Lokalisierung mit GNSS, LTE und Narrowband IoT:   
Entwicklung von Langzeit- und Echtzeit-Tracking-Software in der Praxis

**Projektarbeit**

im Studiengang  
Informatik

vorgelegt von

**Chahida Raddam Nguyen Lam Bui Marlon May   
Yanik Oberheid**Matr.-Nr.: 18365744 Matr.-Nr.: 18365827 Matr.-Nr.: 18370234  
Matr.-Nr.: 18359570

am tt. Monat Jahr   
an der Hochschule Bochum

Erstprüfer/in:   
Zweitprüfer/in: .

# Ehrenwörtliche Erklärung

# Kurzfassung

# Abstract

**Keywords:**

# Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung 2

Kurzfassung 3

Abstract 3

Inhaltsverzeichnis 4

Abbildungsverzeichnis 6

Tabellenverzeichnis 6

Abkürzungsverzeichnis 7

Vorwort 8

1 Überblick 9

2 Ziele 10

2.1 Szenario 1: Langzeit-Tracking für Fahrräder 10

2.2 Szenario 2: Echtzeit-Tracking für Fitness-Tracker 10

3 Lokalisierungstechnologien und Applikationen 11

3.1 GNSS 11

3.2 LTE und LTE-M 11

3.3 Narrowband IoT 11

3.4 Vorteile und Herausforderungen von IoT-Signalen für die Lokalisierung 12

3.5 Lokalisierungsanwendungen 13

3.6 Lokalisierungsmethoden 15

3.6.1 Datenbank-Matching-Lokalisierungsmethoden 15

3.6.2 Geometrische Lokalisierungsmethoden 16

4 Mikrocontroller- und LTE-Modemeinheiten 18

4.1 Microcontroller Unit (MCU) 18

4.2 Quectel BG96 LTE Modem 18

5 AT Commands 19

6 Serialisierung und Deserialisierung von Daten 20

7 Web Services für IoT Geräte 21

8 Datenvisualisierung 22

9 Vernetzung 23

9.1 Einschalten des Modems 23

9.2 Transmission Control Protocol (TCP) 23

9.3 Secure Socket Layer (SSL) Connection 23

9.4 Message Queue Telemetry Transport (MQTT) 23

10 Standort und GPS-Tracking 24

11 Zusammenfassung und Ausblick 26

Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten 27

Anhang B: Formatvorlagen 28

Glossar 29

Quellenverzeichnis 30

Stichwortverzeichnis 31

# Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Abdeckungsbereiche und Energieverbrauch von IoT-Signalen (Quelle: Li et al., 2021) 12](#_Toc171985817)

[Abbildung 2: Lokalisierungssystem Architecture (Quelle: Li et al., 2021) 12](#_Toc171985818)

[Abbildung 3:Vergleich von tatsächlichen (rot) und vorhergesagten (blau) Standorten (Quelle: Ray et al., 2016) 15](#_Toc171985819)

[Abbildung 4: Prinzip der geometrischen Lokalisierungsmethoden (Quelle: Li et al. (2021)) 15](#_Toc171985820)

[Abbildung 5: Darstellung der Positionierung basierend auf TDOA-Messungen (Quelle: Yu et al. (2009)) 16](#_Toc171985821)

# Tabellenverzeichnis

# Abkürzungsverzeichnis

HBI Hochschule für Bibliotheks- und Informationswesen

HdM

DDD

# Vorwort

# Überblick

# Ziele

Das Ziel dieses Softwareprojekts ist die Entwicklung einer umfassenden Lokalisierungslösung, die auf einem Mikrocontroller basiert und in der Lage ist, den Standort eines Objekts je nach Anwendungsszenario zu ermitteln. Es werden zwei Hauptszenarien betrachtet: Langzeit-Tracking für Fahrräder und Echtzeit-Tracking für Fitness-Tracker.

