HOCHSCHULE
MITTWEIDA
University of Applied Sciences

BACHELORARBEIT

Herr
Nico Schmalz

Konzept für die forensische Analyse von Funkmastdaten

Mittweida, Oktober 2025

Fakultät **Angewandte Computer- und Biowissenschaften**

BACHELORARBEIT

Konzept für die forensische Analyse von Funkmastdaten

Autor:
Nico Schmalz

Studiengang:
allgemeine und digitale Forensik

Seminargruppe:
FO22w4-B

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer:
Paul Seidel, M.A.

Einreichung:
Mittweida, 05.10.2025

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2025

Faculty of **Applied Computer Sciences and Biosciences**

BACHELOR THESIS

Concept for the forensic analysis of radio cell data

Author:
Nico Schmalz

Course of Study:
general and digital forensics

Seminar Group:
FO22w4-B

First Examiner:
Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Second Examiner:
Paul Seidel, M.A.

Submission:
Mittweida, 05.10.2025

Defense/Evaluation:
Mittweida, 2025

Bibliografische Beschreibung

Schmalz, Nico:
Konzept für die forensische Analyse von Funkmastdaten. – 2025. – 37 S.
Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2025.

Referat

Diese Arbeit stellt ein erstes öffentliches Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten vor.

Zur Entwicklung des Konzeptes wurde ein praktisches Beispiel in Form eines echten Polizeifalles herangezogen. Zur Durchführung des Konzeptes wurde dabei eine Sammlung an Algorithmen mit Python programmiert.

Durch die Durchführung des entworfenen Konzeptes konnte eine Liste aller in den Funkmastdaten vorkommenden Personen erstellt werden, mit ihren Aufenthaltsorten innerhalb der Daten in Form von zeitlich geordneten Sequenzen.

Insgesamt konnte ein Konzept erstellt werden, welches alle relevanten Informationen aus Funkmastdaten extrahiert, welche gut nutzbar sind für die weitere Untersuchung der entsprechenden Polizeifälle.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ANN . . . . . approximate nearest neighbor

BND . . . . . Bundesnachrichtendienst

DG-Format . . . . . Dezimalgrad Format

DSGVO . . . . . Datenschutz-Grundverordnung

GMM-Format . . . . . Grad und Dezimalminuten Format

GPRS . . . . . General Packet Radio Service

HNSW . . . . . Hierarchical Navigable Small World

iMEI . . . . . International Mobile Equipment Identity

IMS . . . . . IP multimedia subsystems

iMSI . . . . . International Mobile Subscriber Identity

KNN . . . . . k nearest neighbor

LSH . . . . . local sensitive hashing

mSISDN . . . . . Mobile Station Integrated Services Digital Network Number

StPO . . . . . Strafprozeßordnung

TKÜ . . . . . Telekommunikationsüberwachung

TKÜV . . . . . Verordnung über die technische und organisatorische Umsetzung von Maßnahmen zur Überwachung der Telekommunikation

VoIP . . . . . Voice over Internet Protocol

XML . . . . . Extensible Markup Language

1 Einleitung

Die technische Entwicklung des Mobilfunks schreitet immer weiter voran. Mehr als zwei Drittel der Weltbevölkerung besitzen ein Handy [1]. In Deutschland ist diese Zahl noch höher. Es nutzen 82 Prozent aller Deutschen ab 16 Jahren ein Smartphone [2]. Mit dem technischen Fortschritt kommt auch eine Entwicklung der polizeilichen Ermittlungen.

In den vergangenen Jahren hat sich deshalb eine neue Ermittlungsmethode entwickelt, die als Telekommunikationsüberwachung (TKÜ) bezeichnet wird. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland in 5174 Verfahren TKÜ-Maßnahmen durchgeführt [3]. Es existieren jedoch keine öffentlich zugänglichen Konzepte für eine TKÜ-Untersuchung. Es gibt somit keine einheitliche Methode zur Untersuchung der aus TKÜs erhaltenen Daten.

1.1 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten entworfen werden. Dieses soll daraufhin an einem echten Fallbeispiel ausgetestet werden. Hierfür wird eine Toolbox mit allen wichtigen Funktionen für die Untersuchung zusammengestellt. Es sollen dabei Personenprofile und Bewegungsmuster der Personen aus dem Datensatz erstellt werden, welche unter anderem durch Sequenzvergleiche der Bewegungsmuster untersucht werden sollen.

