

Wer liefert welche Komponenten für ein Mobilfunknetz?

Felix Voglsam, Julian Timo Magin und Wolfgang Eisenhut,

Zusammenfassung—This paper gives an overview about the basic components of a Long Term Evolution network (LTE). Furthermore, it deals with a specific scenario to build up a LTE network. In that case the assumption is to be an owner of an island with the intention to build a LTE infrastructure there. On the one hand open source software solutions used to run without proprietary hardware are discussed as well as on the other hand possible LTE providers, that might also offer specialised services, are taken into consideration in this paper.

Index Terms—4G mobile communication, Communication equipment, Communication systems, Open source software, Share prices

I. EINLEITUNG

WELCHE Infrastruktur ist für ein State-of-the-art 4. Generation/Long-Term Evolution (4G/LTE) Mobilfunknetz unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz auf einer Insel mit ungefähr 500 Einwohnern geeignet, ist die zentrale Frage dieser Arbeit.

A. Gliederung

Nach der Einleitung mit der Gliederung und den Prämissen folgt das Kapitel Aufbau LTE, welches die grundsätzliche Netzarchitektur erklärt. Danach werden im Kapitel Komponenten die benötigten Bestandteile vorgestellt. Das Kapitel Open Source Lösung stellt alternative Open Source Lösungen vor. Kapitel Make or Buy stellt die vorgeschlagene Lösung vor und im Kapitel Sicherheit werden Risiken aufgezeigt bevor die Arbeit schließlich mit der Conclusion endet.

B. Prämissen

Es wird von einer Insel in der Südsee mit 500 Einwohnern ausgegangen. In dieser Arbeit wird nur der Telefon und Datendienst des Netzes untersucht. Die Anbindung an internationale Netze ist nicht Inhalt der Arbeit. Die Staatsform der Insel ist die parlamentarische Republik. Deren gewählte Vertreter treffen die Entscheidung über das zu erbauende Mobilfunknetz. Um das Zusammenleben der Einwohner zu regeln, tritt auch auf der Insel eine Rechtsprechung in Kraft, welche die Einhaltung von legislativen Vorgängen überwacht. Somit unterliegen auf der Insel die Telekommunikationsanbieter auch gesetzlichen Regelungen und Vorgaben.

Felix Voglsam, Julian Timo Magin, und Wolfgang Eisenhut were with the FH Campus Wien (FHCW) Favoritenstraße 226 1100 Wien, Austria e-mail: felix.voglsam@stud.fh-campuswien.ac.at.

Manuscript received December 1, 2019; revised December 23, 2019.

C. Use Cases

Aufgrund der Tatsache, dass sich das 4G LTE Mobilfunknetz über verschiedene Sektoren wie dem Öffentlichen Dienst, der Energieversorgung, dem Transportwesen, wie auch dem Bildungsbereich sowie auch dem Gesundheitswesen erstrecken soll, ergeben sich als Anforderungen vor allem eine hohe Abdeckung, sowie hohe Datenraten, welche für die Benutzer, also die Inselbewohner, verfügbar sein sollen [1].

Zusätzlich verfügt die zu betrachtende Insel über ein Seenotrettungssystem, präziser gesagt ein maritimes Rettungs-Koordinationszentrum, über welches mit Hilfe von Rettungsschiffen und Rettungsdrohnen in Seenot geratene Inselbewohner lokalisiert werden können [2]. Des Weiteren bewegen sich die Einwohner auf dem Staatsgebiet der Insel in autonom fahrenden Autos, weshalb auch hierfür entsprechende Anforderungen in Bezug auf die Komponenten für vehikulare Kommunikation bei der Planung eines Mobilfunknetzes berücksichtigt werden sollte. Da eine Infrastruktur von Grund auf erbaut wird, muss keine Rücksicht auf etwaige bestehende Legacy Architekturen genommen werden, in welche neue Komponenten zu integrieren sind.

D. Anbieter am Markt

Eine Vielzahl von Anbietern für die Errichtung eines Mobilfunknetzes bestimmen derzeit den globalen LTE Advanced Markt. Die dominierenden Unternehmen an diesem sind neben Ambra Solutions, Arris International, Athonet, Cisco, Comba, DruidSoftware, Ericsson, Future Technologies, General Dynamics und Huawei. Neben diesen existieren aber auch weitere Anbieter wie beispielsweise Lemko, Luminare Wireless, Mavenir, NEC, Netnumber, Nokia, Pdvwireless, Quortus, Redline Communications, Samsung, Sierra Wireless, Star Solutions, Ursys, Verizon und Zinwave [3]. Abhängig von den Use Cases ergeben sich bei der Analyse und beim Design spezifizierte funktionale wie auch Nicht-funktionale Anforderungen. Durch die konkrete Betrachtung einer Einführung eines Mobilfunknetzes gilt es, sich mit auftretenden Fragestellungen wie dem Angebot an qualifiziertem Fachpersonal, welches auf den LTE Advanced Standard geschult ist, auseinander zu setzen. Dieses kann dann sowohl in den Phasen der Analyse und des Designs als auch in denen der Implementierung sowie bei Wartung und beim Testen vor Inbetriebnahme gezielt eingesetzt werden. Ist entsprechendes Kapital vorhanden, um externer Berater einzufließen. Sofern diese schon einmal ähnliche Projekte realisiert haben, ist es sinnvoll mit Hilfe deren Erfahrungswerten von vergangenen Projekten in Bezug auf Planung, Koordination

Aufwandsabschätzungen vorzunehmen. Somit lassen sich Fehleinschätzungen minimieren, im ideal Fall gar vermeiden. Sind generell Fachkräfte mit Domäne spezifischem Know-How verfügbar oder ist es sinnvoll Schulungszentren aufzubauen, um langfristig Abhängigkeiten von Schulungsdienstleistern zu verringern.

LTE ist im Release (R)8 im Dezember 2008 von der Third Generation Partnership Project (3GPP) eingefroren worden und stellt die Basis des ersten LTE Equipments dar. Der R8 stellt eine Verbesserung des 3G Standards dar, zählt aber zu 3G [4, S. 32ff]. Erst LTE R10, auch LTE+ oder LTE Advanced genannt, als Standard von der 3GPP oder der International Mobile Telecommunications (IMT)-Advanced Standard der International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) erfüllen die Anforderungen von 4G und werden in dieser Arbeit vereinfachend LTE genannt [5].

