

Wer liefert welche Komponenten für ein Mobilfunknetz?

Felix Voglsam, Julian Timo Magin, and Wolfgang Eisenhut,

Zusammenfassung—Wer schreibt den Abstract???

Index Terms—This paper gives an overview about the basic components of a Long Term Evolution network (LTE). Furthermore, it uses a specific scenario to build up an own LTE network. In that case we assume an own island to be ours and want to use LTE there. Therefore, as it is not required, we will not have a look on regulations and laws. These might be important when building an LTE network in a specific country. We will have a look on which open source software is available, that can be used and run without proprietary hardware and which LTE providers are available, that might also offer specialised services.

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 die Arbeit endet mit der Conclusion.

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.

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 [1, 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 [2].

Felix Voglsam, Julian Timo Magin, and Wolfgang Eisenhut was 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.

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 [2]. 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 [3].

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.

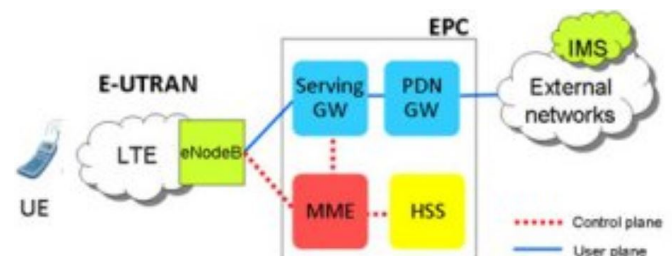


Abbildung 1: Architektur LTE [4]

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) [4]. 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 [5].

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 [6]. 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 [5].

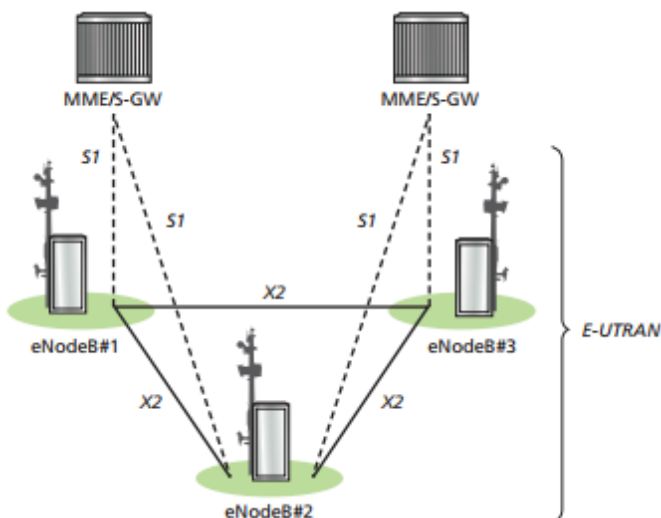


Abbildung 2: E-Utran Architektur [5]

Die Schnittstelle zum UE sind die Access Stratum (AS) Protokolle [7, S. 131]. Das E-UTRAN ist für das Radio Resource Management (RRM), also für funkrelevanten Funktionen, wie zum Beispiel die Bestimmung der zur Verfügung stehenden Ressourcen am UE, die Kompression und Verschlüsselung der Daten, zuständig. Ein UE gehört zu genau einem eNodeB [5].

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 vertraglich mit dem Provider vereinbart sind. Für die Verrechnung wird die PCRF durch die Policy Control Enforcement Function (PCEF) unterstützt. Beide sind physisch in der P-GW. 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 gespeichert. 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 [5].

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 heimatischen HSS die Signalisierung und die S-GW leitet nach erfolgreichem Nachfragen bei der heimatischen P-GW den Medienstrom weiter (siehe Abb 3).

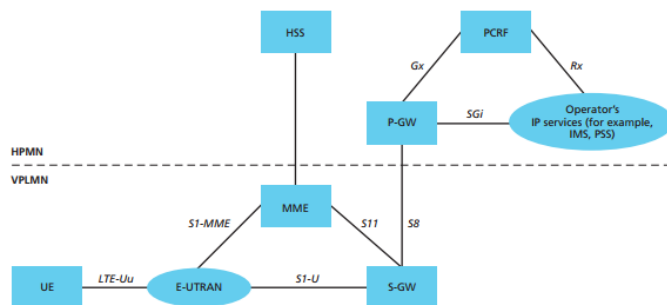


Abbildung 3: Roaming Architektur [5]

III. KOMPONENTEN

Julian

A. Use Cases

Dadurch dass, sich unser 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.