Dementsprechend wurden 5 Forschungsfragen formuliert, die untersucht werden sollen:

- Welche Schritte sind erforderlich, um ein methodisch und technisch tragfähiges Konzept für die Durchführung einer Telekommunikationsüberwachung zu erarbeiten?
- Welche Möglichkeiten und Grenzen zeigt die praktische Umsetzung des entwickelten TKÜ-Konzepts in einem realen Fallbeispiel auf?
- Welche Funktionen und Module muss eine programmierte Toolbox enthalten, um die Durchführung und Analyse einer TKÜ effizient zu unterstützen?
- Welchen Beitrag können aus TKÜ-Daten abgeleitete Personenprofile bei kriminalistischen Untersuchungen leisten?
- Welche Ansätze und Methoden ermöglichen einen effizienten Vergleich vieler langer Sequenzen, um die Laufzeit der Analyseverfahren trotz hoher Datenmengen zu reduzieren?

1.2 Forensische Bedeutung

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit existieren keine öffentlich zugänglichen Konzepte für die Untersuchung von Funkmastdaten. Diese Arbeit fällt somit in die Grundlagenforschung und soll ein erstes öffentliches Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten bieten. Ein öffentliches Konzept ist insofern wichtig, als es als Grundlage für andere forensische Sachverständige dienen kann. Dieses Konzept kann für eine einfachere und effizientere Analyse der Daten sorgen. Außerdem trägt dies zur Transparenz der polizeilichen Arbeit gegenüber der Öffentlichkeit bei.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde außerdem eine Toolbox mit Funktionen entwickelt, die als Grundlage für die Entwicklung von Software zur Untersuchung von Funkmastdaten dienen kann. Da es in diesem Bereich an Open-Source-Software mangelt, trägt dies ebenfalls zur Transparenz für die Gesellschaft und zur Zugänglichkeit für andere Forensiker bei.

Durch eine immer weiter fortschreitende Weiterentwicklung der Technik werden immer mehr Daten erzeugt. Große Datenmengen stellen in forensischen Untersuchungen ein Problem dar. Diese Datenmengen müssen in einem zeitlich begrenzten Rahmen fehlerfrei für juristische Maßnahmen bearbeitet werden. Auch TKÜs sammeln schon große Datenmengen bei kleineren Untersuchungen. Diese Datenmengen können nicht per Hand analysiert werden. Bei zu großen Datenmengen kommen auch einfachere Vergleichsalgorithmen an ihre Grenzen. Deshalb werden in dieser Arbeit Algorithmen für effiziente Vergleiche von Sequenzen ausgetestet und betrachtet, wie diese sich für forensische Anwendungen eignen.

1.3 Wichtige Definitionen

Nach dem Wörterbuch für innere Sicherheit umfasst die TKÜ alle Maßnahmen zur Überwachung von privaten Nachrichtenübermittlungen mittels technischer Einrichtungen [4]. Dies umfasst verschiedenste Formen der Informationsübertragung wie zum Beispiel Telefonate, SMS oder E-Mails. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Aufzeichnungen von Funkmasten betrachtet.

Die International Mobile Subscriber Identity (iMSI) ist eine einzigartige Kennnummer, die aus einer längeren Zahlenfolge mit 15 Stellen besteht. Die ersten Ziffern stellen den Ländercode dar, darauf folgen Nummern zur Identifikation des Netzbetreibers und die restlichen sind Kennnummern zur eindeutigen Zuordnung [5]. Sie dient zur eindeutigen Identifizierung eines Vertragspartners eines Netzbetreibers und ist auf der SIM-Karte gespeichert. Da eine Person mehrere SIM-Karten haben kann, kann es demnach sein, dass eine Person mehrere iMSIs besitzt.

Die International Mobile Equipment Identity (iMEI) ist ebenfalls eine einzigartige Kennummer und ist gegenüber der iMSI nicht pro SIM vergeben, sondern pro Handy [5]. Eine Person muss somit mehrere Handys mit verschiedenen SIM-Karten besitzen, um nicht eindeutig identifiziert werden zu können.