## Szenario 1: Langzeit-Tracking für Fahrräder

In diesem Szenario wird der Mikrocontroller genutzt, um die Position eines Fahrrads über längere Zeiträume hinweg zu überwachen. Dies erfordert eine energiesparende und zuverlässige Lösung, die regelmäßig Standortdaten sammelt und übermittelt, ohne die Batterie schnell zu entladen. Die Hauptanforderungen sind:

Lange Batterielaufzeit: Optimierung der Energiemanagement-Strategien, um die Batterielebensdauer zu maximieren.

Periodische Standortupdates: Standortinformationen werden in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet und übermittelt, um den Verlauf der Fahrradbewegungen nachzuvollziehen.

Robuste Kommunikation: Verwendung von LTE-M und Narrowband IoT (NB-IoT) für eine zuverlässige Datenübertragung, auch in Gebieten mit schwacher Netzabdeckung.

## Szenario 2: Echtzeit-Tracking für Fitness-Tracker

Das Echtzeit-Tracking-Szenario zielt darauf ab, die Position eines Fitness-Trackers in nahezu Echtzeit zu ermitteln und zu übermitteln. Dies ist besonders nützlich für Sportler, die ihre Bewegungen und Aktivitäten genau verfolgen möchten. Die Hauptanforderungen in diesem Szenario sind:

Schnelle Standortaktualisierungen: Standortdaten müssen in sehr kurzen Intervallen aktualisiert werden, um eine Echtzeitverfolgung zu ermöglichen.

Hohe Präzision: Genauigkeit der Standortermittlung ist entscheidend, um präzise Bewegungs- und Aktivitätsdaten zu liefern.

Datenmanagement: Effiziente Handhabung der großen Datenmengen, die durch die häufigen Updates generiert werden, und deren sichere Übertragung.

# Lokalisierungstechnologien und Applikationen

## GNSS

GNSS steht für "Global Navigation Satellite System" und bezeichnet eine Vielzahl von Satellitennavigationssystemen, die weltweit zur Positionsbestimmung, Navigation und Zeitmessung genutzt werden. Diese Systeme nutzen ein Netzwerk von Satelliten, die Signale zur Erde senden, um die Position von Empfängern auf der Erdoberfläche oder in der Nähe zu bestimmen. GNSS ist ein Überbegriff, der mehrere globale und regionale Systeme umfasst.

## LTE und LTE-M

LTE ist ein bekanntes drahtloses und zellulares Netzwerk, das mobile Konnektivität für Mobiltelefone und Nutzer weltweit bereitstellt. LTE markiert den Beginn des zellularen Systems, das als 4G (vierte Generation) bekannt ist. Das 4G-System wurde in einer Reihe von Dokumenten veröffentlicht, die als Releases bekannt sind. Die Organisation, die für die Veröffentlichung dieser Dokumente verantwortlich ist, ist das 3GPP (3rd Generation Partnership Project). (3GPP – The Mobile Broadband Standard, o. D.)

LTE-M steht für LTE-Technologie für Machine-type Communications. Dieser Standard basiert auf 3GPP-Spezifikationen und verwendet Technologiebausteine von 4G und 5G. Das 3rd Generation Partnership Project (3GPP) erstellt weltweit gültige Standards für die Datenübertragung und hat somit auch den LTE-Standard definiert. Im Vergleich zu anderen Low Power Wide Area Networks (LPWAN) eignet sich LTE-M besonders für die Übertragung hoher Datenraten. Es ermöglicht bis zu 7 Mbit/s im Uplink (vom Sensor zum Netzwerk) und bis zu 4 Mbit/s im Download (vom Netzwerk zum Sensor).

## Narrowband IoT

NB-IoT ist eine Lösung für Low Power Wide Area Networks (LPWAN), die in lizenzierten Spektrumbändern arbeitet. Die 3GPP hat diese Technologie als Teil der LTE-Mobilfunknetze integriert, um von dem großen Ökosystem der LTE-Technologie und der Mobilfunkanbieter zu profitieren. NB-IoT verbessert nicht nur bestehende zellulare Anwendungsfälle, sondern erweitert diese auf eine neue Ära von Anwendungsfällen und Szenarien: massives IoT, Smart Homes, Smart Cities, Smart Transportation, Smart Grids, intelligente Versorgungsunternehmen und Zähler, Wearables und entfernte Sensoren, autonome und selbstfahrende Fahrzeuge, Objektverfolgung, mobile virtuelle Realität, Fernsteuerung und Prozessautomatisierung für Luftfahrt und Robotik sowie missionskritische Steuerung. (Liberg et al., 2017)