Zusätzlich verfügt unsere Insel über ein Seenotrettungssystem präziser gesagt ein maritimes Rettungskoordinationszentrum, über welches mit Hilfe von Rettungsschiffen und Rettungsdrohnen in Seenot geratene Inselbewohner lokalisiert werden können. Des weiteren bewegen sich unsere Einwohner auf dem Staatsgebiet der Insel in autonom fahrenden Autos, weshalb auch hierfür entsprechende Anforderungen in Bezug auf die Komponenten für vehikulare Kommunikation eingegangen wird. Da wir eine Infrastruktur von Grund auf erbauen, müssen wir keine Rücksicht auf etwaige bestehende Legacyarchitekturen nehmen, in welche wir neue Komponenten integrieren müssen.

B. State of the Art Marktanalyse

Um unsere Inselbewohner zufrieden zustellen, sollten wir insbesondere Peak Data Raten, Zellkapazitäten, den Zellradius,

die Radio Access Modi, die Antennen Schemata, sowie das Mobility Speed Handover konkreter in Erwägung ziehen. Bei der Recherche zur Thematik haben sich folgende Kriterien als Unterscheidungsmerkmale herauskristallisiert anhand derer letztlich eine Entscheidung getroffen werden soll, ob nun ein Mobilfunknetz selbst errichtet (Make) oder die notwendigen Komponenten (Buy) hinzugekauft werden sollen. Neben dem Spectrum, dem Durchsatz (Throughput), der Latenz (Latency), der Redundanz (Redundancy), der Interoperabilität beziehungsweise der Kompatibilität, ist auch die Möglichkeit der Skalierbarkeit, um etwaige Nachbarinseln mitzuversorgen, welche ihrerseits kooperativ Ihre Hilfe in Form eines Internet Cafes angeboten hatten zur Analyse unserer Problematik, sind von signifikanter Bedeutung. Zusätzlich als weitere nicht zu vernachlässigenden 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 ist zu prüfen, ob Linsencing an für sich eine Problematik darstellen könnte. Inwiefern wir auf der Südsee Insel nach internationalem Recht bzw. in welchen gesetzlichen Rahmenbedingungen wir uns bewegen und dementsprechend handeln, sollte ebenfalls noch kurz geklärt werden.

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.

Abhängig von den Use Cases ergeben sich bei der Analyse und beim Design spezifizierte funktionale wie auch Nichtfunktionale Anforderungen. Haben wir qualifiziertes Fachpersonal geschult auf den LTE Advanced Standard, die sowohl in den Phasen der Analyse und des Designs als auch in der Implementierung sowie bei Wartung und beim Testen vor Inbetriebnahme gezielt eingesetzt werden können? Haben wir entsprechendes Kapital externer Berater einzufliegen, die schon einmal ähnliche Projekte realisiert haben, um mit Hilfe derer Fehleinschätzungen vergangener Projekte in Bezug auf Planung, Koordination und Aufwandsabschätzungen zu nutzen. Sind generell Fachkräfte mit Know How verfügbar?

C. HSS, EPC, PCRF

D. Antennen Konfigurationen

IV. OPEN SOURCE LÖSUNG

Im Gegenzug 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

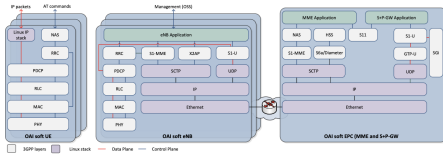


Abbildung 4: Übersicht LTE Module in den jeweiligen Projekten [13]

Software oftmals mit eingeschränkten, oder keinen Beschränkungen weitergegeben. Diese ist daher oftmals frei und kostenlos zu verwenden und somit auch erweiter- und veränderbar. [8]

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,- ausreichen um ein entsprechendes Netz aufzubauen. Ein solches Software Defined Radio (SDN) wäre etwa das "Flexible, next-generation, open source software-defined radio" von LimeMicrosystems, welches im Zuge einer Crowdfunding-Aktion realisiert wurde [9].

Mit einem SDN werden Anteile der Signalverarbeitung mittels Software realisiert. Dies kann von dedizierter Hardware unterstützt werden. Des weiteren bietet es eine gewisse Flexibilität zu einer reiner Hardwarelösung, da Software veränderbar ist [10].

Das OpenAirInterface ist ein Projekt der OpenAirInterfaceTM Software Alliance (OSA), welches eine Open Source Lösung zur Verfügung stellt [11].

Dabei wird die Lösung in zwei Projekte unterteilt.

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

OpenAirInterface ist die erste Open-Source Software Plattform welche eines LTE Systems welches den vollen Protokollstack des 3GPP Standards, inklusive E-UTRAN und EPC unterstützt. Dabei kann dies sowohl für das Erstellen eines eigenen LTE Netzes, als auch das Überwachen(Monitoring) verwendet werden [12]. Des Weiteren ist es möglich Performance-Analysen durchzuführen und dabei Einblick zu erhalten, wie sich ein rasch skalierendes System verhält.