2 Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel werden bereits existierende Techniken betrachtet, die für die Analyse von Funkmastdaten Anwendung finden, als auch die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Funktechnik. Es ist anzumerken, dass es zum Stand dieser Arbeit kein öffentlich zugängliches Konzept für die Analyse von Funkmastdaten gibt. Ein Grund dafür könnte sein, um zukünftigen Straftätern keine Informationen über das eigene Vorgehen zu geben, sodass diese die Informationen nicht nutzen können, um die Tat zu verschleiern.

Um den momentanen Fortschritt innerhalb der forensischen Analyse von Funkmastdaten zu betrachten, werden zuerst Programme betrachtet, die bereits von der Polizei verwendet werden oder verwendet werden können. Im Anschluss folgt eine Betrachtung von möglichen Funktionen für den Vergleich von Bewegungsmustern innerhalb der Untersuchung.

2.1 Funktechnik

In der Funktechnik werden elektromagnetische Wellen zwischen 0,7 und etwa 25 GHz verwendet, um Daten zu übertragen [6]. Die Daten werden dabei zuerst von einem Gerät zu einem Funkmast gesendet und dann von Funkmast zu Funkmast weitergeleitet, bis ein Funkmast im Gebiet des Empfängers der Daten ist und somit die Daten von dem Funkmast erhält [6]. Im Rahmen der Arbeit liegen die Protokolle der Übertragungen zwischen Sender oder Empfänger und dem Funkmast vor. Die Übertragungen zwischen Funkmasten liegen nicht vor und sind für eine TKÜ nicht von Nöten.

Es gibt viele verschiedene Funkmastanlagen, die jeweils verschiedene Distanzen abdecken. Makrozellen können Gebiete von bis zu 30 km abdecken, kleine Zellen mit einem Radius von bis zu 5 km und Kleinstzellen mit weniger als 2 km Radius [6]. Die Fläche, die ein Funkmast abdeckt, ist für die Modellierung der Bewegungsprofile relevant, um das mögliche Gebiet, in dem sich eine Person während einer Übertragung befinden könnte, abzugrenzen.

Es existieren verschiedene Arten von Funkmastantennen. Je nachdem, wie Antennen ihre Wellen abstrahlen, können diese in drei verschiedene Arten unterteilt werden:

- Rundumstrahler
- Sektorantennen
- Strahlenatennen

Rundumstrahler strahlen in allen Richtungen ihre Wellen und haben dadurch einen Öffnungswinkel von 360° [6]. Sektorantennen erschließen nur einen bestimmten Bereich und füllen dadurch nicht das gesamte umliegende Gebiet [6]. Strahlantennen versuchen, möglichst zielgenau ihre Daten zu übertragen, und haben dementsprechend einen sehr geringen Öffnungswinkel [6]. Der Öffnungswinkel der Funkmasten kann ebenfalls zur Eingrenzung des Gebietes der Personen in den Daten dienen. Innerhalb des Beispieldatensatzes dieser Arbeit ist der Öffnungswinkel der Funkmasten unter der Bezeichnung ”Azimuth” gespeichert.

Zur Überwachung von Funkverbindungen kann auch ein falscher Funkmast, ein sogenannter ”iMSI-Catcher” verwendet werden. Er kann sowohl iMSI als auch iMEI aufzeichnen als auch alle Gespräche mit Zielrufnummer dokumentieren [5]. Das Gerät der zu überwachenden Person kann dabei auch aktiv gezwungen werden, sich mit dem iMSI-Catcher zu verbinden [5]. Dies kann von der Polizei verwendet werden, um aufzuzeichnen, wann eine Person in der Nähe eines iMSI-Catchers war, und um die Gespräche der Person aufzuzeichnen. Es ist anzumerken, dass iMSI-Catcher nicht nur von der Polizei verwendet werden können, sondern auch von Hackern. Es existieren zwar Apps zur Detektion von iMSI-Catchern, diese weisen jedoch Mängel in ihrer Funktionalität auf [7]. Daher können iMSI-Catcher zum Zeitpunkt der Arbeit nicht vollständig umgangen werden.

