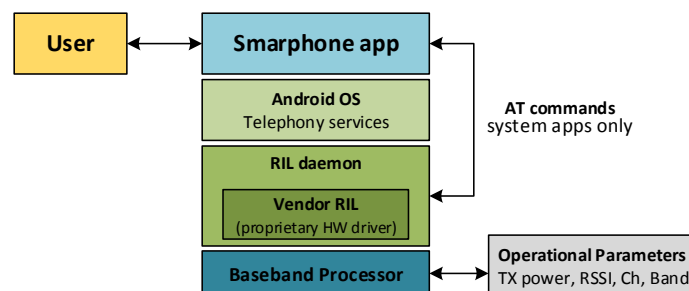


Figur 1: Vereinfachtes Block Diagramm einer Smartphone Architektur mit den wichtigsten Komponenten

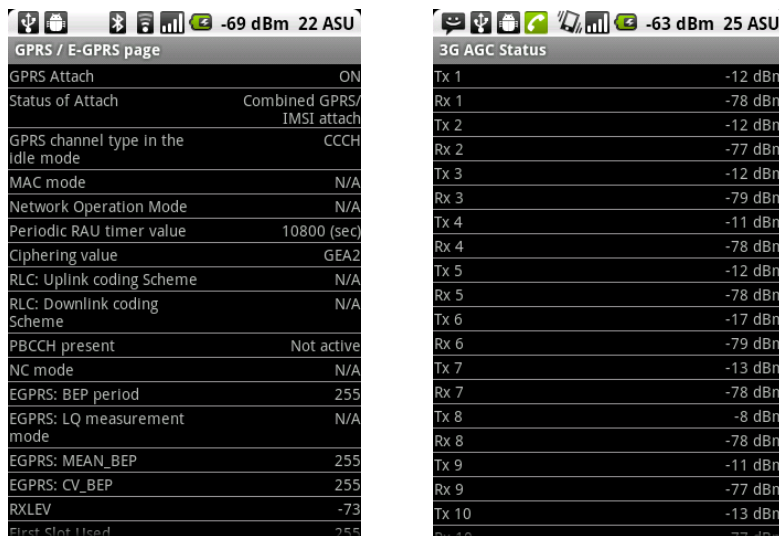
4.2. Schnittstelle zu den Betriebsdaten des Smartphones im Android OS

Für die Programmierung von Apps stellt das Android OS ein sogenanntes ‚Application Programming Interface‘ (API) als Schnittstelle zur Verfügung. Die API stellt Funktionen, Software-Dienste und Daten bereit, auf die alle Apps zugreifen können (sofern der Benutzer bei der Installation der App einwilligt). Dazu gehören auch gewisse Telefon-Betriebsparameter. Figur 2 zeigt eine schematische Darstellung der Softwareebenen zwischen einer Smartphone App und den Betriebsparametern für das Android OS. Diese Schnittstelle erlaubt nur beschränkt Zugriff auf hardwarenahe Daten und Komponenten. Diese Einschränkungen können in bestimmten Fällen umgangen werden. Dies kann anhand einer Testapplikation, entwickelt von HTC (HTC FieldTest), gezeigt werden. Diese Applikation ist Teil der Systeminstallation gewisser HTC Smartphones und kann durch die Eingabe einer bestimmten Zeichenreihe im Telefonwahlmenü ausgeführt werden. In Figur 3 sind zwei Screenshots der Applikation gezeigt. Diese Applikation hat Zugriff auf etliche Betriebsparameter des Baseband-Prozessors, die durch das generelle Android-Framework nicht zugänglich sind. Die Informationen sind um einiges detaillierter als der mögliche Umfang von Standard-Applikationen. Eine eingehende Analyse der FieldTest-Applikation hat ergeben, dass die Applikation über sogenannte AT-Befehle direkt mit dem RIL kommuniziert. Innerhalb Android sind AT-Befehle jedoch als Systembefehle klassifiziert. Als Konsequenz davon sind solche Befehle für Standard-Applikationen gesperrt. Nur Systemanwendungen dürfen auf diese Befehle zugreifen.

Soll eine Android-App als Systemanwendungen erkannt werden, muss sie mit denselben kryptographischen Signatur mit denen das Betriebssystem kompiliert wurde, kompiliert und gekennzeichnet sein. Diese Signaturen sind Eigentum der Hersteller und deshalb nicht öffentlich. Um das zu umgehen kann auch das Betriebssystem auf einem eigenen Computer kompiliert und auf das Smartphone übertragen werden. Das ermöglicht die Erstellung von eigenen Systemapplikationen. Dies ist allerdings eine sehr zeitaufwendige Prozedur, die den physikalischen Zugriff auf das Smartphone voraussetzt, die Benutzereinstellungen zurücksetzt und sämtliche Garantieansprüche ausser Kraft setzt. Zudem muss dieses Vorgehen für jedes einzelne Smartphone wiederholt werden.



Figur 2: Schematische Darstellung der Softwareebenen zwischen einer Smartphone App und den Betriebsparametern, die vom Baseband-Prozessor verwaltet werden, am Beispiel von Android.



Figur 3: Screenshots der App 'FieldTest' entwickelt von HTC. Diese App zeigt Informationen des Baseband-Prozessors die im allgemeinen Android Framework nicht zugänglich sind.

AT-Befehle direkt an die RIL zu schicken, kann den Zugang zu zusätzlichen Betriebsparametern eröffnen, sofern diese vom herstellerspezifischen Teil der RIL unterstützt werden. Andererseits verliert man mit diesem Ansatz auch die Vorteile einer standardisierten Softwareschnittstelle. Im Gegensatz zu den Werkzeugen, die durch die API des Android-Frameworks zur Verfügung gestellt werden, sind Dokumentationen zur Verwendung der AT-Befehle sehr schlecht zugänglich. Ohne die Unterstützung des jeweiligen Modem-Hardware Herstellers muss diese Information üblicherweise per ‚trial and error‘ oder durch Reverse-Engineering von spezialisierten Applikationen wie zum Beispiel der FieldTest-Applikation herausgefunden werden.

Das in Android vorhandene API zu umgehen, um die Menge der erhältlichen Informationen über den Betriebsstatus zu vergrößern, kann für einzelne Experimente nützlich und sinnvoll sein. Es ist aber sicherlich kein Ansatz, um über grössere Samples der Bevölkerung Expositionserfassungsstudien durchzuführen. In diesen Fällen stehen eine möglichst breite Systemkompatibilität und die einfache Bedienung im Vordergrund. Im folgenden Abschnitt ist eine Übersicht über die allgemein zugängliche Information für reguläre Applikationen innerhalb des Android-Frameworks gegeben. Die 'android.telephony' Schnittstelle stellt Dienste und Funktionen bereit, welche die Telefonie betreffen. Darunter befinden sich auch Informationen über ausgewählte Betriebsparameter. Eine komplette Liste der implementierten Methoden kann in den entsprechenden Abschnitten der Android Referenz ["Android Telephony API"; 2016; <http://developer.android.com>] gefunden werden. Die API stellt eine Auswahl an Parametern zur Verfügung, die sich auf die Empfangssignalstärke beziehen. Informationen über die Mobilfunkzellen, wie deren ID und diejenigen der Nachbarzellen sind in der API grundsätzlich auch vorgesehen. Informationen zur aktuellen Sendeleistung des Smartphones stellt die API hingegen nicht zur Verfügung.

Von uns durchgeführte Tests von verschiedenen Smartphone-Modellen haben auch ergeben, dass das API nicht auf allen Modellen denselben Umfang an Daten zur Verfügung stellt. Auf den vollen Umfang der Daten kann nur in einzelnen Fällen zugegriffen werden. Dies hängt, wie im Beispiel des RIL erwähnt, vom jeweiligen Hersteller ab. Wenn in diesen proprietären Softwareteilen der Zugriff

auf die entsprechenden Parameter nicht implementiert ist, gibt der jeweilige Befehl in der API einen Nullwert oder einen Wert ausserhalb des zulässigen Bereiches zurück.

Professionell eingesetzte Apps für das Netzwerkmonitoring (z.B. TEMS Pocket von Ascom ["TEMS™ Pocket," 2016; <http://www.ascom.com/nt/en/index-nt/tems-products-3/tems-pocket-5.htm#overview>]) umgehen dies, indem sie entweder eine Liste von Smartphone-Modellen mit geeigneten Chip-Sätzen angeben oder aber ein externes Messgerät verwenden [I. Digital Receiver Technology. "DRT4311B," <http://www.drty.com/catalog/wireless-test-products/drt4311b/>]).