II. AUFBAU LTE

Der Treiber bei der Entwicklung von LTE war die Erhöhung der Kapazität. Es werden kosteneffizient höhere Bitraten (Download (DL): 3 Gbit/s, Upload (UL): 1,5 Gbit/s) ermöglicht. Dies wird durch höhere Link Spektrale Effizienz bei R10 von 30(bit/s)/Hz im Gegensatz von R8 mit 16(bit/s)/Hz erreicht. Dadurch erhöht sich die Anzahl der möglichen, gleichzeitig aktiven Teilnehmer des Netzes. Ebenso erhöht sich die System Spektrale Effizienz bei R10 für den DL mit Multiple Input–Multiple Output (MIMO) auf 2,4(bit/s)/Hz/Zelle. Im Gegensatz zu 3G/LTE wird dies durch Carrier Aggregation (CA), gesteigener Einsatz von Multiantennen Techniken und Relay Nodes (RN) erreicht [5]. Zurzeit ist R15 der höchste stabile Release der 3GPP für LTE. Ab R12 werden die Releases als LTE Advanced Pro und 4,5G genannt, um die Annäherung an den neuen 5G Standard zu symbolisieren. LTE ist ein Markenname des European Telecommunications Standards Institute (ETSI). R15 bietet eine höchste Link Spektrale Effizienz von 30(bit/s)/Hz beim DL und 15(bit/s)/Hz bei einer DL Antennenkonfiguration von 8x8 und UL 4x4. Bei 4x4 wird für den DL eine System Spektrale Effizienz von 0,12(bit/s)/Hz/Zelle/Teilnehmer, wenn sich 10 Teilnehmer in der Zelle befinden. Voice over Internet Protocol (VoIP) ist in jeder Antennenkonfiguration möglich. Abhängig vom Frequenzband sind Spitzengeschwindigkeiten der mobilen Endgeräte (zB Handy, Datenwürfel) technisch User Equipment (UE) genannt von 350 bis 500 km/h möglich [6].

A. Architektur LTE

Die Daten werden paketorientiert mit dem Internet Protocol (IP) übermittelt. Die Architektur besteht aus vier Blöcken. Das UE ist per Funk mit dem Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) verbunden. Das E-UTRA ist über den Evolved NodeB (eNodeB) mittels Leitungen mit dem Evolved Packet Core (EPC) verbunden.

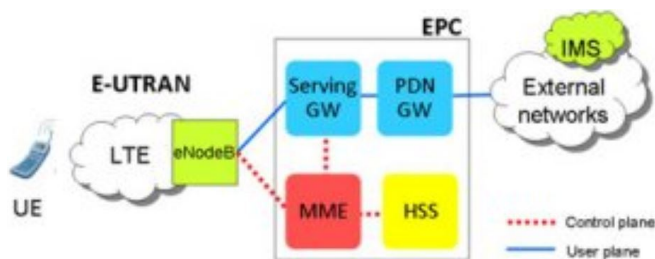


Abbildung 1: Architektur LTE [7]

Die Signalisierungsdaten und die Mediendaten werden separat übermittelt. Die Mediendaten werden der User Plane und die Signalisierungsdaten der Control Plane übergeben. Leitungen verbinden das EPC mit externen Telefonnetzen sowie Datennetzen, dem IP Multimedia Core Network Subsystem (IMS, siehe Abb 1) [7]. E-UTRAN wird auch Radio Access Network (RAN) und das EPC Core Network (CN) genannt. System Architecture Evolution (SAE) ist der Standard der Architektur von der 3GPP für das CN. LTE und SAE beinhalten das Evolved Packet System (EPS). Dies bietet einen nahtlosen Benutzungs des IP vom UE zum Packet Data Network (PDN) und gestattet sowohl Quality of Service (QoS) als auch IP Dienste wie zB VoIP. Es können mehrere Kanäle mit unterschiedlichem QoS von verschiedenen PDN'S für unterschiedliche Dienste angeboten werden [8].

B. Logische Komponenten

1) *User Equipment*: Ab R12 sind der DL und UL in eigenen Kategorien getrennt spezifiziert. Die DL und UL Kategorien können unterschiedlich sein [9]. Das UE ist nicht Teil der zu beschaffenden Infrastruktur.

2) *E-UTRAN*: Die Architektur im E-UTRAN (siehe Abb. 2) ist bewusst flach gehalten und besteht nur aus miteinander über das X2 Protokoll kommunizierenden eNodeB's. Auch die Übergabe von UE an andere eNodeB's regeln diese ressourcenschonend alleine, ohne zentralen Controller. Über das S1 Protokoll kommuniziert ein eNodeB mit den CN Knoten. Der Mobility Management Entity (MME) werden die Signalisierungsdaten und dem Serving Gateway (SGW) die Mediendaten übergeben. Mit dem S1-flex Protokoll versorgen mehrere CN Knoten (MME/S-GWs) eine gemeinsame Region (Pool Area) durch Vernetzung mit den eNodeB's, dem MME/S-GW Pool. Die UE's einer Zelle, die von einem eNodeB betreut werden, sind von mehreren CN-Knoten unterstützt. Das verhindert einen Single Point of Failure bei den CN-Knoten und erlaubt Load Balancing. Der UE Kontext verbleibt normalerweise bei einem MME, solange sich die UE in der selben Pool Area befindet [8].