Nach Angaben der Bundesregierung werden zwar iMSI-Catcher von der deutschen Polizei eingesetzt, jedoch nicht zur Abhörung, sondern nur zur Aufzeichnung von iMSI und iMEI für weitere Maßnahmen wie die Erhebung von Verbindungsdaten [8]. iMSI und iMEI würden dabei dennoch vollständig ausreichen, um eine Person eindeutig zu identifizieren. Es würden weniger personenbezogene Daten gespeichert werden als bei herkömmlichen TKÜs, wie die, die in dieser Arbeit bearbeitet werden.

2.2 Software der Polizei

Nach einem Antwortschreiben des Bremer Senats an die CDU zur Frage, welche Software die Bremer Polizei zur Kriminalitätsbekämpfung verwendet, lässt sich entnehmen, dass die Polizei eine eigene Software namens FARMEX für die Untersuchung von Funkzellendaten besitzt [9]. Diese Software ist jedoch nicht öffentlich zugänglich. Somit kann die Software nicht von eigenständigen forensischen Sachbearbeitern genutzt werden.

Eine weitere Software, die gezielt für die polizeiliche Untersuchung von Funkzelldaten entwickelt wurde, ist ArcGIS Pro. Diese stellt eine große Sammlung an Werkzeugen zur Analyse von großen Daten zur Verfügung. Darunter fallen auch mehrere Werkzeuge für polizeiliche Untersuchungen. Ein Werkzeugpaket ist dabei gezielt für die Mobilfunkanalyse [10].

Im Gegensatz zu FARMEX ist diese Software öffentlich zugänglich. Dafür ist der Zugang kostenpflichtig. ArcGIS Pro kann ebenfalls in Python eingebunden werden und liefert für die Untersuchung eine Anleitung für die Aufarbeitung der Daten zur späteren Analyse unter Verwendung der Software [10]. Diese Anleitung kann als Grundlage für den Beginn einer forensischen Analyse von Funkmastdaten verwendet werden und kann dementsprechend für die Datenaufarbeitung verwendet werden. Die Anleitung von ArcGIS liefert dabei ein einheitliches Format für die Bezeichnung von einzelnen Attributen der Daten [10], was für die Bearbeitung von Vorteil sein kann. Es ermöglicht, dass zwei Analysten unabhängig voneinander durch gleichbleibende Bezeichner einfacher die Daten untersuchen können.

Eine weitere Software stellt die Firma Palantir zur Verfügung. Palantir bietet Software für die Analyse und das Management von großen Datenmengen an. Ihre Software Palantir Gotham hat bereits hohes Ansehen erreicht, durch deren Anwendung durch das US-Militär. Es wird dort in Waffensystemen eingesetzt, um schnell Entscheidungen zu treffen [11]. Große Datenmengen können in Echtzeit durch KI-unterstützte Methoden unter Verwendung einer interaktiven grafischen Oberfläche analysiert werden [12]. Dies könnte auch bei der Analyse von Funkmastdaten Anwendung finden. Für die polizeiliche Anwendung von sensiblen Daten wie den Funkmastdaten ist der Datenschutz besonders

wichtig. Palantir trifft zwar keine direkten Aussagen zur deutschen Gesetzgebung, jedoch versichern sie, dass ihre Software der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) entspricht [13]. Somit sollte es möglich sein, Palantir in Deutschland für TKÜs einzusetzen. Jedoch wirft die KI-unterstützte Untersuchung der Daten Fragen zur Transparenz der Untersuchung auf.

In Tabelle 1 wurden die drei in diesem Kapitel vorgestellten Programme FARMEX, ArcGIS Pro und Palantir Gotham verglichen.

Tabelle 1: Vergleich der Software

	FARMEX	ArcGIS Pro	Palantir Gotham
öffentlich zugänglich	Nein	Ja	Ja
spezialisiert auf Polizeiarbeit	Ja	Ja	Nein
Kostenpflichtig	—	Ja	Ja

2.3 Sequenzvergleiche

Für die Analyse der Bewegungsmuster werden die Bewegungen in Form einer Sequenz aus den besuchten Funkmasten dargestellt. Hierbei muss innerhalb der Sequenz nach Auffälligkeiten gesucht werden. Auch ist die Suche nach Ähnlichkeiten zwischen Frequenzen relevant.