Für die Erfassung der Exposition muss die Smartphone App auf den jeweiligen privaten Smartphones installiert und ausgeführt werden können und soll den normalen, täglichen Gebrauch so wenig wie möglich beeinträchtigen. Das bedingt, dass die App mit so vielen Smartphones wie möglich kompatibel ist. Deshalb ist es wichtig, die netzwerkrelevanten Parameter zu kennen, die auf allen Smartphones zugänglich sind. Es gibt eine Anzahl grundlegender netzwerkrelevanter Parameter, die für die korrekte Ausführung des Betriebssystems nötig sind (z.B. Balkenanzeige). Man kann davon ausgehen, dass diese Parameter auf jedem Android Smartphone zugänglich sind. Die Liste ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Parameter name	Description / states	Parameter name	Description / states
LISTEN_MESSAGE_WAITING_INDICATOR	Tells whether an SMS message is waiting	DATA_TX_MOBILE	Cumulative data received over cellular networks
LISTEN_SERVICE_STATE	In / out of service	DATA_RX_TOTAL	Cumulative data received including WiFi traffic
LISTEN_SIGNAL_STRENGTHS	RSSI values GSM signal strength CDMA Ec/I ₀	DATA_TX_TOTAL	Cumulative data transmitted including WiFi traffic
CELL_INFOS	Cell info (if available)	NETWORK_COUNTRY	Name of the country
CALL_STATE	idle / ringing / off hook	NETWORK_OPERATOR	Name of the operator
DATA_ACTIVITY	none / In / out / inout	NETWORK_TYPE	GSM/GPRS/HSDPA etc
DATA_STATE	Cellular data connection status	WI-FI_STATE	WiFi enabled / disabled
DATA_RX_MOBILE	Cumulative data received over cellular networks	SCAN_RESULTS	Name and RSSI of visible WiFi access points

Tabelle 1: Liste der grundlegenden netzwerkrelevanten Parameter, die auf jedem Android Smartphone zugänglich sein sollten.

Die in jedem Smartphone zusätzlich integrierten Sensoren (Inertiale Messeinheit, GPS, etc.) sind für normale Apps gut zugänglich und können zur näheren Charakterisierung der jeweiligen Expositionssituation herangezogen werden.

4.3. Technische Voraussetzungen für ein Monitoring mit Smartphones

In der Praxis gibt es einige technische Schwierigkeiten und Unsicherheiten bezüglich der Realisierung eines Smartphones als Exposimeter. Es ist daher nötig, auf die entsprechenden Hardware- und Softwarekomponenten, die an der Leistungsmessungsprozedur beteiligt sind, einzugehen. Der Überblick fokussiert auf die momentanen GSM, UMTS und LTE Standards, die heutzutage am häufigsten verwendeten Technologien für Telekommunikationsnetzwerke und deshalb auch die Hauptquellen der Exposition in der Schweiz [Rösli et al. (2015)].

4.3.1. Interessierende Betriebsparameter

Die folgende Analyse basiert mehrheitlich auf den Informationen, die durch das ‚3rd Generation Partnership Project‘ aufbereitet und öffentlich zugänglich gemacht werden [„3GPP Specifications“ Jan, 2016; <http://www.3gpp.org/specifications/specifications>]. Wegen der grossen Menge an Informationen und der technischen Komplexität wird der Fokus auf die relevantesten Parameter für die Erfassung der Sende- und Empfangsleistung des Smartphones gerichtet. In Tabelle 2 sind diese Parameter zur Erfassung der Signalstärke für die verschiedenen Mobilfunkstandards zusammengefasst. Nebst den Bezeichnungen ist auch die Art und Weise der Erfassung beschrieben. Für die verschiedenen Standards wird die Leistung zur Bestimmung der Empfangsqualität unterschiedlich ermittelt. Im Weiteren sollen die aus dieser Tatsache resultierenden Unsicherheiten analysiert werden.

	Parameter	Name / Description	Unit
GSM	Downlink: RXLEV	<i>Receive level</i> Average RMS power over 480 ms on the broadcast channel of a cell.	dBm
	Uplink: PCL	<i>Power Control Level</i> Output power setting of the phone; About 20 discrete levels, defined as part of the GSM specification [13]	dBm
UMTS / UTRA	Downlink: a) CPICH RSCP b) RSSI c) CPICH E_c/I_0	<i>a) Common Pilot Channel Received Signal Code Power</i> <i>b) Received Signal Strength Indicator</i> The received wide band power, including thermal noise and noise generated in the receiver, within the bandwidth defined by the receiver pulse shaping filter. <i>c) Pilot power (E_c) to total cell power + noise (I_0) ratio</i>	dBm
	Uplink: UE Tx Power	<i>User Equipment Transmitted Power</i> Mean power in a timeslot or ON power duration, consisting of the sum of the total transmitted power on all configured uplink carriers	dBm
LTE / E-UTRA	Downlink: a) RSRP b) RSSI	<i>a) Reference Signal Received Power</i> Linear average over the power contributions of the resource elements that carry cell-specific reference signals within the considered measurement frequency bandwidth <i>b) E-UTRA Carrier Received Signal Strength Indicator (RSSI)</i> Linear average Wideband power within the measurement bandwidth over N number of resource blocks from all sources, including co-channel serving and non-serving cells, channel interference, thermal noise etc.	dBm
	Uplink: UE Tx Power	<i>User Equipment Transmitted Power</i> Output power for any transmission within the channel bandwidth. For UE supporting UL-MIMO, the maximum output power is measured as the sum of the maximum output power at each UE antenna connector	dBm

Tabelle 2: Parameter zur Erfassung der Signalstärke für GSM, UMTS und LTE

4.4. Analyse der Unsicherheiten

Die Hauptbeiträge für Einbussen der Messgenauigkeit von Smartphones sind im Folgenden zusammengefasst:

Toleranzen: Smartphones sind nicht zur genauen Messung von Feldstärken ausgelegt und liefern deshalb Werte, die mit einer vergleichsweise hohen Messunsicherheit und vermutlich mit einer systematischen, personenspezifischen Abweichung belegt sind. Das erschwert die Verbindung von personenspezifischen Verhaltens- und Umgebungsdaten und die daraus resultierende Exposition. Diesem Nachteil kann eventuell durch eine Vergrösserung der Anzahl Personen begegnet werden.

'downlink'-Signalstärke: Mobiltelefone werden mehrheitlich nahe am Körper getragen. Dadurch wird einerseits die Effizienz der Antenne beeinträchtigt und andererseits die Signalstärke des Messsignals gedämpft, was zu einer Unterschätzung der 'downlink'-Signalstärke führt. Im Weiteren ist die Abstrahlcharakteristik der Antenne sehr anisotrop, was die Unsicherheit des Messsignals weiter vergrössert.

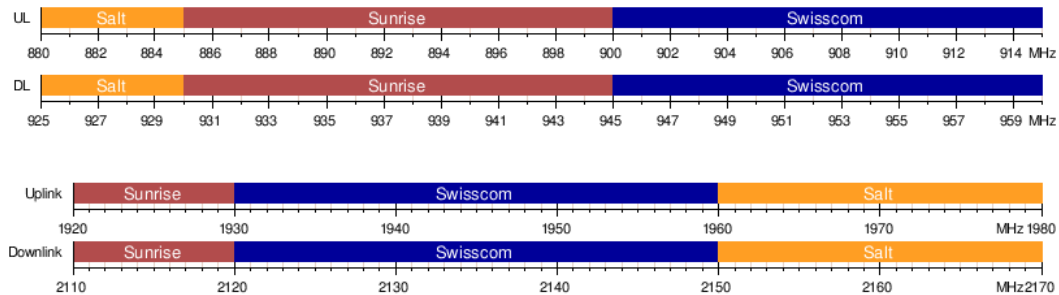
'uplink'-Signalstärke: Die Werte für die 'uplink'-Signalleistung, die in den verschiedenen Standards angegeben ist, repräsentiert die Leistung während der aktiven Übertragung. Diese Werte geben den aktuellen 'duty-cycle' (ein/aus Verhältnis) der Übertragung über mehrere Zeitschlitze nicht wieder. Ohne zusätzliche Informationen ist deshalb eine Bestimmung der durchschnittlichen oder der RMS Leistung über eine längere Zeit nicht möglich. Um die über 6 Minuten gemittelte Leistung, wie es im ICNIRP Standard verlangt wird, zu messen, wäre es nötig, den genauen zeitlichen Verlauf der Gesprächs- und Datenaktivitäten zu kennen. Zusätzlich ist anzumerken, dass die Leistung für UMTS und LTE viel schneller geregelt wird, als die Parameter von der App aufgezeichnet werden können.