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) ist darauf ausgelegt, eine große Anzahl von Geräten in verschiedenen Anwendungsbereichen zu verbinden und so das sogenannte Internet der Dinge (IoT) zu formen. Die verbundenen Geräte kommunizieren über die zellulare Infrastruktur. NB-IoT-Geräte unterstützen Datenraten von einigen Dutzend Bits pro Sekunde (bps) bis hin zu einigen hundert Kilobits pro Sekunde (Kbps). Es ist geplant, dass NB-IoT fortschrittliche Funktionen für massives IoT einführt, darunter eine hohe Anzahl von NB-IoT-Geräten pro Quadratkilometer, geschätzt auf 1 Million Geräte pro Quadratkilometer.

Es wird erwartet, dass die Anzahl der verbundenen IoT-Geräte in den kommenden Jahren explodieren wird. Zum Beispiel wird bis 2025 prognostiziert, dass mehr als 5 Milliarden Geräte über NB-IoT verbunden sein werden.

## Vorteile und Herausforderungen von IoT-Signalen für die Lokalisierung

Die neueste Kommunikationsinfrastruktur unterstützt zunehmend die Forschung zur Lokalisierung basierend auf IoT-Signalen aus mehreren Gründen. Erstens werden IoT-Signale von den gängigen IoT-Geräten unterstützt und sollen zukünftig auch von mehr intelligenten Verbrauchergeräten genutzt werden. Zweitens können IoT-Systeme bereits verschiedene Lokalisierungssignalmessungen wie Empfangssignalstärke (RSS), Zeitdifferenz der Ankunft (TDoA) und Kanalzustandsinformationen (CSI) liefern. Drittens erhöht die Verbreitung von IoT/5G-Kleinzellen sowie die Möglichkeit, die Kommunikationsfähigkeit von Smart-Home-Geräten wie Lampen, Routern, Lautsprechern und Steckdosen zu aktivieren, die Dichte der Lokalisierungsbasisstationen.

Diese Untersuchung konzentriert sich auf LPWAN-Signale, deckt aber auch andere IoT-Technologien wie Mobilfunknetze und lokale drahtlose Netzwerke (z. B. WiFi, Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee und Radio-Frequency Identification (RFID)) ab. Abbildung 1 zeigt die Abdeckungsbereiche und den Energieverbrauch der wichtigsten IoT-Signale. (Li et al., 2021)

Ein Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 1: Abdeckungsbereiche und Energieverbrauch von IoT-Signalen (Quelle: Li et al., 2021)

## Lokalisierungsanwendungen

Ein Bild, das Text, Diagramm, Screenshot, Entwurf enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 2: Lokalisierungssystem Architecture (Quelle: Li et al., 2021)

Ein Lokalisierungssystem besteht aus vier Komponenten: Knoten (einschließlich Endgeräten), Basisstationen (einschließlich Gateways oder Ankern), Netzwerkservern und Anwendungsservern (Raza, Kulkarni, & Sooriyabandara, 2017). Abbildung 2 zeigt die Architektur eines Lokalisierungssystem. Im Vergleich zu einem gewöhnlichen IoT-System verfügt das Lokalisierungssystem über eine zusätzliche Lokalisierungs-Engine. Abhängig von den Anforderungen an die Rechenlast der Knoten, die Kommunikationslast und die Datensicherheit kann das Lokalisierungsmodul entweder an den Knoten oder an den Netzwerkservern platziert werden. Die Hauptfunktionen der Komponenten sind wie folgt:

* Knoten: Ein Knoten enthält einen Transponder, der Signale überträgt, und optional einen Mikrocontroller mit On-Board-Speicher. Zusätzlich können Anwendungssensoren wie ein GNSS-Empfänger für präzise Positionierung, Inertialsensoren für Bewegungserfassung und Umweltsensoren zur Überwachung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Rauch, Gas, Licht, Magnetismus und Schall integriert sein. Diese Sensoren können an den Transponderchip angeschlossen oder in diesen integriert sein. Die Knoten können zur statischen Überwachung fest installiert, als Tags auf beweglichen Objekten montiert oder als Benutzergeräte am menschlichen Körper getragen werden. In einigen IoT-Anwendungen senden die Knoten nur häufig Signale aus, anstatt Daten zu verarbeiten, um Energie zu sparen. In anderen Anwendungen erfolgt die Verarbeitung von Bewegungs- oder Lokalisierungsdaten auf den Knoten, um die Kommunikationslast zu reduzieren. Zudem können manche Anwendungen eine ToA-Lokalisierung nutzen, die präzise Timing-Anforderungen an die Knoten stellt, was nur in relativ hochwertigen IoT-Anwendungen erfüllt werden kann.
* Basisstationen (BSs): Die Hauptkommunikationsfunktion der Basisstationen besteht darin, Daten zwischen Knoten und Netzwerkservern zu routen. Die Basisstationen können sich mit Netzwerkservern verbinden und die Daten von Knotensensoren zu den Netzwerkservern und umgekehrt übertragen. Basisstationen haben in der Regel feste und bekannte Standorte sowie global eindeutige Identitäten (IDs, z. B. MAC-Adressen). Für LE-IoT müssen Basisstationen auch Lokalisierungssignale messen, wie Knoten-ID, Basisstation-ID, Empfangszeit der Daten, Kanal, RSS, Nutzlast und Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Zudem kann eine Zeitsynchronisation der Basisstationen für TDoA- oder ToA-basierte Lokalisierung erforderlich sein. Für die AoA-Lokalisierung können außerdem Multi-Array-Antennen und Phasendetektion notwendig sein.
* Netzwerkserver: Ein Netzwerkserver ist verantwortlich für das Dekodieren der Daten von den Basisstationen, das Aufzeichnen der Daten in Datenbanken, die optionale Implementierung von Lokalisierungsberechnungen und die Übermittlung der verarbeiteten Daten an Anwendungsserver. Netzwerkserver können sowohl für die Kommunikation von Sensor zu Anwendung als auch von Anwendung zu Sensor genutzt werden. Für die TDoA-basierte Lokalisierung ist es wichtig, dass die Pakete von verschiedenen Basisstationen bei einem Netzwerkserver ankommen. Außerdem gibt es für Lokalisierungsanwendungen zusätzliche Datenbanken für Lokalisierungssignale auf den Netzwerkservern. Bewegungs- und Lokalisierungsdatenverarbeitungs-Engines befinden sich bei vielen LPWAN-Anwendungen auf Netzwerkservern. Netzwerkserver können entweder Cloud- oder Edge-Server sein.
* Anwendungsserver: Ihre Hauptfunktionen bestehen darin, Daten von Netzwerkservern zu erhalten, zu analysieren und für weitere Anwendungen zu verarbeiten.

## Lokalisierungsmethoden

### Datenbank-Matching-Lokalisierungsmethoden

Datenbank-Matching-Lokalisierungsmethoden, auch als Fingerprinting-Methoden bekannt, sind Techniken zur Positionsbestimmung, bei denen aktuelle Sensordaten mit zuvor erfassten und in einer Datenbank gespeicherten Referenzdaten verglichen werden. Diese Methoden sind besonders nützlich in Umgebungen, in denen GPS-Signale schwach oder unzuverlässig sind, wie z.B. in Innenräumen oder dichten urbanen Gebieten. Die wichtigsten Algorithmen sind:

* Verstecktes Markov-Modell (HMM): Das HMM wird verwendet, um die Bewegung des Mobilgeräts und die beobachteten LTE-Messdaten zu modellieren. Die verborgenen Zustände des HMM sind die Position und die Geschwindigkeit des Mobilgeräts. Die Übergangswahrscheinlichkeiten modellieren die Bewegung des Geräts auf einem Straßennetzwerk.
* Partikelfilter (Particle Filter): Ein Partikelfilter-Algorithmus wird verwendet, um die Zustände des HMMs zu schätzen. Der Partikelfilter hält eine Menge von Partikeln, die jeweils eine Schätzung des Zustands des HMMs und ein Gewicht repräsentieren, das die Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen widerspiegelt. Der Algorithmus aktualisiert diese Partikel basierend auf den Übergangswahrscheinlichkeiten und den Beobachtungen.
* Regression basierte Beobachtungslikelihood: Zufallswälder (Random Forests) werden verwendet, um die Wahrscheinlichkeit einer Beobachtung (z.B. gemessene RSRP-Werte) basierend auf einem Standort zu schätzen. Diese Wahrscheinlichkeiten werden dann verwendet, um die Beobachtungslikelihoods im Partikelfilter zu berechnen.
* Support Vector Machine (SVM): Eine SVM wird verwendet, um zu klassifizieren, ob eine LTE-Messung von einem Innen- oder Außenbereich stammt. Die Klassifizierung basiert auf den RSRP- und RSSI-Werten der Messung. Andere Algorithmen wie logistische Regression und Zufallswälder wurden ebenfalls getestet, aber die SVM zeigte die besten Ergebnisse für diese Aufgabe.

Ray et al. (2016) hat einen genannten Algorithmus entwickelt, um eine effektive Lösung für die Lokalisierung zu bieten.

Ein Bild, das Karte, Text, Atlas enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 3:Vergleich von tatsächlichen (rot) und vorhergesagten (blau) Standorten (Quelle: Ray et al., 2016)

Ray et al. (2016) haben eine mittlere Genauigkeit von 20 Metern in städtischen Gebieten gezeigt, was eine deutliche Verbesserung gegenüber den mehr als 100 Metern Genauigkeit darstellt, die bei nicht auf maschinellem Lernen basierenden Techniken berichtet wurden. Eine größere Herausforderung besteht darin, Innenstandorte zumindest in Bezug auf Gebäude zu identifizieren.

### Geometrische Lokalisierungsmethoden

Geometrische Lokalisierungsmethoden basieren auf der Nutzung geometrischer Prinzipien zur Bestimmung des Standorts eines Objekts oder Geräts. Diese Methoden verwenden typischerweise die Positionen bekannter Referenzpunkte (wie Basisstationen) und messen Entfernungen oder Winkel zwischen diesen Referenzpunkten und dem zu lokalisierendes Objekt.

Ein Bild, das Text, Diagramm, Screenshot, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 4: Prinzip der geometrischen Lokalisierungsmethoden   
(Quelle: Li et al. (2021))

* Multilateration: Die Multilateration kann verwendet werden, um den Standort eines Knotens zu schätzen, indem die Positionen von mindestens drei Basisstationen (BSs) und ihre Entfernungen zum Knoten verwendet werden. Das Grundprinzip besteht darin, die Schnittpunkte zwischen Kugeln (für die 3D-Lokalisierung) und Kreisen (für die 2D-Lokalisierung) zu berechnen. Diese Methode wird häufig zur Standortbestimmung drahtloser Basisstationen eingesetzt. Gängige Schätztechniken sind das Verfahren der kleinsten Quadrate und der Kalman-Filter (KF). Die Leistung der Multilateration kann durch die Verbesserung der Reichweitenmessgenauigkeit und die Minderung von umgebungs- und empfängerbedingten Fehlern verbessert werden. (Li et al., 2021)
* Hyperbolische Lokalisierung: Die hyperbolische Lokalisierung, die ursprünglich für die Loran-Navigation entwickelt wurde, ist die Hauptmethode für TDoA-Lokalisierung (Time Difference of Arrival). Diese Methode basiert auf den Entfernungsunterschieden zwischen dem zu lokalisierenden Knoten und verschiedenen Basisstationen (BSs). Da bei der hyperbolischen Lokalisierung keine präzise Zeitsynchronisation auf den Knoten erforderlich ist, bietet sie ein großes Potenzial für die Lokalisierung in Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN).