Eine grundlegende Methode für den Vergleich von Sequenzen stellt die Hamming-Distanz dar. Die Hamming-Distanz berechnet die Ähnlichkeit zweier Objekte anhand der Menge an gleichen Positionen [14]. Dabei ist zu beachten, dass beide Sequenzen gleich lang sein müssen. Die Hamming-Distanz betrachtet jedoch nur identische Positionen, sodass bei einer Verschiebung der Sequenz um nur eine Stelle die Sequenzen als sehr unterschiedlich dargestellt werden, obwohl sie sich nur um eine Verschiebung unterscheiden [14]. Dies kann Fehler bei der Ähnlichkeitssuche erzeugen.

Große Sequenzvergleiche stellen jedoch ein Problem dar. Die große Datenmenge macht es schwer, durch Brute-Force alle Sequenzen in einem realistischen Zeitraum paarweise zu vergleichen. Ein Ansatz dabei wäre es, nur die Hammingdistanz der K nächsten Nachbarn zu berechnen. Dies kann durch einen approximate nearest neighbor (ANN) Algorithmus ermöglicht werden. Hier wird durch verschiedenste Methoden versucht, die K nächsten Nachbarn zu finden, ohne die Sequenzen direkt Zeichen für Zeichen zu vergleichen [15]. Dies ermöglicht Sequenzvergleiche in einem zeitlich durchführbaren Rahmen.

Die Berechnung der k nächsten Nachbarn des ANN kann auf verschiedene Weise geschehen. Eine Möglichkeit bietet das local sensitive hashing (LSH). Hier wird die Sequenz in b Bänder mit r Reihen geteilt, wobei jedes Band gehasht wird [16]. Nur wenn der gleiche Hash auftritt, wird ein Vergleich durchgeführt [16]. Dies reduziert den Anteil der notwendigen Vergleiche stark.

Eine weitere Möglichkeit bietet Hierarchical Navigable Small World (HNSW) [17] [18]. HNSW organisiert die Datenpunkte in mehreren Graphenebenen, wobei höher gelegene Ebenen eine gröbere Übersicht und niedrigere eine feinere Suche ermöglichen [18]. Durch diese Struktur kann HNSW

schnell und speichereffizient ähnliche Punkte finden. HNSW verwendet für die Ähnlichkeitsberechnung mathematische Funktionen wie die euklidische Distanz oder die Cosinus-Distanz. Somit wird für den Sequenzvergleich eine Vektordarstellung der Sequenzen benötigt.

Um Sequenzen von gleichwertigen Zeichen auf ihre Ähnlichkeit zu testen, existieren dafür sogenannte Alignment-Methoden. Diese Methoden lassen sich in zwei Arten unterteilen: in globales Alignment [19] [20] und lokales Alignment [20] [21]. Globale Alignment-Strategien basieren dabei hauptsächlich auf dem Needleman-Wunsch-Algorithmus [19] und lokales Alignment auf dem Smith-Waterman-Algorithmus [21]. Beide Algorithmen sind jedoch sehr zeitaufwendig bei sehr großen Datensätzen.

Auch in diesem Fall ist ein heuristischer Ansatz notwendig. In der Bioinformatik hat sich dabei der BLAST-Algorithmus durchgesetzt [22]. Dieser ist jedoch spezifisch auf den Vergleich von DNA- und Proteinsequenzen ausgerichtet und ist daher nicht für individuelle Sequenzformate geeignet.

3 rechtliche Aspekte

Im folgenden Abschnitt sollen rechtliche Aspekte der TKÜ betrachtet werden. Zuerst werden die Regelungen der Europäischen Union zum Umgang mit personenbezogenen Daten durch Behörden betrachtet. Dann erfolgt die Umsetzung dieser Regelungen innerhalb der deutschen Gesetzgebung. Diese Gesetze werden dabei unter Betrachtung der in dieser Arbeit analysierten TKÜ-Daten erläutert. Anschließend folgt eine Darlegung von drei Polizeifällen, in denen die TKÜ eine relevante Rolle spielte.