Nicht erfasste Beiträge im 'downlink'-Signal: Auch wenn ein Mobiltelefon in der Lage ist, auf mehreren verschiedenen Mobilfunkbändern zu funktionieren, ist es immer nur auf einem (GSM; UMTS, LTE), respektive im Falle von LTE Advanced (Carrier Aggregation) auf ausgewählten, davon aktiv. Wenn das Telefon einmal auf eine Zelle und eine spezifische Technologie eingeloggt ist, werden die Leistungspegel der anderen in der Nähe vorhandenen Mobilfunktechnologien nur mehr sporadisch gemessen. Auch im aktuellen Betriebsband werden die RSSI Messungen nur auf einem Bruchteil der zur Verfügung stehenden Bandbreite durchgeführt, d.h. 200 kHz für GSM und 5 MHz für WCDMA. Im Falle von LTE variiert die Bandbreite für die Messung zwischen 1.4 und 20 MHz. Beiträge vom Rest der Bandbreite werden nur mitgemessen, wenn sie von Mobilfunkzellen desselben Mobilfunkanbieters stammen und auf der Liste der zu beobachtenden Nachbarszellen stehen. Diese Liste ist zellenspezifisch und wird vom Netzbetreiber festgelegt.

Tatsächlich ist die Frequenzuteilung zu den verschiedenen Netzbetreibern eine weitere Einschränkung für Smartphone basierte Messungen. Die SIM-Karte des Smartphones bestimmt, in welchem der vorhandenen Netze ein Telefon registriert wird. Einmal eingewählt misst der RSSI nur noch die Beiträge des jeweiligen Netzbetreibers und der darauf durchgeführten Aktivitäten. In der Schweiz werden die vorhandenen Frequenzbänder zwischen drei Netzbetreibern aufgeteilt. Die Zuordnung im 900 MHz und 2100 MHz Band ist in Figur 4 abgebildet. Zum Beispiel wird im 900 MHz Band dem Netzbetreiber Salt nur eine Bandbreite von 5 MHz oder 14% der vorhandenen Bandbreite zugewiesen. RSSI Werte, die von einem Smartphone aufgezeichnet werden, das in diesem Band registriert ist, beinhalten deshalb nur einen Bruchteil der Leistung, die in diesem Frequenzband potentiell ausgestrahlt wird.

Nicht erfasste Beiträge im 'uplink'-Signal: Die Immission, die durch andere Mobiltelefone in der Nähe verursacht wird, ist nicht vernachlässigbar, wird aber durch einen Smartphone basierten Ansatz nicht erfasst. Der Grund ist physikalischer Natur: Die meisten Mobilfunknetze basieren auf Frequency Division Duplexing (FDD), d.h. die Separation der 'uplink' und der 'downlink' Kommunikation wird im Frequenzbereich vollzogen. Geräte, die FDD verwenden beinhalten meistens einen Duplexer Filter als Teil des RF-Frontends, um die Übersteuerung des Empfangsteils durch Geräte in der Nähe oder durch die eigene 'uplink' Aktivität zu verhindern. Diese Unterteilung der Signale auf der Ebene der Hardware verhindert die Erfassung der 'uplink' Signalstärken von

anderen Geräten in der Nähe. Dieser Sachverhalt könnte in Zukunft durch die Einführung des Time Division Duplexing in LTE verändert werden, ist aber im Moment noch nicht eingeführt.



Figur 4: Frequenzzuordnung im 900 MHz und 2 GHz Mobilfunkband auf die drei Netzwerkbetreiber in der Schweiz [Wikipedia. "Global System For Mobile Communications," https://de.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications#Situation_in_der_Schweiz]

Netzwerkbetreiber spezifische Einstellungen: Die Netzwerkbetreiber können im Rahmen der Zellenoptimierung durch die Einstellung verschiedener Parameter das Verhalten des Netzes (und damit verbunden auch dasjenige der Endgeräte) beeinflussen. Darunter gehören z.B. die Feineinstellung von Zeitkonstanten für die Reaktion auf Schwankungen der Signalstärke und die Kriterien bei der Zellenwahl wie z.B. die Priorisierung des zu verwendenden Mobilfunkstandards. Der letzte Punkt ist im Rahmen der Leistungserfassung mittels Smartphones von Bedeutung. Bei der Wahl einer Zelle ist der von ihr verwendete Mobilfunkstandard oft das wichtigere Kriterium als deren absolute Empfangsstärke, solange diese für eine gute Verbindung ausreicht. Auf dem Smartphone können nur für die verbundene Zelle regelmässig aktualisierte Messwerte garantiert werden. Je nach Priorisierung durch den Mobilfunkbetreiber ist es deshalb zu erwarten, dass z.B. moderne 4G-fähige Mobiltelefone kaum noch Zeit im GSM-Netz verbringen und diese Beiträge stark unterschätzt werden.

4.5. Erfassung der Sendeleistung der mobilen Geräte

Die Verbreitung und die Durchdringung des Alltags mit Smartphones und deren Anwendung für verschiedenste Zwecke haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Telefonieren ist zu einer von vielen Verwendungsmöglichkeiten des Mobiltelefons geworden. Heutzutage ist die RF Aktivität eines Smartphones mehrheitlich durch den Datentransfer, der durch den Gebrauch der Apps und des Internets verursacht wird, bestimmt und nicht mehr über die Anzahl der getätigten und empfangenen Anrufe. Ein Teil dieser Datentransfers findet zudem ohne den aktiven Eingriff durch den Nutzer im Hintergrund statt. Im Weiteren entwickeln sich die neuen Drahtlosstandards immer weiter und erlauben immer grössere Datenraten mit derselben Sendeleistung zu übertragen. Die durchschnittliche Sendeleistung des Smartphones anhand von einfachen Metriken, wie zum Beispiel anhand der durchschnittlichen Anzahl Anrufe und deren durchschnittliche Dauer, abzuschätzen, ist daher nicht mehr mit einer genügenden Genauigkeit möglich. Durch die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten ist unter anderem auch die genaue Bestimmung der Position und des Abstandes des Smartphones zum Körper für die Bewertung der Messdaten relevant geworden.

Die Näherungen zur Bestimmung der durchschnittlichen Sendeleistung oder auch deren Zeitverlauf können durch die Erfassung von zusätzlichen Informationen zum aktuellen Betriebszustand des Mobilgeräts verbessert werden. Im Falle von GSM und UMTS existiert gemäss Gati et al. 2010 aufgrund der gegenseitigen Leistungsregelung zwischen Mobiltelefon und Basisstation eine negative Korrelation zwischen der RSSI (Received Signal Strength Indicator in dBm) und der Sendeleistung des Mobiltelefons. RSSI und andere Parameter von den im Mobiltelefon vorhandenen Sensoren und Statusinformationen (Anrufzeitpunkte und -dauer, Netzwerktyp, etc.) können über eine Android App abgefragt werden. Diese Informationen direkt auf dem Telefon abzufragen, hat gegenüber den Fragebögen den Vorteil, weniger anfällig gegenüber Unsicherheiten der Befragung zu sein und nicht von dem Entgegenkommen der Netzbetreiber abhängig zu sein. Eine geeignete Kombination der abgefragten Parameter und der jeweiligen Sendeleistung, respektive der entsprechenden Exposition der Person, sind im Moment noch Gegenstand von laufenden Untersuchungen. Bei diesen Ansätzen werden aber Smartphones nicht alleine, sondern in Kombination mit einem Exposimeter verwendet. Dies erlaubt den Einbezug von allen möglichen Quellen, die auf die entsprechende Person zur gegebenen Zeit einwirken.

Für den Einbezug der Sendeleistungen der mobilen Geräte in ein Monitoring müssten weitere experimentelle Untersuchungen folgen, um eine robuste Methode zu deren Erfassung zu entwickeln. Zum jetzigen Zeitpunkt können nur Näherungsmodelle verwendet werden, wie sie in den aktuellen epidemiologischen Studien entwickelt wurden [Roser et al. (2015)].

5 Experimentelle Evaluation

Zur Illustration der Möglichkeiten eines Monitorings mittels Smartphones wurde eine experimentelle Evaluation durchgeführt. Dazu wurde eine Smartphone App zur Erfassung aller zugänglichen Betriebsdaten entwickelt und implementiert. Das verwendete Smartphone zusammen mit der Applikation stellt somit einen Prototyp eines Systems dar, wie es im Moment für die Erfassung der RF-EMF Felder mit einem Smartphone verwendet werden kann. Im Folgenden sind die Vorgehensweise und die Resultate im Detail beschrieben.

5.1. Vorgehensweise

Auf einer vorgegebenen Route sollen gleichzeitig Messungen mit einem Smartphone, auf dem eine selbst entwickelte Applikation zur Erfassung der zugänglichen Betriebsdaten installiert ist, und einem Exposimeter (ExpoM-RF) durchgeführt werden. Die gesammelten Daten sollen einen Hinweis geben, unter welchen Bedingungen und in welchem Ausmass Messungen mit einer entsprechenden Smartphone App zusammen mit einem geeigneten Protokoll für ein Monitoring verwendet werden können. Entscheidend bei der Auswertung ist eine geeignete Form für die Kombination der Messdaten zu finden. Im vorliegenden Experiment wurden konstante Messbedingungen bezüglich der Position der Messgeräte gegenüber dem Körper geschaffen, um die Variation bezüglich Position am Körper und Bedienungsart während der Messung zu minimieren.