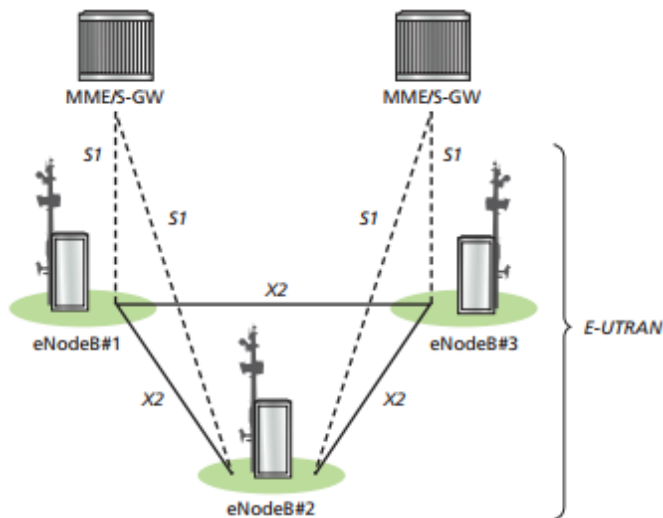


Abbildung 2: E-Utran Architektur [8]

Die Schnittstelle zum UE sind die Access Stratum (AS) Protokolle [10, S. 131]. Das E-UTRAN ist für das Radio Resource Management (RRM), also für Funk relevante Funktionen, wie zum Beispiel die Bestimmung der zur Verfügung stehenden Ressourcen am UE, sowie für die Kompression und Verschlüsselung der Daten, zuständig. Ein UE gehört zu genau einem eNodeB [8].

3) *EPC*: Die wichtigsten logischen Knoten sind:

- PDN Gateway (P-GW)
- Serving Gateway (S-GW)
- Mobility Management Entity (MME)
- Home Subscriber Server (HSS)
- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)

Das PCRF ist zuständig für die Policy, also für das Freischalten der Dienste und QoS-Autorisierung, die der Kunde vertraglich mit dem Provider vereinbart hat. Für die Verrechnung wird die PCRF durch die Policy Control Enforcement Function (PCEF) unterstützt. Beide sind physisch in der P-GW untergebracht. Der HSS hingegen enthält das QoS Profil und Zugangsbeschränkungen für das Roaming sowie mögliche PDN's. Die PDN's können mit Access Point Name (APN), einer Bezeichnung die den Domain Name System (DNS) Regeln folgen, gekennzeichnet sein. Weiters speichert die HSS den aktuellen MMS der UE. Weiters ist das Authentication Center (AUC) im HSS angesiedelt. Das P-GW verwaltet die IP-Adressen der UE's und ist für die QoS Umsetzung zuständig. Mit Hilfe von Traffic Flow Templates (TFT) und den im PCRF hinterlegten Regeln werden unterschiedliche Kanäle mit verschiedenen QoS-Niveaus für unterschiedliche Downlink Kanäle bereitgestellt. Das P-GW ist auch die Schnittstelle zu Netzen mit nicht 3GPP konformen Technologien wie Code-Division Multiple Access 2000 (CDMA2000) und Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax®). Alle User IP-Pakete gehen durch das S-GW, welches als Puffer für die unterschiedlichen Kanäle dient, wenn das UE sich zwischen den eNodeB's wechselt. Auch wenn das UE im Ruhezustand ist werden mit Unterstützung des EPS Connection Management-IDLE (ECM-IDLE) Downlink Daten und Kanalinformationen ge-

speichert. Das S-GW speichert auch Metadaten für die Verrechnung wie zB Downloadvolumen und ist für die Lawful Interception zuständig. Ebenso ist es die Schnittstelle zu 3GPP Technologien wie General Packet Radio Service (GPRS) oder Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Die MME ist verantwortlich für die Signalisierung zwischen UE und CN. Die Protokolle nennt man Non Access Stratum (NAS) und regeln das Kanal und Verbindungsmanagement. Sobald das UE im Netz eingeschaltet wird erhält es vom MME eine SAE Temporary Mobile Subscriber Identity (S-TMSI) die dem UE Kontext zugeordnet ist. Der Kontext enthält zB die vom HSS heruntergeladenen Profilinformationen. Die MME ist auch für die Security wie zB Authentifizierung verantwortlich. Um die Kosten zu senken und die Ansprechzeit zu erhöhen werden die Daten gecached. Dynamisch werden Daten von aufgebauten Verbindungen und Terminal Daten gespeichert. Ist das UE im Ruhezustand (ECM-IDLE state) wird der Kontext, auch RAN-Daten, dauerhaft gesichert. Dazu sendet das UE beim verlassen der Tracking Area (TA) ein Tracking Area Update. Die MME ist für die Lokalisierung einer UE im Ruhezustand verantwortlich. Sind Downlink Informationen für eine UE verfügbar werden alle eNodeB's im aktuellen TA von der MME informiert. Der eNodeB in der aktuellen Zelle verständigt die UE welche sich durch eine Service Request Procedure in den ECM-CONNECTED state versetzt, was idle-to-active transition genannt wird. Danach baut die MME eine Verbindung auf. Um diesen Prozess zu beschleunigen, arbeiten NAS und AS Protokolle wenn möglich gleichzeitig [8].

4) *Roaming*: Ein Netzwerk, das von einem Operator in einem Land betrieben wird, heißt Public Land Mobile Network (PLMN). Befindet sich die UE in einem fremden PLMN verbindet sich diese mit dem lokalen E-UTRAN. Dieses verbindet sich mit dem lokalen MME und S-GW. Die MME autorisiert über die heimatlichen HSS die Signalisierung und die S-GW leitet nach erfolgreichem Nachfragen bei der heimatlichen P-GW den Medienstrom weiter (siehe Abb 3 [8]).

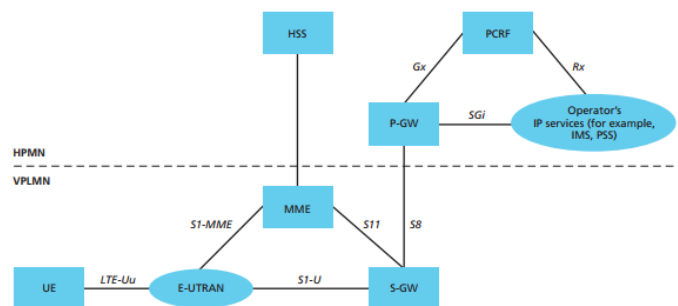


Abbildung 3: Roaming Architektur [8]