Ein Bild, das Entwurf, Diagramm, Design enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 5: Darstellung der Positionierung basierend auf TDOA-Messungen  
(Quelle: Yu et al. (2009))

# Mikrocontroller- und LTE-Modemeinheiten

## Microcontroller Unit (MCU)

## Quectel BG96 LTE Modem

# AT Commands

# Serialisierung und Deserialisierung von Daten

# Web Services für IoT Geräte

# Datenvisualisierung

# Vernetzung

## Einschalten des Modems

## Transmission Control Protocol (TCP)

## Secure Socket Layer (SSL) Connection

## Message Queue Telemetry Transport (MQTT)

# Standort und GPS-Tracking

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Dieser Code steuert ein GNSS-Modul (Global Navigation Satellite System) über ein Arduino-Board. Das Modul verwendet die BG96-Bibliothek, um GNSS-Daten zu initialisieren und zu lesen. Die Kommunikation erfolgt über serielle Schnittstellen.

#include "Arduino.h"

#include "BG96\_GNSS.h"

#define DSerial SerialUSB

#define ATSerial Serial1

#define UART\_DEBUG

GNSS\_Work\_Mode\_t mode = STAND\_ALONE;

\_BG96\_GNSS \_5GNBIoT(ATSerial, DSerial);

void setup()

{

  DSerial.begin(115200);

  while (DSerial.read() >= 0)

    ;

  DSerial.println("This is the \_5GNBIoT Debug Serial!");

  ATSerial.begin(115200);

  while (ATSerial.read() >= 0)

    ;

  delay(1000);

  if (\_5GNBIoT.InitModule())

  {

    DSerial.println("\r\n\_5GNBIoT.InitModule() OK!");

  }

  delay(1000);

  if(\_5GNBIoT.SetGNSSOutputPort(UARTNMEA)){

    DSerial.println("\r\nSet GNSSOutputPort OK!");

  }

  \_5GNBIoT.SetDevCommandEcho(false);

  delay(100);

  if (\_5GNBIoT.TurnOnGNSS(mode, WRITE\_MODE))

  {

    DSerial.println("\r\nOpen the GNSS Function Success!");

  }

  else

  {

    DSerial.println("\r\nFail to open GNSS Function!");

  }

}

void loop()

{

  char gnss\_posi[128];

  if (\_5GNBIoT.GetGNSSPositionInformation(gnss\_posi))

  {

    DSerial.println("\r\nGet the GNSS Position Success!");

    DSerial.println(gnss\_posi);

  }

  else

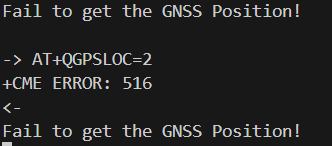
  {

    DSerial.println("\r\nFail to get the GNSS Position!");

  }

  delay(3000);

}

Fehler 516: 

# Zusammenfassung und Ausblick

# Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten

# Anhang B: Formatvorlagen

# Glossar

# Quellenverzeichnis

**3GPP** – the mobile broadband standard. (o. D.). 3GPP.

<https://www.3gpp.org/>. (Datum des Zugriffs: 18. August 2000).

**Liberg, O., Sundberg, M., Wang, E., Bergman, J. & Sachs, J.** (2017). Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance. Academic Press.

**Li, Y., Zhuang, Y., Hu, X., Gao, Z., Hu, J., Chen, L., He, Z., Pei, L., Chen, K., Wang, M., Niu, X., Chen, R., Thompson, J., Ghannouchi, F. M. & El-Sheimy, N.** (2021). Toward Location-Enabled IoT (LE-IoT): IoT Positioning Techniques, Error Sources, and Error Mitigation. IEEE Internet Of Things Journal, 8(6), 4035–4062.

**Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M.** (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(2), 855-873.

**Ray, A., Deb, S. & Monogioudis, P.** (2016). Localization of LTE measurement records with missing information. IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference On Computer Communications.

**Yu, K., Sharp, I. & Guo, Y. J.** (2009). Ground‐Based wireless positioning, 152-155.

# Stichwortverzeichnis