Die Auswertung vergleicht die gleichzeitig erfassten Werte des RSSI der Smartphone App und die Feldstärkemessung (in V/m) mit dem Exposimeter. Der RSSI ist definiert als die am Antennenfusspunkt erfasste Leistung P_r , d.h. der Einfluss der Antenne (Antennengewinn, Richtcharakteristik und Polarisierung) ist in der Messung miteinbezogen. Daraus kann die Feldstärke mit folgendem Zusammenhang berechnet werden:

$$E = \sqrt{\frac{P_r \cdot 4\pi \cdot Z_0}{G_r \cdot \lambda^2}}$$

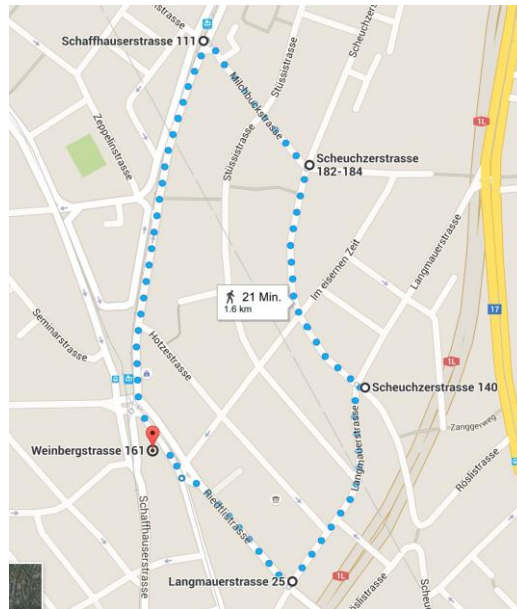
Formel 1: Umrechnung des RSSI in Feldstärke

Für die Umrechnung der erfassten Leistung auf Feldstärke-Werte müssen sowohl der Gewinn der eingebauten Antenne G_r wie auch die Frequenz oder die Wellenlänge λ des empfangenen Signals bekannt sein. Der genaue Vergleich der zwei Messprinzipien ist deshalb nur mit einer entsprechenden Kalibration des Mobiltelefons möglich. Das genutzte Frequenzband muss ebenfalls bekannt sein. Je nach Qualität der Mehrbandantenne kann der Antennengewinn (Gain) frequenzabhängig variieren. Daher sind die folgenden Vergleiche als Approximation zu verstehen. Der RSSI wird unter Einbezug eines dem Antennentypus entsprechenden Antennengewinns und dem genutzten Frequenzband auf Feldstärkewerte umgerechnet.

5.2. Messstrecken

Als erste Route wurde eine Strecke im Quartier Unterstrass beim Schaffhauserplatz in Zürich gewählt. Die Route verläuft entlang einer Hauptstrasse und verschiedener Quartierstrassen. Es befinden sich mehrere Basisstationen entlang der Route, die meistens mit Antennen von

verschiedenen Betreibern und Technologien verschiedener Mobilfunkgenerationen bestückt sind [https://map.geo.admin.ch/]. In Figur 5 ist die Route in 'Google maps' eingezeichnet.



Figur 5: Messroute 1 am Schaffhauserplatz Zürich

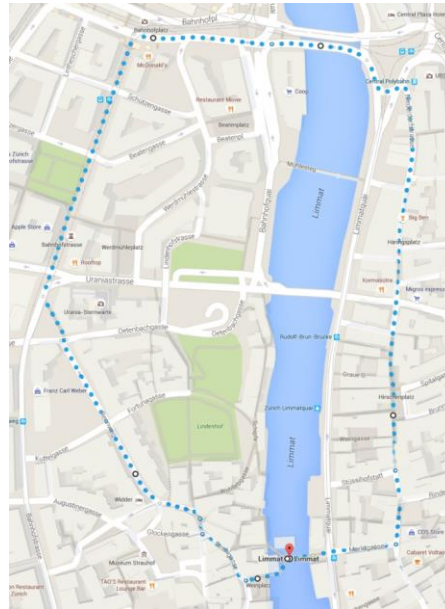
Die Messstrecke wurde zu Fuss abgelaufen. Es wurde darauf geachtet, die Wegzeitunterschiede zwischen den Messungen möglichst gering zu halten. Diverse Strassenüberquerungen und Lichtsignale auf der Strecke der Messroute sowie Unterschiede in der Gehgeschwindigkeit führten jedoch dazu, dass die Dauer der einzelnen Wiederholungen nicht exakt gleich lang ist. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich $\pm 10\%$ (siehe Tabelle 3).

Messung Nr.	Bezeichnung	Uhrzeit (Beginn)	Dauer	SIM Karte im Smartphone
1	Sunrise 1	14:00	22 min	Sunrise
2	Sunrise 2	14:42	24 min	Sunrise
3	Swisscom 1	15:30	22 min	Swisscom
4	Swisscom 2	16:05	20 min	Swisscom
5	Salt 1	16:48	24 min	Salt
6	Salt 2	17:30	20 min	Salt

Tabelle 3: Übersicht der Messrundgänge

Da die Auswertung der Messdaten eine spezifische Dominanz weniger Technologien für die einzelnen Netzbetreiber zeigt, wurde noch eine zweite Messroute definiert. Diese wurde in der Innenstadt gewählt, da aufgrund des hohen Aufkommens an Mobiltelefonie und Datenübertragung die Standorte der Sendeanlagen entsprechend dichter sind. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Wechsel zwischen den verschiedenen Basisstationen und den verschiedenen Technologien häufiger ausfallen als im Quartier, das weniger zentral ist und von weniger Personen

frequentiert wird. Die gewählte Route ist in Figur 6 auch als Ausschnitt von 'Google maps' wiedergegeben.



Figur 6: Messroute 2 durch die Innenstadt von Zürich

5.3. Messausrüstung

5.3.1. Smartphone und Smartphone App

Für die Messungen wurde ein Smartphone Model Galaxy Nexus (Google, Inc.) verwendet. Das Smartphone verwendet Android Version 4.3. Wie vorher beschrieben, stellt das Android 'Application Programming Interface' (API) Klassen zur Verfügung, über die man auf verschiedene Betriebsparameter zugreifen kann. Eine selbst entwickelte App sammelt jede Sekunde einmal alle vorhandenen Daten der im Smartphone vorhandenen Sensoren. Die Daten sind mit einer Zeitangabe versehen und werden in einer Datenbank abgelegt, die am Schluss einer Messreihe in ein CSV-file exportiert werden kann. Tabelle 4 fasst die Namen und eine kurze Beschreibung aller relevanten, durch die Smartphone App zugänglichen Betriebsdaten des Galaxy Nexus Smartphone in einer Liste zusammen.

Sensor Data	Description
MPLAccelerometer	3-Axis acceleration, includes motion and static earth gravity
MPLGravity	3-Axis acceleration data excluding acceleration due to device motion
MPLLinearAcceleration	3-Axis accelerometer data excluding static gravity component
MPLGyroscope	3-Axis gyroscope data
MPLOrientation	Detects portrait / landscape phone orientation
MPLMagneticField	3-Axis DC magnetic field strength (compass)
MPLRotationVector	Absolute 3D phone orientation (software based result)
GP2ALightsensor	Ambient light intensity measurement
BMP180Pressuresensor	Ambient air pressure in hPa
GP2APximitysensor	Possible states: <i>near / far</i>

Telephony	Description
LISTEN_MESSAGE_WAITING_INDICATOR	Tells whether an SMS message is waiting (<i>true / false</i>)
LISTEN_SERVICE_STATE	Possible states: <i>in service / out of service</i>
LISTEN_SIGNAL_STRENGTHS	RSSI values, GSM signal strength, CDMA Ec/I ₀
CELL_INFOS	Cell information (not always available, depends on phone model and network operator)
CALL_STATE	Possible states: <i>idle / ringing / off hook</i>
NETWORK_COUNTRY	Name of the country (abbreviation)
NETWORK_OPERATOR	Name of the cellular network operator
NETWORK_TYPE	Currently active network type: <i>GSM / GPRS / HSDPA</i> etc. Depends from the standards supported by the phone.

Data Traffic	Description
DATA_STATE	Cellular data connection status (<i>connected / disconnected</i>)
DATA_ACTIVITY	Possible states: <i>none / In / out / inout</i>
DATA_RX_MOBILE	Cumulative data received over cellular networks (Kbytes)
DATA_TX_MOBILE	Cumulative data transmitted over cellular networks (Kbytes)
DATA_RX_TOTAL	Cumulative data received including Wi-Fi traffic (Kbytes)
DATA_TX_TOTAL	Cumulative data transmitted including Wi-Fi traffic (Kbytes)

Wi-Fi	Description
WI-FI_STATE	Possible states: <i>enabled / disabled</i>
SCAN_RESULTS	Name and RSSI of visible Wi-Fi access points

Tabelle 4: Liste der wichtigsten zugänglichen Daten der verschiedenen Sensoren und der Betriebsdaten, die auf dem Galaxy Nexus Smartphone, das für diese Messungen eingesetzt wurde, zugänglich sind.