III. KOMPONENTEN

A. State of the Art Marktanalyse

Um die ansässigen Inselbewohner zufriedenzustellen, sollten insbesondere Peak Data Raten, die Zellkapazitäten, der Zellradius, die Radio Access Modi, die Antennen Schemata, sowie das Mobility Speed Handover konkreter in Erwägung gezogen werden [11]. Bei der Recherche zur Thematik haben

sich folgende Kriterien als Unterscheidungsmerkmale herauskristallisiert, welche eine Entscheidungsfindung beeinflussen. Ob nun anhand dieser letztlich eine Entscheidung getroffen wird, ob nun ein Mobilfunknetz selbst errichtet (Make) oder die notwendigen Komponenten (Buy) hinzugekauft werden sollen, wird im Kapitel Make or Buy näher beleuchtet. Neben dem Spektrum, dem Durchsatz (Throughput), der Latenz (Latency), der Redundanz (Redundancy), der Interoperabilität beziehungsweise der Kompatibilität, ist auch die Möglichkeit der Skalierbarkeit, um etwaige Nachbarinseln mitzuversorgen, von signifikanter Bedeutung. Denn diese haben ihrerseits kooperativ ihre Hilfe zur Analyse der Problematik in Form der Nutzung eines Internet Cafes angeboten, um erste Rechercharbeit bezüglich des Aufbaus eines LTE Mobilfunknetzes zu liefern. Zusätzlich als weitere nicht zu vernachlässigende Elemente stellen auch Kriterien wie das des Monitorings respektive des Control Managements, ebenso wie dem möglichen Coverage, als auch die Kapazität Faktoren dar, welche die finalen Entscheidungsprozesse maßgeblich beeinflussen. Zudem sollte abzuwägen sein, ob ein "Easy to use Enterprise Dashboard" vorhanden ist. Des Weiteren wird die Art der Lizenz von Open Source Projekten, unter dem Aspekt der anschließenden Vermarktung, geprüft. Auch zu beachten ist, ob nach internationalem Recht bzw. in welchen gesetzlichen Rahmenbedingungen die verantwortlichen Projektleiter zu agieren haben.

B. Antennen Konfigurationen

Bevor man die Komponenten, welche von unterschiedlichen Marktteilnehmern angeboten werden vergleicht, ist es durchaus sinnvoll ein Bild über die Empfangsbedingungen in dem Inselstaat machen. Abhängig von physikalischen Einflussfaktoren in Form von Waldgebieten, Gebäudekomplexen oder topologischen Strukturen wie Gebirge sie darstellen, können ebensolche signifikant die Signalübertragung bestimmen. Denn schließlich sind Absorption, Beugung oder auch Reflexion mit die Hauptgründe für Störungen bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Um nun einen optimalen Empfang zu gewähren kann eine Kombination aus Antennentypen angedacht werden, da jede einzelne Bauart ihre Vor- und Nachteile aufweist. So ist zu unterscheiden zwischen Mono- und Breitband Antennen. Mono-Antennen sind hierbei der Klasse der Richtantennen und Breitbandantennen der Klasse der Rundstrahler zuzuordnen. [12]

IV. OPEN SOURCE LÖSUNG

Im Vergleich zu teurer Spezial-Hardware und nicht frei zugänglicher Software, gibt es auch sogenannte Open-Source Lösungen. Grundsätzlich kann eine Software als Open-Source bezeichnet werden, wenn der Quellcode dieser veröffentlicht wird. Im Gegenzug, zur einfachen Bereitstellung einer rein ausführbaren Datei. Des Weiteren wird frei zugängliche Software oftmals mit eingeschränkten, oder keinen Beschränkungen weitergegeben. Diese ist daher oftmals frei und kostenlos zu verwenden und somit auch erweiter- und veränderbar [13].

Allerdings gibt es nicht eine einzige Lizenz, unter welche Open-Source Software zur Verfügung gestellt wird. Dabei unterscheiden sich diese teils gravierend. So ist es beispielsweise erlaubt, Änderungen an einer, unter der Berkeley Software Distribution (BSD) Lizenz veröffentlichten Software, Änderungen vorzunehmen und diese unter eine beliebige, auch nicht freie Lizenz, zu stellen. Lediglich der Vermerk auf die Ursprüngliche Lizenz muss vorhanden bleiben. Wohin gegen die GNU General Public License (GPL) besagt, dass eine veränderte Software, welche bereits unter der GPL veröffentlicht wurde, ebenfalls unter die GPL zu stellen ist, also wieder frei zugänglich und veränderbar sein muss. Es gibt aber auch noch weitere Open-Source Lizenzen, wie etwa: Apache License, Common Public License (CPL), Mozilla Public License (MPL), European Public License (EUPL), MIT License uvm [14].

A. OpenAirInterface - OAI

Im konkreten Anwendungsfall, ermöglicht uns eine solche Software, kostengünstig ein eigenes LTE-Netzwerk aufzubauen. Ganz ohne Hardware geht dies natürlich nicht, jedoch würde ein Modul für etwa 1500 Dollar ausreichen um ein funktionsfähiges Netz aufzubauen. Ein solches Software Defined Radio (SDR) ist das "Flexible, next-generation, open source software-defined radio" von LimeMicrosystems, welches im Zuge einer Crowdfunding-Aktion realisiert wurde [15]. LimeMicrosystems hat eine große Community und hat es sogar bereits geschafft, ihren limeSDRs in Satelliten zu verbauen [16].

Mit einem SDR werden Anteile der Signalverarbeitung mittels Software realisiert. Dies kann von dedizierter Hardware unterstützt werden. Des Weiteren bietet es eine gewisse Flexibilität zu einer reinen Hardwarelösung, da Software veränderbar ist [17].

Das OpenAirInterface ist ein Projekt der OpenAirInterfaceTM Software Alliance (OSA), welches eine Open Source Lösung zur Verfügung stellt [18].

Dabei wird die Lösung in zwei Projekte unterteilt.

- eNodeB (eNB): "openairinterface5G"
- evolved packet core (EPC): "openair-cn"

OpenAirInterface ist die erste LTE Open-Source Software Plattform, welche den vollen Protokollstack des 3GPP Standards, inklusive E-UTRAN und EPC unterstützt. Dabei wird dies sowohl für das Erstellen eines eigenen LTE Netzes, als auch das Überwachen(Monitoring) verwendet [19]. Des Weiteren ist es möglich Performance-Analysen durchzuführen und dabei Einblick zu erhalten, wie sich ein rasch skalierendes System verhält.