3.1 Gesetze zur Telekommunikationsüberwachung

Bei einer TKÜ werden Personen unter Verwendung von personenbezogenen Daten überwacht. Die Verwendung solcher Daten ist aus datenschutzrechtlichen Gründen unter besonderen Punkten zu betrachten. Für die Verwendung von personenbezogenen Daten von Behörden für die Strafverfolgung existieren innerhalb des europäischen Rechts Richtlinien, die den Umgang mit dieser Art von Daten regeln. Dazu regelt die Richtlinie (EU) 2016/680 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016, was bei Untersuchungen wie einer TKÜ beachtet werden muss [23]. Wichtig hierbei ist, dass es sich nur um eine Richtlinie handelt. Somit muss die deutsche Rechtslage zur TKÜ nicht identisch mit der Richtlinie der EU sein und kann dementsprechend zusätzliche Regelungen für den Datenschutz enthalten. Diese Richtlinie stellt dabei einen Zusatz zur DSGVO dar.

Ein wichtiger Faktor für die Handhabung der TKÜ-Daten ist eine Pseudonymisierung der Daten. Damit ist gemeint, dass es nicht möglich sein soll, nur durch die Daten alleine auf eine Person zu schließen. Dies ist in Kapitel IV Abschnitt 1 Artikel 20 der Richtlinie (EU) 2016/680 geregelt [23]. Innerhalb des Datensatzes, der in dieser Arbeit bearbeitet werden soll, ist dies beispielsweise durch die Anonymisierung der iMSI geregelt. Die iMSI liegt nicht vollständig vor, sondern ist durch ein abgeändertes Endstück gekennzeichnet. Die vollständige iMSI liegt voraussichtlich nur den Telekommunikationsanbietern vor. Innerhalb des Datensatzes liegen auch vollständige Telefonnummern vor. Somit wären vollständige Identifizierungsnummern wie iMSI und iMEI dennoch möglich, wenn eine Übergabe der vollständigen Telefonnummer auch rechtsmäßig ist.

Wichtig für diese Arbeit ist zusätzlich Kapitel IV Abschnitt 1 Artikel 22 der Richtlinie (EU) 2016/680, der Regelungen für Auftragsverarbeiter der Daten darlegt [23]. Unter Auftragsverarbeiter würden auch eigenständige forensische Sachverständige fallen. Hierbei ist wichtig, dass die Daten nicht an weitere forensische Sachverständige weitergeleitet werden dürfen, ohne Genehmigung der Verantwortlichen [23]. Somit benötigt ein forensischer Sachverständiger erst eine Genehmigung der polizeilichen Dienststelle für die durchgeführte TKÜ, bevor er einen weiteren Sachverständigen hinzuzieht. Zusätzlich werden Regelungen gesetzt, wie eine Verschwiegenheitspflicht oder dass nur nach Anweisung der verantwortlichen Behörde gehandelt werden darf [23]. Abschließend ist noch relevant, dass bei Verstoß gegen diese Richtlinien durch den Auftragsverarbeiter dieser auch als Verantwortlicher gilt und nicht die Behörde [23]. Ein vorsichtiger Umgang mit den Daten ist somit vonnöten.

Die TKÜ ist in der deutschen Gesetzgebung in der Strafprozeßordnung (StPO) geregelt. Dies steht in der Einzelnorm § 100a StPO geschrieben [24]. Dieser Paragraph regelt, wann eine TKÜ durchgeführt werden darf. Hierbei werden in § 100a Abs. 2 StPO namentlich genannt, welche Verstöße zu einer TKÜ führen [24]. Am Beispiel des Falls, welcher in dieser Arbeit betrachtet werden soll, liegt die Straftat des versuchten Mordes vor. Für die TKÜ ist hierbei § 100a Abs. 2 Nr. 1h StPO von Bedeutung, welches eine TKÜ bei Mord oder Totschlag erlaubt [24]. Es muss für den Fall zusätzlich § 100a Abs. 1 Nr. 1 StPO wichtig sein, da somit auch eine TKÜ möglich ist, wenn auch der Versuch einer in Absatz 2 aufgelisteten Straftat strafbar ist [24].

Neben § 100a StPO existiert zur Regelung einer TKÜ zusätzlich die Verordnung über die technische und organisatorische Umsetzung von Maßnahmen zur Überwachung der Telekommunikation (TKÜV). Diese beschreibt den Ablauf und die Aufgaben für Ermittler und Telekommunikationsanbieter genauer. Die TKÜV stellt somit die deutsche Umsetzung der Richtlinie (EU) 2016/680 dar.