Eine ausführlichere Beschreibung der Betriebsparameter ist in der Android Referenz (<http://developer.android.com>) zu finden. Im Fall der Sensordaten hängen die Anzahl der Sensoren und deren Namen vom jeweiligen Smartphone ab. Dennoch enthalten die meisten heutigen Smartphones Hardware für die Detektion von Beschleunigung, Orientierung und Distanz zum Körper. Wenn die Ortungsdienste eingeschaltet sind, kann auch die Position des Smartphones über die Zeit aufgezeichnet werden. Zusätzlich zu den Sensordaten werden Betriebsdaten wie

Netzwerktyp, Signalstärke Indikator (RSSI) und die über lokale oder Mobilfunknetzwerke übertragene Datenmenge in Bytes erfasst.

5.3.2. Feldstärkemessung mittels Exposimeter

Für die Feldstärkemessungen wurde das von Fields at Work entwickelte Exposimeter ExpoM-RF verwendet. Das ExpoM-RF misst bandselektiv die RMS Werte der elektrischen Feldstärke in den verschiedenen 'uplink' und 'downlink' Bändern. Dadurch können die vom Smartphone gemessenen RSSI mit den aktuell vorhandenen Feldstärken verglichen werden, die von allen vorhandenen Basisstationen aller Netzbetreiber in der Umgebung erzeugt werden.



Figur 7: ExpoM - RF Exposimeter

5.3.3. Messanordnung

Das Exposimeter und das Smartphone wurden beide in einem Rucksack mit entsprechenden Fächern am Rücken getragen. Um den benötigten Abstand zum Körper der Person zu garantieren, wurde im grossen Rucksackfach vor dem Exposimeter eine Kartonschachtel platziert. Dadurch befinden sich beide Geräte in einem Mindestabstand von 15cm vom Körper. Das Exposimeter selber wurde ins hinterste Aussenfach gelegt. Das Smartphone wurde oberhalb des Exposimeters in einem weiteren Fach mit der Antenne nach aussen positioniert.

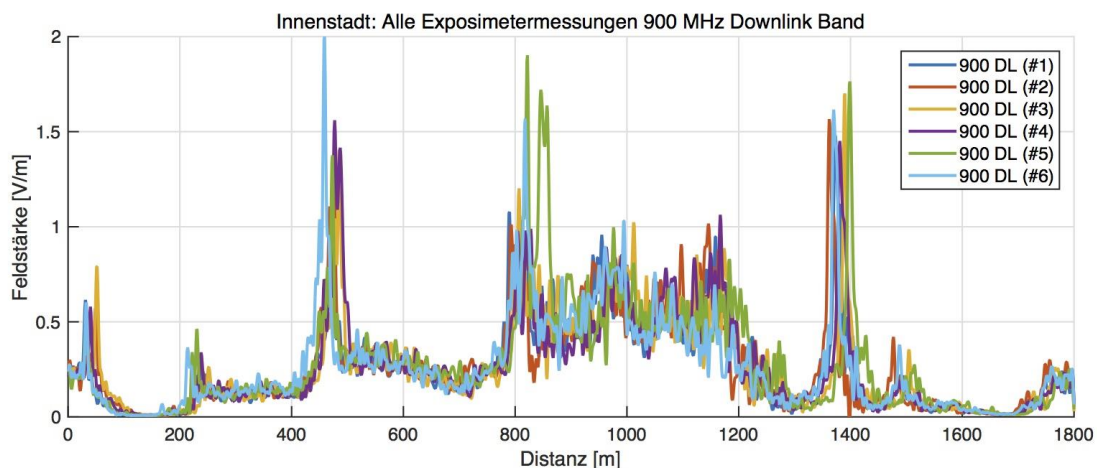


Figur 8: Messrucksack, der für den empirischen Teil verwendet wurde. Exposimeter (mittleres Bild) und Smartphone (Bild rechts) wurden in die Aussenfaschen versorgt. Beide Geräte befinden sich in einem Abstand von 15 cm oder mehr vom Körper.

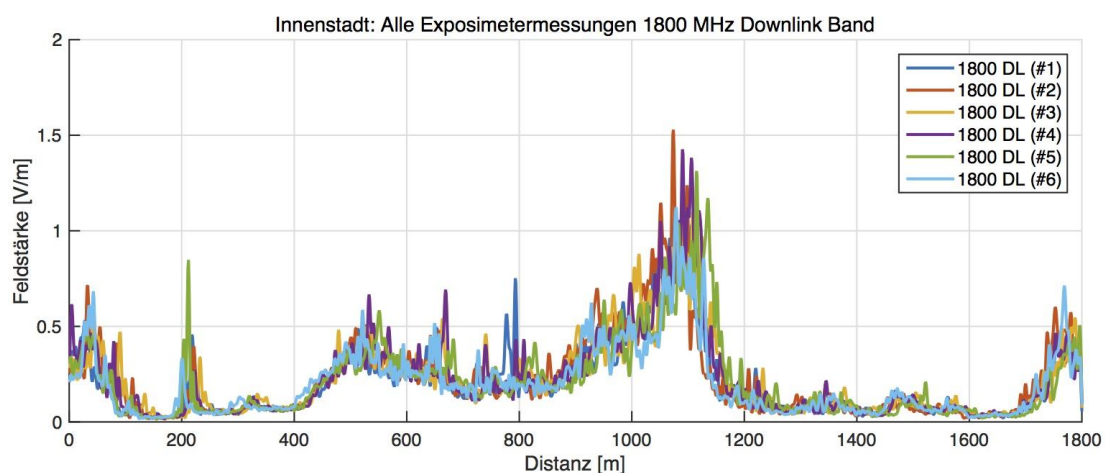
5.4. Ergebnisse der Messreihen

5.4.1. Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungen

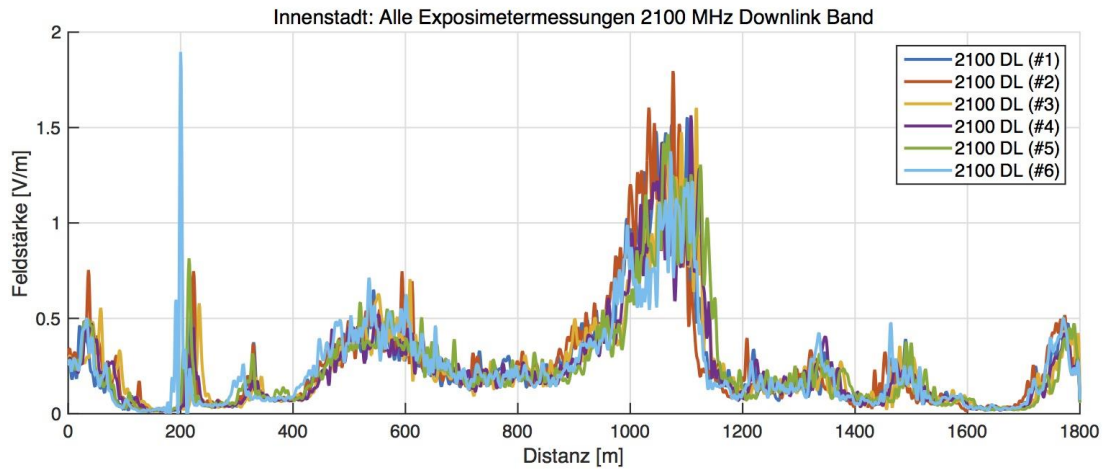
Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Messgänge zu beurteilen, wurden die Exposimeterdaten für die dominierenden Technologien extrahiert. In Figur 9 sind die Messdaten für das 900 MHz-'downlink'-Band dargestellt. Figur 10 und Figur 11 zeigen die entsprechenden Messdaten für das 1800 MHz-'downlink' und das 2100 MHz-'downlink' Band. Die Daten zeigen mit wenigen Ausnahmen eine sehr hohe Repetierbarkeit zwischen den Messgängen. Der Vollständigkeit halber sind in Figur 12 und Figur 13 die durchschnittlichen Feldstärken gemittelt über 6 Messgänge in den downlink-Frequenzbändern gezeigt. Bei den Messungen im Quartier Unterstrass in Zürich sieht man deutlich, dass die Messungen von einem Frequenzband ('downlink' 2100 MHz) dominiert sind. Auf der Route in der Innenstadt Zürich sind die Anteile auf die verschiedenen Frequenzbänder verteilt.