Abbildung 5 zeigt die schematische Implementierung des LTE Protokoll Stacks in OAI. Dem Hersteller zufolge wurden hiermit auch diverse Tests durchgeführt. So wurde beispielsweise OAI eNB mit kommerziellen Huawei Geräten getestet, bei welchen LTE aktiviert wurde (E392, E398u-1) und OAI-UE mit CMW500 (Ericsson on com4Innov network)

Die OpenAirInterface Open.Source Initiative bietet sowohl Unterstützung für eNodeB, UE wie auch EPC an. Zudem wird, neben dem oben erwähnten LimeSDR, auch noch Universal

Eignung von marktüblichen Antennen an bestimmten Standorten, gültig für den Frequenzbereich LTE 800 (791 ... 862 MHz)				
Umfeld & Empfangsbedingungen	direkter Nahbereich (0 ... 4 Kilometer zur BS)	erweiterter Nahbereich (4 ... 8 km zur BS)	normaler Fernbereich (8 ... 15 km zur BS)	extremer Fernbereich (15 ... 25 km zur BS)
Sichtverbindung zur BS, keine Hausisolierung	- Panorama PWB-7-27-RSMAP - Panorama WMM-7-27 (Vodafone) - interne Antennen der Geräte	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Panorama WMM-7-27 (Vodafone)	- MIMO Antenne FwD - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Yagi - Antennen (SRL, Thiecom, ...) - BAZ Xpol-Antennen	- Yagi - Antennen (SRL, Thiecom, ...) - BAZ Xpol-Antennen - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO Antenne FwD (bis 20 km) - MIMO BiQuad, z.B. SRL (bis 20 km)
Sichtverbindung zur BS, Hausisolierung vorh.	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - Panorama WMM-7-27 (Vodafone)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Panorama WMM-7-27 (Vodafone)	- MIMO Antenne FwD - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Yagi - Antennen (SRL, Thiecom, ...) - BAZ Xpol-Antennen	- Yagi - Antennen (SRL, Thiecom, ...) - BAZ Xpol-Antennen - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO Antenne FwD (bis 20 km) - MIMO BiQuad, z.B. SRL (bis 20 km)
Sichtverbindung zur BS leicht gestört (Baumspitzen)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - Panorama WMM-7-27 (Vodafone)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	- MIMO Antenne FwD - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Yagi - Antennen (SRL, Thiecom, ...) - eingeschränkt: BAZ Xpol-Antennen	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich
Sichtverbindung zur BS deutlich gestört (Wald, Gebäude)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - MIMO BiQuad (z.B. SRL) - Panorama WMM-7-27 (Vodafone)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	- MIMO Antenne FwD - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich
Sichtverbindung zur BS absolut gestört (Berge, gr. Gebäude)	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	- MIMO Antenne FwD - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich
weitere Verschlechterung	- MIMO Antenne FwD - Eigenbauantennen (z.B. Ospel) - LPDA (z.B. Wittenberg LAT 22/28) - MIMO BiQuad (z.B. SRL)	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich	Keine Antenne mit den nötigen Eigenschaften bekannt und/oder auf dem Markt erhältlich

Abbildung 4: Antennenüberblick [12]

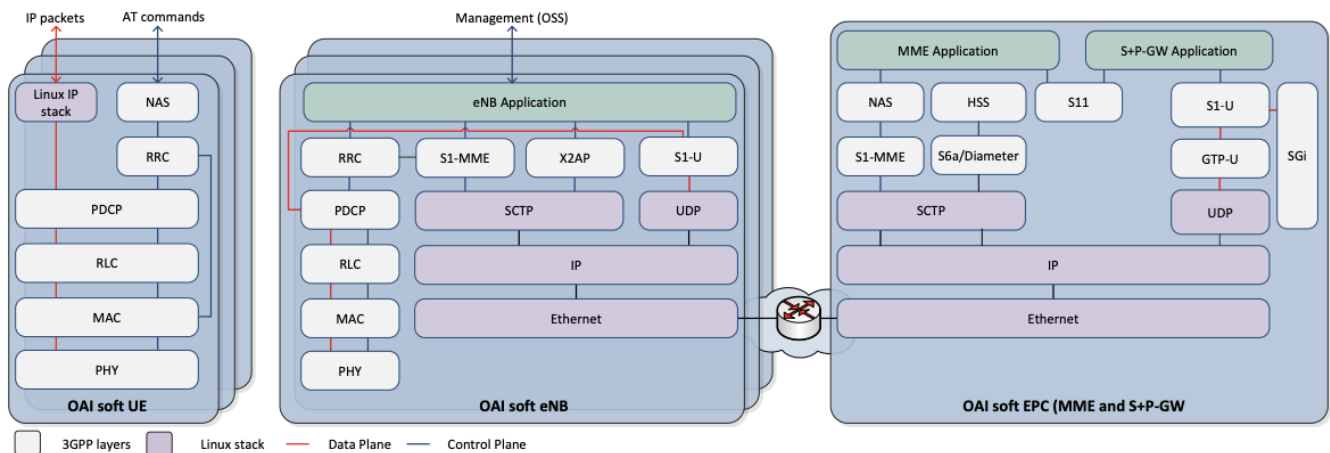


Abbildung 5: Übersicht LTE Module in den jeweiligen Projekten [20]

Software Radio Peripheral (USRP™) der Firma Ettus und ExpressMIMO2 unterstützt. Des Weiteren erlaubt OAI hierbei auch die Unterstützung kommerzieller Ausrüstung [21]. Somit ist man hier nicht auf ein spezielles SDR eingeschränkt.

B. srsLTE

srsLte bietet eine sehr modulare Architektur, um auch rasch neue Standards einfließen lassen zu können. Die Architektur ist in funktionale Module aufgebaut. Zudem wird hiermit bereits ein Satz an Beispielanwendungen geboten, welche für eigene Anwendungen angepasst werden können [22]. Des Weiteren

sind auch Anpassungen möglich, um zusätzliche Hardware zu unterstützen. Abbildung 6 zeigt diesen modularen Aufbau.