Abbildung 4 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 (eNB), User Equipment (UE) wie auch Evolved Packet Core (EPC) an. Zudem wird, neben dem oben erwähnten Lime SDR auch noch ETTUS USRP und ExpressMIMO2 unterstützt. Des Weiteren erlaubt OAI hierbei auch die Unterstützung kommerzieller Ausrüstung [14]. Somit ist man hier nicht auf ein spezielles SDR eingeschränkt.

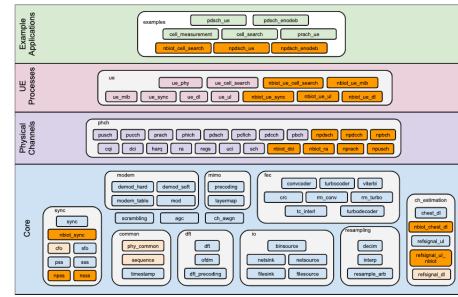


Abbildung 5: Übersicht Architektur srsLTE [15]

B. srsLTE

srsLte bietet eine sehr modularen Architektur um auch rasch neue Standards einfließen lassen zu können. Diese ist in funktionale Module aufgebaut. Damit wird hier auch bereits ein Satz an Beispielanwendungen geboten welche für eigene Anwendungen angepasst werden können [15]. Des Weiteren sind auch Anpassungen möglich um zusätzliche Hardware zu unterstützen. Abbildung 5 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 diese von Software Radio Systems welche dieses Projekt auf Github zur Verfügung stellt [16].

Die hohe Flexibilität und Anpassbarkeit ist auch Grund für Abwandlungen und andere Projekte, welches dies srsLTE als Basis verwenden. So ist etwa tinyLTE eines dieser genannten Projekte. Zudem wird die Software regelmäßig gewartet, was auch an den Codeänderungen im Repository zu erkennen ist.

C. tinyLTE

Eine weitere Open-Source Lösung ist tinyLTE. Auch dieses verwendet SDR um größtmögliche Flexibilität und Offenheit zu bieten. Dabei unterstützt dies sowohl als LTE Client (UE) als auch Infrastruktur (eNB + EPC). [17].

Der Vorteil dabei ist, dass hiermit ein gleichzeitiger Betrieb von beiden Anwendungsfällen möglich ist. In Kombination mit Hardware, welches 2 SDRs unterstützt, kann so ein einzelnes Gerät die volle Funktionalität anbieten. Beides basiert, mit geringen Änderungen, auf srsLTE [18].

Die Lösung von Philipp Gorczak sowie Fabian Eckermann auf Github zur Verfügung gestellt. Einen Evaluierung im Betrieb wurde ebenfalls bereits getestet. Dabei ging es um die Kommunikation über LTE zwischen Fahrzeugen.

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

Wer schreibt den Make or buy???

VI. SICHERHEIT

Wer schreibt den Sicherheit???

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] 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/
- [2] J. Wannstrom, "Lte-advanced," Internet, Jun. 2013. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acro.nyms/97-lte-advanced>
- [3] 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/
- [4] F. Firmin, "The Evolved Packet Core," Internet, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [5] 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
- [6] 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/
- [7] M. Sauter, *Communication Systems for the Mobile Information Society*. Wiley, 2006. [Online]. Available: https://books.google.at/books?id=E_ZGuO2yVnkC
- [8] C. Gacek and B. Arief, "The many meanings of open source," *IEEE software*, vol. 21, no. 1, pp. 34–40, 2004.
- [9] L. Microsystems, "Flexible, next-generation, open source software-defined radio - limesdr," Internet, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.crowdsupply.com/lime-micro/limesdr>
- [10] 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.
- [11] O. S. A. (OSA), "Openairinterfacetm software alliance (osa)," 2019. [Online]. Available: <https://www.openairinterface.org/>
- [12] N. Nikaein, 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.
- [13] OpenAirInterface, "Towards open cellular ecosystem openairinterfacetm (oai): Towards open cellular ecosystem," Internet, 2019. [Online]. Available: https://www.openairinterface.org/?page_id=864
- [14] 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.
- [15] A. Puschmann, P. Sutton, and I. Gomez, "Implementing nb-iot in software-experiences using the srslte library," *arXiv preprint arXiv:1705.03529*, 2017.
- [16] "Github repository srslte," Internet, 2019. [Online]. Available: <https://github.com/srsLTE/srsLTE>
- [17] 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.
- [18] 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.

Felix Voglsam ist Student im fünften Semester des berufsbegleitenden Bachelorstudienganges Informationstechnologien und Telekommunikation an der FHCW.

Julian Timo Magin ist Student im fünften Semester des berufsbegleitenden Bachelorstudienganges Informationstechnologien und Telekommunikation an der FHCW.

Wolfgang Eisenhut ist Student im fünften Semester des berufsbegleitenden Bachelorstudienganges Informationstechnologien und Telekommunikation an der FHCW.