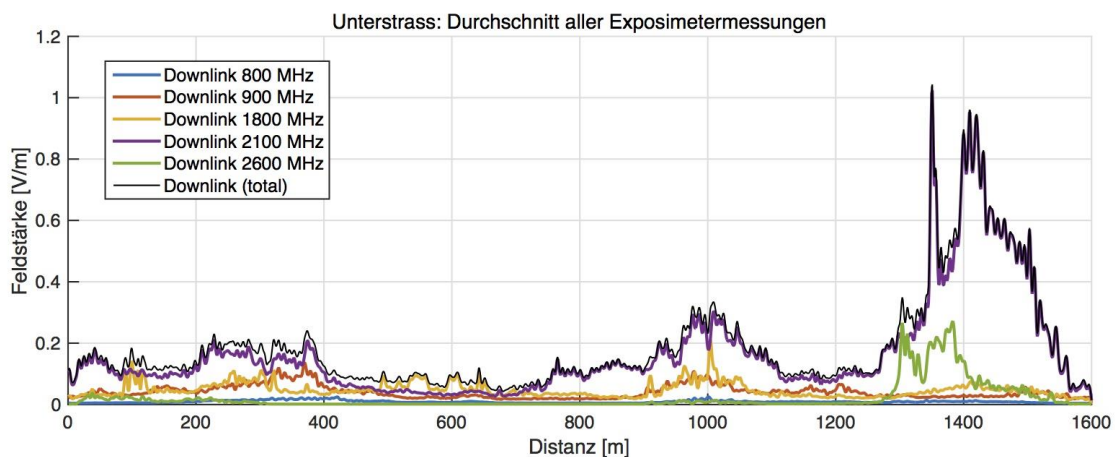
Figur 9: Exposimeter-Messungen der Feldstärken im 900 MHz-downlink-Band für die verschiedenen Rundgänge auf derselben Route in der Innenstadt Zürich .



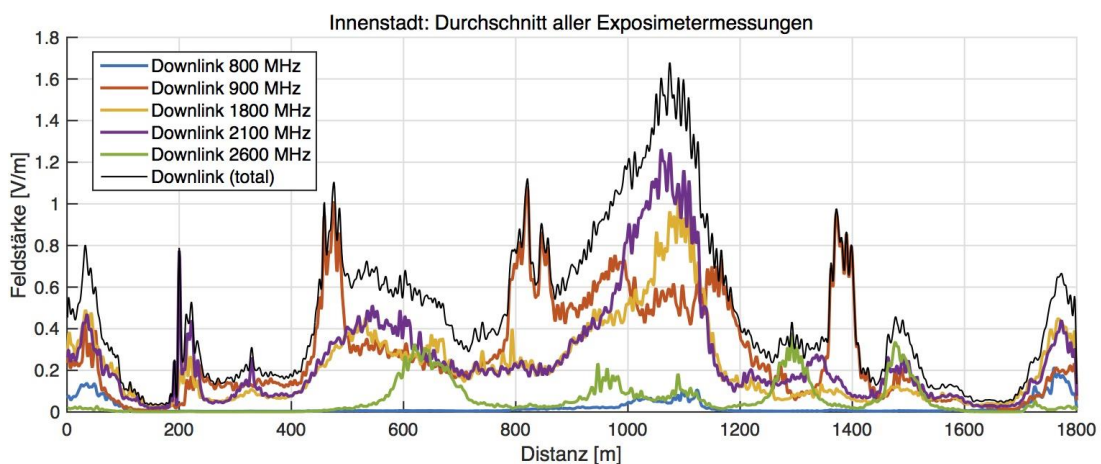
Figur 10: Exposimeter-Messungen der Feldstärken im 1800 MHz-downlink-Band für die verschiedenen Rundgänge auf derselben Route in der Innenstadt Zürich .



Figur 11: Exposimeter-Messungen der Feldstärken im 2100 MHz-downlink-Band für die verschiedenen Rundgänge auf derselben Route in der Innenstadt Zürich.



Figur 12: Vergleich der durchschnittlichen Feldstärken in den verschiedenen downlink-Frequenzbändern gemessen mit dem Exposimeter entlang der Messroute im Quartier Unterstrass in Zürich.

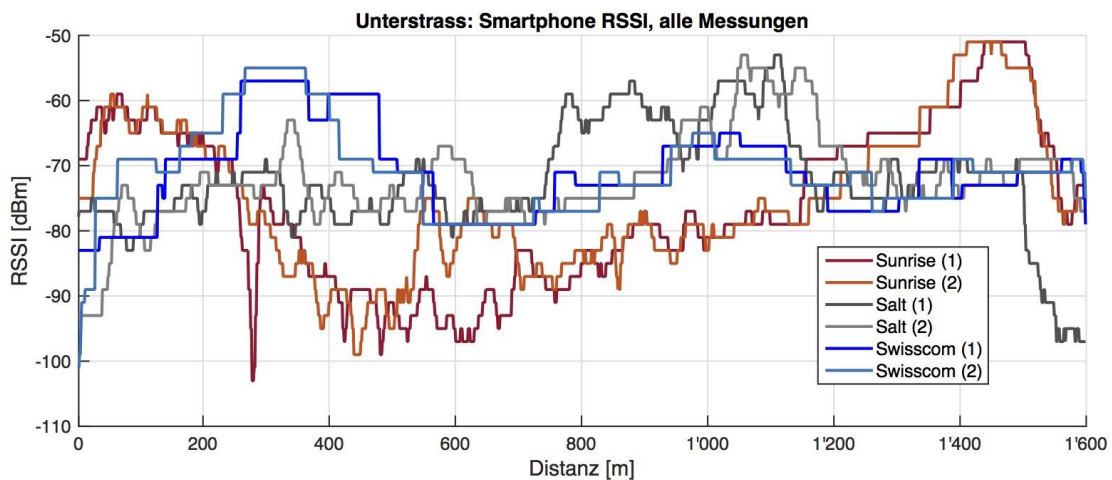


Figur 13: Vergleich der durchschnittlichen Feldstärken in den verschiedenen downlink-Frequenzbändern gemessen mit dem Exposimeter entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich.

5.4.2. RSSI Messung aus der Smartphone App

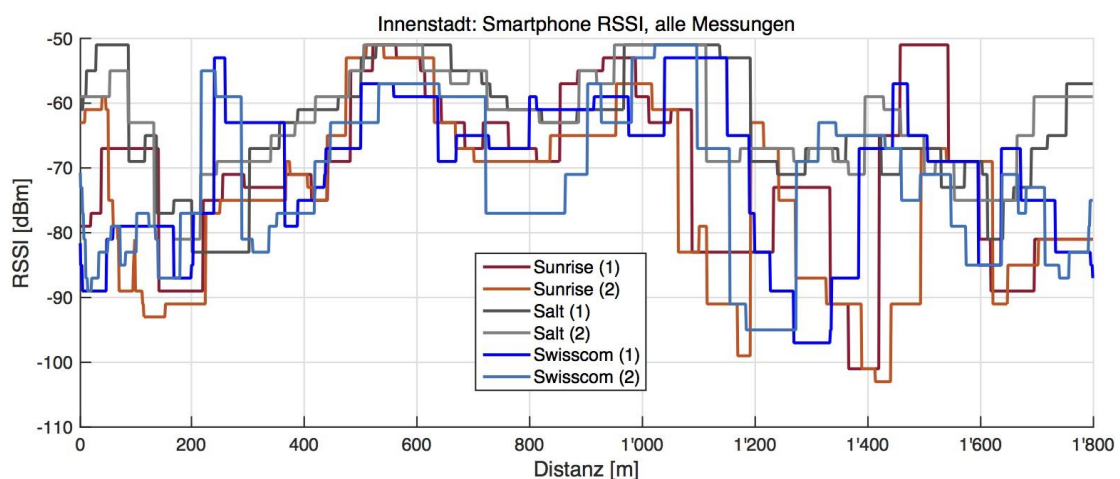
Figur 14 und Figur 15 zeigen die Rohdaten des gemessenen RSSI für alle Messungen der verschiedenen Netzbetreiber. Aus den verschiedenen Messungen ist ersichtlich, dass die Variationen zwischen den zwei RSSI-Messung desselben Anbieters auf der Innenstadt-Route (Figur 15) grösser sind als auf der Quartier-Route (Figur 14). Zudem sind Unterschiede in den update-Raten für den RSSI zwischen den verschiedenen Netzbetreibern sichtbar.

Messroute 1: Unterstrass, Zürich



Figur 14: Rohdaten der Messungen RSSI Signalstärkeparameter der verschiedenen Netzbetreiber aufgezeichnet mit der Smartphone App entlang der Messroute in der Quartier Unterstrass.