Die Beispielanwendungen geben einen Überblick zum Betrieb als eNodeB (srsENB, srsEPC) sowie Informationen, um dies als UE (srsUE) einsetzen zu können. Entwickelt wurde dies von Software Radio Systems, welche dieses Projekt auf Github zur Verfügung stellt [23].

Die hohe Flexibilität und Anpassbarkeit ist auch ein Grund dafür, dass srsLTE als Basis für andere Projekte und Anwendungen eingesetzt wird. So ist etwa tinyLTE eines dieser genannten Projekte. Zudem wird die Software regelmäßig gewartet, was auch an den Codeänderungen im Repository zu

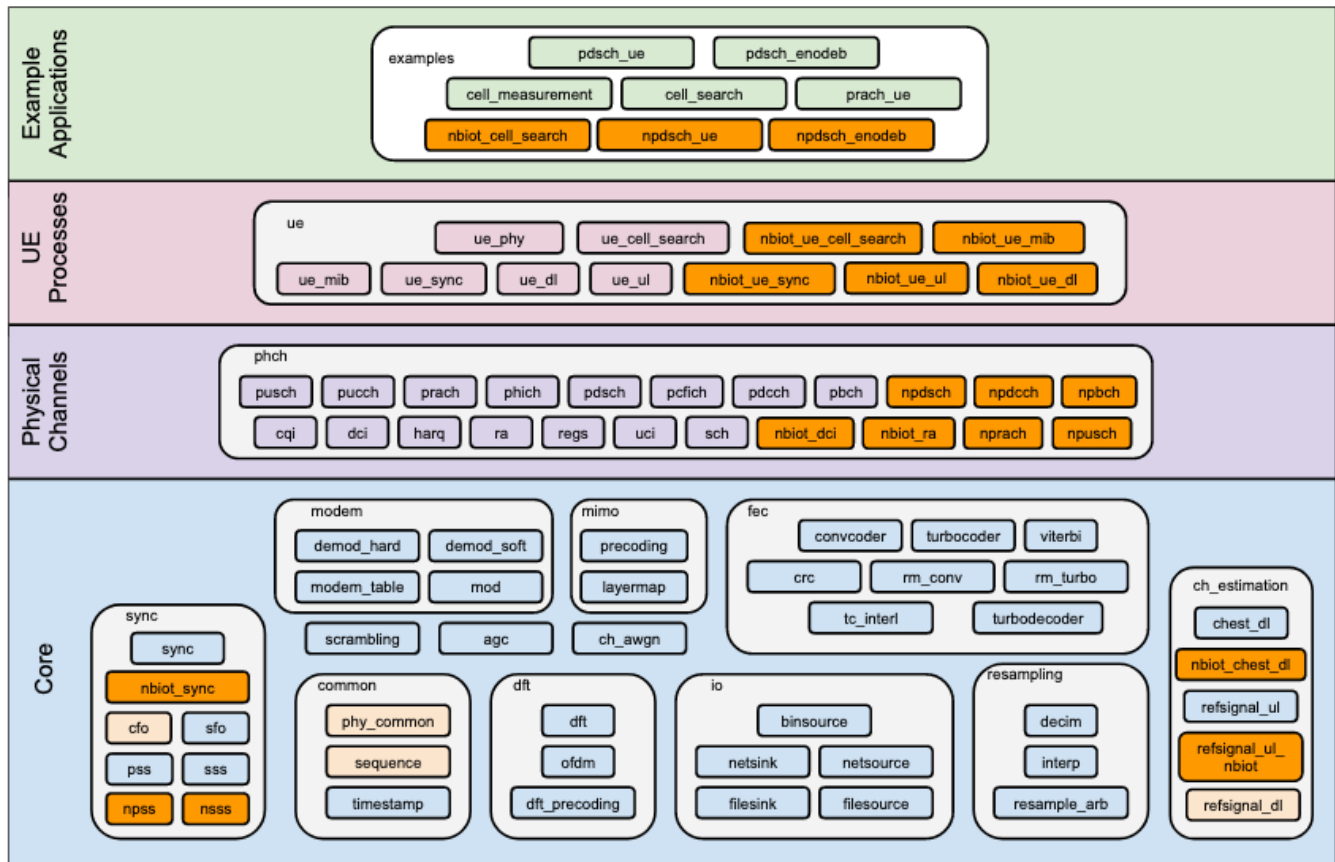


Abbildung 6: Übersicht Architektur srsLTE [22]

erkennen ist.

C. tinyLTE

Eine weitere Open-Source Lösung ist tinyLTE. Auch diese verwendet das Prinzip des SDR, um größtmögliche Flexibilität und Offenheit zu bieten. Dabei unterstützt tinyLTE sowohl den Betrieb als LTE Client (UE) wie auch als Infrastruktur (eNodeB + EPC) [2].

Der Vorteil dabei ist, dass hiermit ein gleichzeitiger Betrieb, sowohl als Sende- wie auch als Empfangseinrichtung möglich ist. In Kombination mit Hardware, welche 2 SDRs bietet, kann so, ein einzelnes Gerät die volle Funktionalität von LTE bieten. Beides basiert, mit geringen Änderungen, auf srsLTE [24].

Die Lösung von Philipp Gorczak sowie Fabian Eckermann, wurde auf Github zur Verfügung gestellt. Eine Evaluierung im Betrieb wurde ebenfalls bereits getestet. Dabei ging es um die Kommunikation mittels LTE zwischen Fahrzeugen [25].

D. Unterschiede

Alle drei erwähnten Lösungen bieten einen breiten Funktionsumfang und Unterstützung an. Unterschiede sind etwa in der getesteten Hardware zu erkennen. Sollte bereits bestehendes Equipment vorhanden sein, könnte dies ein Indikator für eine Präferenz darstellen. tinyLTE wurde speziell für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen entwickelt und getestet.

V. MAKE OR BUY

Kosten und Preise wurden nicht ermittelt. Die erwähnten Anbieter haben kaum Preise öffentlich ausgeschrieben, welche vergleichbar sind. Kosten variieren, je nach Umfang und tatsächlich eingesetzter Hardware, stark. Grundsätzlich ist jeglicher aktuelle Service erwerbbar und hängt von dem Budget ab, welches ausgegeben wird.