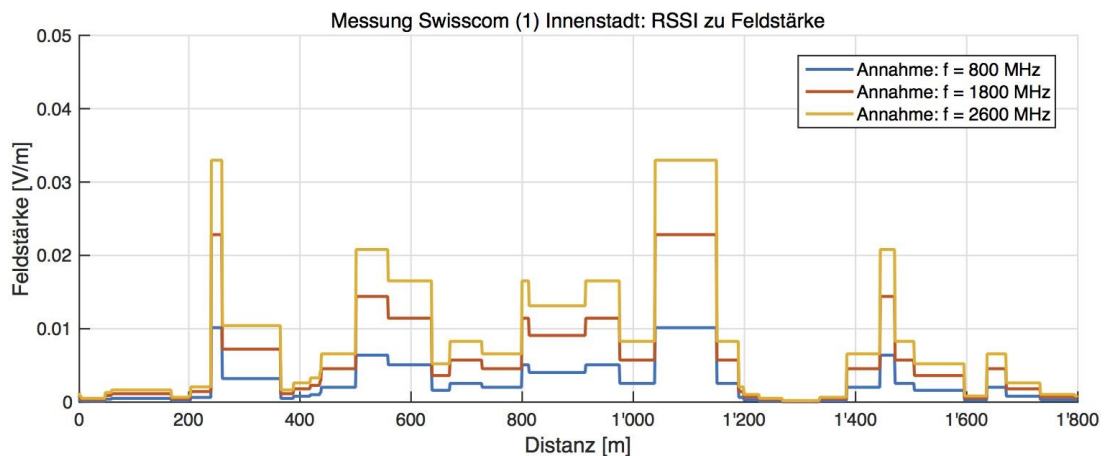
Messroute 2: Innenstadt, Zürich



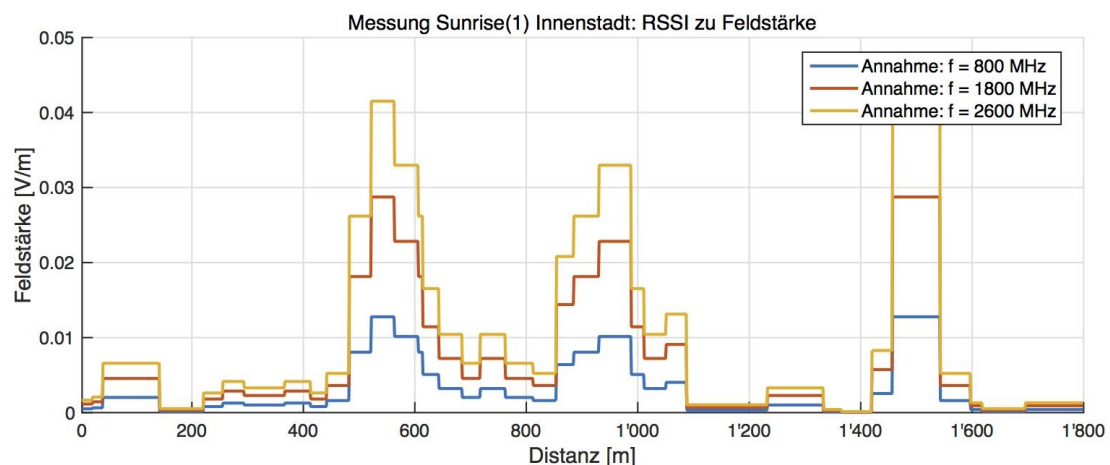
Figur 15: Rohdaten der Messungen RSSI Signalstärkeparameter der verschiedenen Netzbetreiber aufgezeichnet mit der Smartphone App entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich.

5.4.1. Umrechnung der RSSI-Daten

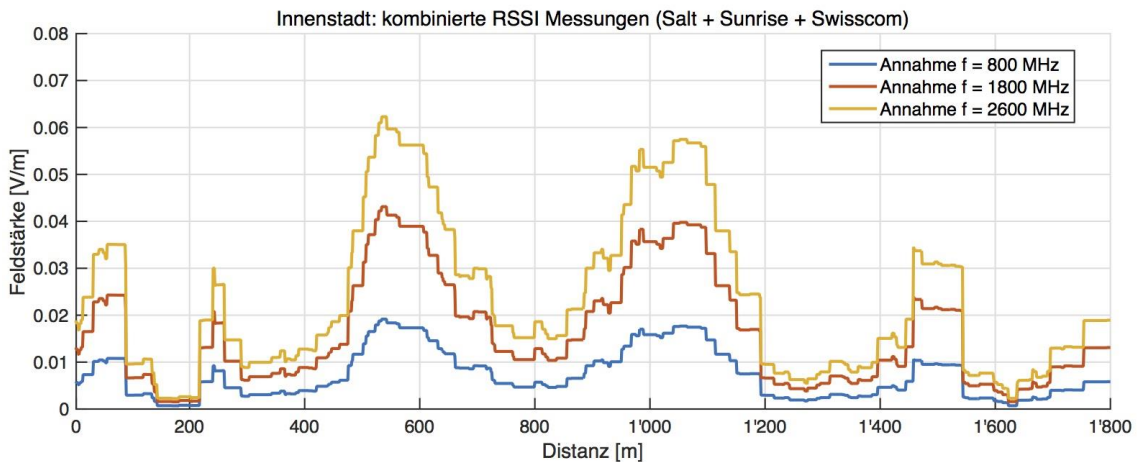
Die direkte Umrechnung der RSSI-Signalstärke gemäss Formel 1 ist von der jeweiligen Frequenz des empfangenen Signals abhängig. Figur 16 zeigt die Variation der Umrechnung des RSSI-Signalstärke Indikators gemessen mit der Swisscom-SIM-Karte abhängig von der gewählten Frequenz. Das jeweils genutzte Frequenzband kann mit aktuellen Smartphones nicht aufgezeichnet werden. Dies würde erlauben den entsprechenden RSSI Wert mit der verwendeten Technologie und dem genutzten Frequenzband umzurechnen. In Figur 17 ist zum Vergleich die Variation der entsprechenden Umrechnungen für die Messdaten mit der Sunrise-SIM-Karte gezeigt. Aus den zwei Figuren sind unter anderem die unterschiedlichen update-Raten für den RSSI der Netzbetreiber ersichtlich. Die Variation in der Umrechnung beträgt bis zu Faktor 3 zwischen 800 und 2600MHz.



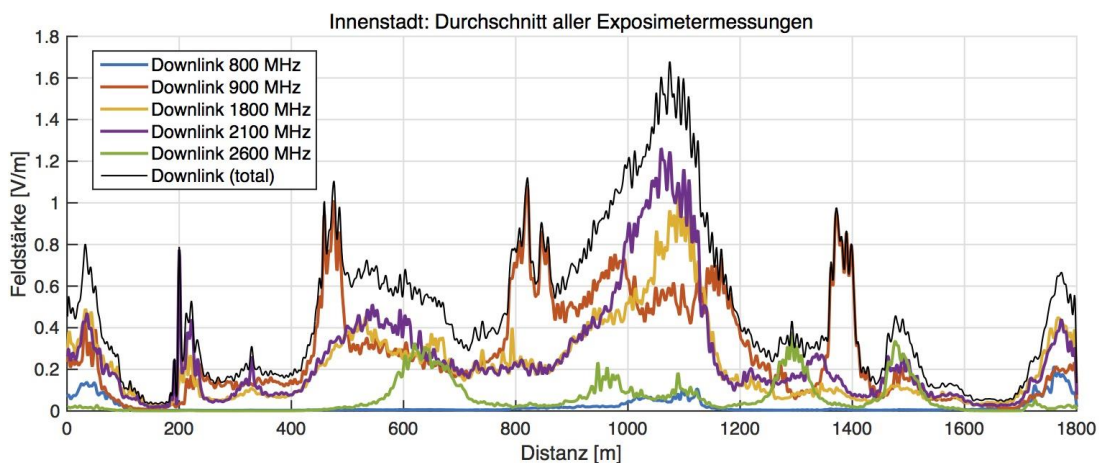
Figur 16: Umrechnung der RSSI Signalstärkeparameter aufgezeichnet mit der Smartphone App mit der Swisscom-SIM Karte entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich für verschiedene Annahmen für die Frequenz.



Figur 17: Umrechnung der RSSI Signalstärkeparameter aufgezeichnet mit der Smartphone App mit der Sunrise-SIM Karte entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich für verschiedene Annahmen für die Frequenz.



Figur 18: Umgerechneter RSSI für die Summe über die verschiedenen Netzbetreiber für verschiedene Annahmen für die Frequenzen, gemessen mit dem Smartphone entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich.



Figur 19: Vergleich der durchschnittlichen Feldstärken in den verschiedenen downlink-Frequenzbändern gemessen mit dem Exposimeter entlang der Messroute in der Innenstadt Zürich.

Figur 18 zeigt die Variation der über die verschiedenen Netzbetreiber summierten Feldstärke für die Messroute in der Innenstadt. Der Verlauf zeigt eine Ähnlichkeit bezüglich den Maxima und Minima mit dem Verlauf der Exposimeterdaten, die in Figur 19 nochmal zum Vergleich abgebildet sind. Es kann aber auch klar gesehen werden, dass relevante Anteile der Feldstärken, die durch die Mobilfunktechnologien erzeugt werden, nicht oder nur mit Verzögerung erfasst werden. Wie vorher ausgeführt, wird vom aktuell genutzten Standard nur ein Teil des Frequenzbandes gemessen. Grössenordnungsmässig liegen die umgerechneten Daten um einen Faktor 10 unterhalb der mit dem Exposimeter gemessenen Daten. Durch die Update-Raten für die Erfassung des RSSI werden auch verschiedene Anteile nicht erfasst oder unter- respektive überbewertet.

5.5. Diskussion

Mit der Smartphone App werden die vom Smartphone jeweils genutzten Funkdienste und Frequenzbänder regelmässig erfasst. Die anderen vorhandenen Bänder desselben Netzbetreibers werden jedoch nicht oder nur teilweise erfasst.

Die Summation der Daten der verschiedenen Anbieter, d.h. verschiedene Messungen mit verschiedenen SIM-Karten in demselben Smartphone weisen deutliche Unterschiede gegenüber den Exosimetermessungen auf. Diese sind verursacht durch die verschiedenen Update-Raten der verschiedenen Netzbetreiber und der Unsicherheit bezüglich des momentan verwendeten Frequenzbandes. Welche Faktoren in welchem Ausmass zu den Unterschieden führen, müsste durch weitere gezielte Messungen und Experimente untersucht werden.

Aufgrund dieser Messreihen kann aber vorläufig festgestellt werden, dass die Erfassung der verschiedenen Frequenzbänder durch eine Smartphone App im Moment kein genügendes Resultat liefert. Dies müsste in zukünftigen Versionen der Smartphones gezielt ermöglicht werden. Zudem wäre eine entsprechende Kalibration aller verwendeten Smartphones zusammen mit der Evaluation einer Näherung für die Umrechnung des RSSI auf die aktuellen Feldwerte nötig.

5.6. Einschränkungen eines EMF-Monitorings mit Smartphones

Im Folgenden sind die festgestellten Limitierungen für ein Monitoring mittels Smartphones zusammengefasst:

- Hohe Vielfalt an Telefonmodellen, regelmässige Updates, Kalibrationen und Anpassungen der Software nötig
- RSSI repräsentiert vor allem die Leistung im momentan genutzten Frequenzband
- RSSI repräsentiert nur einen Teil des momentan genutzten Frequenzbandes
- RSSI repräsentiert die aktuelle Signalstärke des momentanen Betriebszustandes und der momentanen Position des Smartphones am Körper des Benutzers
- Sendeleistung des Smartphones ist über Android API nicht zugänglich
- Das aktuell genutzte Frequenzband ist in der Regel nicht bekannt.
- Die Uplink-Aktivität anderer Telefone wird nicht erfasst
- Monitoring auf Mobilfunkfrequenzen und WiFi beschränkt
- Momentan Einschränkung auf Android Smartphones; Zugang auf Apple-iPhones und Windows-Phones unterliegt einer Zulassung des jeweiligen App-Store Betreibers

Einige der Limitierungen könnten theoretisch durch eine Erweiterung des API's verbessert werden. Wenn es durch eine Applikation möglich wäre, regelmässige 'scans' der 'sichtbaren' Basisstationen und deren Signalstärke zu erfassen, könnte ein umfassenderes Monitoring realisiert werden. Die Genauigkeit der Erfassung könnte durch entsprechende Anpassungen in der gemessenen Bandbreite und durch eine Kalibration erreicht werden. Für diese Erweiterungen ist jedoch ein Entgegenkommen der Smartphone Hersteller nötig, die entsprechende Erweiterungen an der Software-Schnittstelle vornehmen müssten und dadurch proprietäre Schnittstellen offenlegen würden.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die technischen Möglichkeiten für ein Monitoring mittels Smartphones wurden anhand von Smartphones mit dem Open-Source Betriebssystem Android eingehend analysiert und anhand verschiedener Typen von aktuellen Smartphones evaluiert. Die relevanten Aspekte im Aufbau der Hardware und in den vorhandenen Programmierschnittstellen wurden herausgearbeitet. Es hat sich herausgestellt, dass die Anzahl durch Smartphone Apps direkt zugänglichen Betriebsparameter für die Messung von empfangenen Leistungen sehr klein ist. Bezüglich Leistungserfassung beschränkt es sich im Wesentlichen auf die Erfassung des internen Indikators für die Signalstärke (RSSI) im gewählten Frequenzband, des aktuell genutzten Mobilfunkstandards und der momentan aktiven Basisstation. Die meisten Betriebsparameter, die für den Gebrauch des Smartphones für die Telefonie oder die Datenübertragung verwendet werden, sind in einer durch die Programmierschnittstelle unzugänglichen Ebene versteckt. Diese proprietäre Ebene ist zudem von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich und auch aus Kompatibilitätsgründen für den direkten Zugriff gesperrt. Diese Tatsache schränkt die Verwendung der in einem Smartphone enthaltenen Hardware stark ein.

In einer experimentellen Evaluation mit einem Smartphone und einer speziell dafür entwickelten und implementierten App wurden zwei Messrouten in der Stadt Zürich mit SIM-Karten verschiedener Netzbetreiber je zweimal abgelaufen. Die mit dem Smartphone gemessenen Daten für die Signalstärke des empfangenen Signals der Basisstation wurden in ein Feldstärke-Äquivalent umgerechnet. Die erhaltenen Werte wurden qualitativ mit den Feldstärken, gemessen mit einem Exosimeter, verglichen. Dabei hat sich klar gezeigt, dass die Summe der vom Smartphone erfassten RSSI der verschiedenen Netzbetreiber, weder als robuste Näherung noch als zuverlässige Grösse für die Erfassung von Änderungen in der elektrischen Feldstärke verwendet werden kann.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass ein Monitoring mit aktuellen Smartphones nicht realisierbar ist. Die Erfassung der Immissionen, die durch das Smartphone gemessen werden, beschränkt sich auf den Wert des Indikators für die Signalstärke (RSSI) der aktuellen Basisstation, der auf einer internen Leistungsmessung eines Teils des aktuell genutzten Frequenzbandes beruht. Um eine Verbesserung und eine Erweiterung der Messprozedur für die Zwecke eines Monitorings zu erreichen, wären Änderungen in der Softwareschnittstelle der Smartphones nötig, die mehrere proprietäre Teile des Smartphones betreffen. Dies würde ein entsprechendes Entgegenkommen der Smartphone-Hersteller voraussetzen, was als eher unwahrscheinlich angenommen wird. Ebenfalls müsste die Messung des RSSI erweitert werden, damit die vollständige Bandbreite der jeweiligen Bänder vermessen werden kann und nicht nur ein Teil davon. Im Weiteren müssten die verwendeten Smartphones mit den verschiedenen Quellen und Signalen, wie sie in den aktuell verwendeten Mobilfunkstandards vorkommen, kalibriert werden. Kombiniert mit einer regelmässigen Erfassung der umliegenden Basisstationen und einer direkten Erfassung der Feldstärke innerhalb der verschiedenen Bänder würde ein Monitoring der Mobilfunkbänder möglich. Um den vorgesehenen Betrieb eines Smartphones nicht zu beeinträchtigen, wäre dazu eine zusätzliche, autonome Hardwareeinheit im Smartphone nötig.

7 Literatur

- Bhatt C. R., Redmayne M., Abramson M. J., Benke G. (2015): Instruments to assess and measure personal and environmental radiofrequency-electromagnetic field exposures. *Australas Phys Eng Sci Med.* 2015 Dec 18. [Epub ahead of print].
- Dürrenberger G., Fröhlich J., Rösli M., Mattsson M.-O. (2014), EMF Monitoring - Concepts, Activities, Gaps and Options, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, No. 11, pp. 9460 - 9479.
- Gati A., Conil E., Wong M. F., Wiart J. (2010): Duality Between Uplink Local and Downlink Whole-Body Exposures in Operating Networks, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52, No. 4, pp. 829-836.
- Goedhart G., Vrijheid M., Wiart J., Hours M., Kromhout H., Cardis E., Eastman Langer C., de Llobet Viladoms P., Massardier-Pilonchery A., Vermeulen R. (2015), Using Software-Modified Smartphones to Validate Self-Reported Mobile Phone Use in Young People: A Pilot Study, *Bioelectromagnetics* 36:538 – 543.
- Roser K., Schoeni A., Bürgi A., Rösli M. (2015), Development of an RF-EMF Exposure Surrogate for Epidemiologic Research, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, No. 12, pp. 5634-5656.
- Rösli M., Foerster M., Roser K., Schöni A., Urbinello D., Struchen B. (2015), Stichprobenkonzept für Messungen der nicht-ionisierenden Strahlung mit Exposimetern, Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).