Die Kosten der Open-Source Variante liegen in der Umsetzung und dem Testen. Der Vorteil besteht darin, dass diese an beliebige Bedürfnisse angepasst werden kann. In diesem Fall ist, verglichen mit proprietären Anbietern, mehr Geld für Schulungen, Aufbau von Know-How und Wartung aufzuwenden.

Der Aufbau des Know Hows kann zudem genutzt werden, um ein proprietäres Produkt inklusive Dienstleistungen zu erzeugen. So ist es möglich, diese später zu verwenden, um bei der LTE Anbindung anderer Inseln zu unterstützen und die Initialkosten zu senken. Auch die Errichtung eines Ausbildungszentrums ist denkbar.

Ein Nachteil dieser Lösung ist, dass ein Sicherheitsfaktor besteht. Im Problemfall kann kein externer Anbieter zur Verfügung gezogen werden, welcher dieses System wartet und das Problem behebt. Dies ist Teil der Verträge mit proprietären Anbietern.

A. Entscheidungsbegründung

Für den Fall der Anbindung anderer Systeme, oder dem Zusammenführen von weiteren Systemen, bieten die Open Source Lösungen bereits eine gute Unterstützung. Ausweitungen auf weitere Inseln kann daher, ohne Festlegung auf einen speziellen Anbieter, durchgeführt werden.

Eine funktionsfähiges LTE Netzwerk wird, sofern dies von einem proprietären Anbieter umgesetzt wird, schneller zur Verfügung stehen. Grund hierfür ist, dass es keinen Einarbeitungsaufwand gibt und die Umsetzung von Fachpersonal durchgeführt wird, wodurch auch die Kosten steigen. Des Weiteren ist das Risiko des Scheiterns, bei einem völlig selbst entwickelten Netzwerks, höher.

Trotz der aufgeführten Nachteile, ist eine Umsetzung mittels Open Source Lösung zu präferieren. Diese ist preisgünstig umzusetzen. Ein Umstieg auf einen etablierten Anbieter kann auch später erfolgen, sollte es zu nicht überwindbaren Problemen kommen.

VI. SICHERHEIT

A. Kritische Infrastrukturen

Um die Inselbewohner vor Wirtschaftsspionage, Diebstahl und Manipulation zu schützen, ist die Thematik der Sicherheit von Bedeutung. Da Cyber-Kriminelle heutzutage sehr professionell agieren, um ihr Schadensausmaß möglichst maximal zu gestalten, sind die kritischen Infrastrukturen (KI) der Inseln wie zB die Energieversorgung und Kommunikationssysteme von Spitälern besonders zu schützen. Um zur politischen und sozialen Stabilität auf der Insel beizutragen, sind somit Versorgungsengpässe beziehungsweise das Risiko von Ausfällen in KI zu reduzieren. Denn Beeinträchtigungen in diesen Bereichen können zu kaskadierenden Effekten in anderen Lebensbereiche führen. Die Digitalisierung der Insel erfordert besondere Schutzmaßnahmen, sodass durch Prävention, Detektion und Reaktion für sowohl dem Staat, der heimischen Wirtschaft und eben auch der Gesellschaft trotz zunehmender Abhängigkeit von Informationstechnologien und -Vernetzung auch in Zukunft zuverlässig KIs funktionieren [26].

Laut Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) sind potentielle Gefährdungen im Zusammenhang mit öffentlichen Mobilfunknetzen bei der Planung und Errichtung vor allem Wartung ebendieser nicht außer Acht zu lassen. Ebenso sollten mögliche Gegenmaßnahmen in Erwägung gezogen werden, um den Schutz konfidenzieller Daten erhöhen zu können [27].

B. Sicherheitsgefährdungen und Schutzmaßnahmen

Erfolgt ein Zugriff auf die implementierten technischen Einrichtungen kann dies zu Missbrauch durch Unbefugte führen. Dies kann geschehen zum Einen durch Schwachstellen bei Endgeräte-Authentisierung, potenzielle Schwachstelle in der Datenverschlüsselung, durch unzureichende Verschlüsselungsstärke, Erstellung von Bewegungsprofilen durch Ortung, Unterbindung von Mobilfunkkommunikation durch Störsender oder Software-Manipulation der UE. Um nur auf einige von vielen Sicherheitsgefährdungen wie zB Over-The-Air Programming (OTA), einzugehen, Proxy-Manipulation,

FOTA – Firmware Over The Air oder mangelnde Implementierung von Sicherheitsmechanismen. Mögliche Schutzmaßnahmen dienen zur Prüfung von Software-Abhängigkeiten oder dem Einfordern von Sicherheitszertifizierungen. Betrachtet man Übertragungsverfahren, Datenübertragungsraten sowie weitere Technologien im Bereich von Mobilfunknetzen, ist zu verzeichnen, dass zwar die Sicherheitsrisiken wesentlich komplexer wurden gleichzeitig paradoxerweise das Bewusstsein der Nutzer allerdings nicht in gleichem Ausmaß angestiegen ist. Aus diesem Grund kann es durchaus nützlich sein, dieses Bewusstsein dezidiert zu schärfen [27].

C. Regelungen für Telekommunikationsunternehmen

Da sich unter den Inselbewohnern auch IT-versierte Juristen befinden, wurde ein IT-Sicherheitsgesetz erlassen, welches die Telekommunikationsunternehmen verpflichtet, die IT-Infrastrukturen nach dem Stand der Technik angemessen abzusichern. In einem Zyklus von Minimum alle 24 Monate muss die Sicherheit geprüft werden. Des weiteren besteht eine Verpflichtung der Anbieter gegenüber den Inselbewohnern, diese zu warnen, sofern es Grund zur Annahme gibt, dass die UE für IT-Angriffe missbraucht wurden. Zusätzlich herrscht eine Informationspflicht dahingehend, dass auf möglichst viele Arten hingewiesen wird, wie etwaige Störungen zu entfernen sind. Natürlich sollen IT-Sicherheitsmaßnahmen nicht nur zum Schutz von personenbezogenen Daten der Inselbewohner, sondern auch zum Schutz vor unerlaubten Eingriffen in die Infrastruktur eingesetzt werden. Auch zu beachten ist, dass auftretende IT-Sicherheitsvorfälle gemeldet werden bei den zuständigen Behörden. [26]

VII. CONCLUSION

A. Zusammenfassung der Ergebnisse

B. Ausblick

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3GPP	.....	Third Generation Partnership Project
4G/LTE	...	4. Generation/Long-Term Evolution
Abb	.....	Abbildung
APN	.....	Access Point Name
AS	.....	Access Stratum
AUC	.....	Authentication Center
CA	.....	Carrier Aggregation
CDMA2000		Code-Division Multiple Access
CN	.....	Core Network
DL	.....	Download
E-UTRAN		Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
ECM-IDLE		EPS Connection Management — IDLE
eNodeB	...	Evolved NodeB
EPC	.....	Evolved Packet Core
EPS	.....	Evolved Packet System
ETSI	.....	European Telecommunications Standards Institute
FHCW	....	Fachhochschule Campus Wien
Gbit/s	.....	Gigabit pro Sekunde
GPRS	....	General Packet Radio Service

HSS	Home Subscriber Server
Hz	Hertz
IMS	IP Multimedia Core Network Subsystem
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ITU-R	International Telecommunication Union Radio-communication Sector
km/h	Kilometer pro Stunde
MME	Mobility Management Entity
NAS	Non Access Stratum
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDN	Packet Data Network
PLMN	Public Land Mobile Network
QoS	Quality of Service
R	Release
RAN	Radio Access Network
RN	Relay Nodes
RRM	Radio Resource Management
S-TMSI	SAE Temporary Mobile Subscriber Identity
SGW	Serving Gateway
TA	Tracking Area
TFT	Traffic Flow Templates
UE	User Equipment
UL	Upload
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiMax®	Worldwide Interoperability for Microwave Access

LITERATUR

- [1] J. G. E. T. Tchao, "Performance evaluation of a deployed 4g lte network."
- [2] F. Eckermann, P. Gorczak, and C. Wietfeld, "tinylte: Lightweight, ad hoc deployable cellular network for vehicular communication," in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [3] M. M. R. P. LTD, "Global private lte market – industry analysis and forecast (2018-2026) – by technology, application, service, industry, and geography." [Online]. Available: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-private-lte-market/24669/#details>
- [4] Zoicas, Adrian, "Overview of 3GPP Release 8 V0.3.3 (2014-09) 6," Internet, Sep. 2009. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/
- [5] J. Wannstrom, "Lte-advanced," Internet, Jun. 2013. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acro.nyms/97-lte-advanced>
- [6] 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 15)," Internet, Jun. 2018. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.913/
- [7] F. Firmin, "The Evolved Packet Core," Internet, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [8] S. Sesia, M. Baker, and I. Toufik, *LTE - The UMTS Long Term Evolution*. Wiley John + Sons, 2011. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/11406019/stefania_sesia_matthew_baker_issam_toufik_lte_the_umts_long_term_evolution.html
- [9] 3GPP, "TS 36.306 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 15)," Internet, Jun. 2019. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.306/
- [10] M. Sauter, *Communication Systems for the Mobile Information Society*. Wiley, 2006. [Online]. Available: https://books.google.at/books?id=E_ZGuO2yVnkC
- [11] S. K. Parul Datta, "Exploration and comparison of different 4g technologies implementations: A survey."
- [12] S. Schöne. Ratgeber lte antennen. Maik Wildemann und Sebastian Schöne 2.0Promotion GbR. [Online]. Available: <https://www.lte-anbieter.info/lte-hardware/antenne.php>
- [13] C. Gacek and B. Arief, "The many meanings of open source," *IEEE software*, vol. 21, no. 1, pp. 34–40, 2004.
- [14] L. Rosen, *Open source licensing*. Prentice Hall, 2005, vol. 692.
- [15] L. Microsystems, "Flexible, next-generation, open source software-defined radio - limesdr," Internet, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.crowdsupply.com/lime-micro/limesdr>
- [16] [Online]. Available: <https://limemicro.com/community/>
- [17] F. K. Jondral, "Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio," *EURASIP journal on wireless communications and networking*, vol. 2005, no. 3, pp. 275–283, 2005.
- [18] O. S. A. (OSA), "Openairinterfacetm software alliance (osa)," 2019. [Online]. Available: <https://www.openairinterface.org/>
- [19] N. Nikaen, R. Knopp, F. Kaltenberger, L. Gauthier, C. Bonnet, D. Nussbaum, and R. Ghaddab, "Openairinterface: an open lte network in a pc," in *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2014, pp. 305–308.
- [20] OpenAirInterface, "Towards open cellular ecosystem openairinterfacetm (oai): Towards open cellular ecosystem," Internet, 2019. [Online]. Available: https://www.openairinterface.org/?page_id=864
- [21] F. Kaltenberger, G. de Souza, R. Knopp, and H. Wang, "The openairinterface 5g new radio implementation: Current status and roadmap," in *WSA 2019; 23rd International ITG Workshop on Smart Antennas*. VDE, 2019, pp. 1–5.
- [22] A. Puschmann, P. Sutton, and I. Gomez, "Implementing nb-iot in software-experiences using the srslte library," *arXiv preprint arXiv:1705.03529*, 2017.
- [23] "Github repository srslte," Internet, 2019. [Online]. Available: <https://github.com/srsLTE/srsLTE>
- [24] I. Gomez-Miguel, A. Garcia-Saavedra, P. D. Sutton, P. Serrano, C. Cano, and D. J. Leith, "srslte: an open-source platform for lte evolution and experimentation," in *Proceedings of the Tenth ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization*. ACM, 2016, pp. 25–32.
- [25] "tinylte." [Online]. Available: <https://github.com/tudo-cni/tinyLTE>
- [26] B. für Sicherheit in der Informationstechnik, "Schutz kritischer infrastrukturendurch it-sicherheitsgesetz und up kritis." [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/Schutz-Kritischer-Infrastrukturen-ITSig-u-UP-KRITIS.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- [27] B. T. Heinz Gerwing, Guido Reckhaus, "Öffentliche mobilfunknetze und ihre sicherheitsaspekte." [Online]. Available: <https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/Broschueren/Oefms/mobilfunknetze.html>