Für die Entwicklung eines Konzeptes ist ein einheitlicher Aufbau der Daten notwendig. Für die Datenstruktur selbst existieren keine Vorlagen. Es ist jedoch gesetzlich geregelt, welche Daten enthalten sein müssen. Diese sind in § 7 TKÜV aufgelistet [25]. Hierzu zählen Informationen zu den Gesprächsteilnehmern [25]. Von der überwachten Person muss eine Kennung aufgezeichnet werden, wie beispielsweise die Telefonnummer oder die iMSI. Gleiches gilt auch für die Ziel- oder Herkunftsadresse der gesendeten oder empfangenen Daten [25]. Außerdem müssen Standortdaten als auch Zeitangaben zur Verbindung, wie Start und Dauer der Verbindung, aufgezeichnet werden [25]. Weiterhin müssen Gründe für Abbrüche oder gescheiterte Verbindungsversuche aufgezeigt werden als auch verwendete Kodierungen [25]. Somit kann bei der Erstellung des Konzeptes davon ausgegangen werden, dass bestimmte Informationen immer vorliegen.

3.2 Fallbeispiele

Ein Fall, wo die TKÜ gute Erfolge erzielte, ist der Visselhöveder Blutrache-Prozess. Zur Lösung des Falles wurden Millionen von Funkzelldaten analysiert [26]. Diese Zahl ist keine Übertreibung. Für eine geeignete Untersuchung mittels Funkzelldaten sind große Datensätze notwendig. Der Datensatz, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird, beinhaltet daher rund 16,5 Millionen Einträge. Durch eine Bewegungsmusteranalyse und eine darauffolgende Suche nach Verbindungen zwischen mehreren Handys konnten folglich drei Handys identifiziert werden, die sich immer in denselben Funkzellen zu denselben Zeiten befanden und zusätzlich zur gleichen Zeit, am Abend vor der Tat, aktiviert wurden [26]. Für eine erfolgreiche Analyse von Funkmastdaten sind somit die Erstellung von Bewegungsprofilen und eine Suche nach Ähnlichkeiten dieser Profile zielführend. Weiterführend hat die Polizei die Bewegungsprofile mit fallrelevanten Orten, wie der Wohnung des Verdächtigen, und mit relevanten Zeiten, wie der Tatzeit, abgeglichen [26]. Somit sind Informationen des Falles für die Analyse relevant. Ein Täterprofil mit relevanten Orten und Zeiten sollte daher für den Vergleich mit den anderen Bewegungsprofilen ebenfalls mit einbezogen werden.

Die Verwendung von Funkzelldaten steht auch in der Kritik. Der Spiegel berichtete 2013 von einem Fall, bei dem der Bundesnachrichtendienst (BND) Funkzelldaten an die NSA übermittelte, was womöglich zu der gezielten Tötung von Al-Qaida-Kämpfern durch die USA geführt hatte [27]. In einem weiteren Artikel erklärt der Spiegel mehr zu der Legalität dieser Datenübermittlung. Ein Erlass des Bundesinnenministeriums vom 24. November 2010 bestätige die Übermittlungspraxis

[28]. Es zeigt, dass Funkzelldaten auch an andere ausländische Behörden weitergeleitet werden können. Dies könnte bei Datenschutzregelungen bezogen auf die Weitergabe der Funkzelldaten an forensische Sachverständige von Bedeutung sein. Es ermöglicht den Rahmen der Weitergabe an andere Ermittlungsstellen wie eigenständige Forensiker.

Der Artikel erhebt ebenfalls eine interessante Aussage für die Modellierung von Bewegungsmustern. Der Bundesnachrichtendienst (BND) habe erklärt, dass Mobilfunkdaten für eine zielgenaue Lokalisierung einer Person nicht geeignet seien [27]. Dies wird voraussichtlich darauf bezogen sein, dass die Funkzelldaten keine Standorte von Personen beinhalten, sondern nur die Koordinaten der Funkmasten. Dies ermöglicht keine genaue Ortung, sondern nur eine relative Schätzung innerhalb der Reichweite der Funkmasten. Hierbei ist anzufügen, dass trotzdem relative Bewegungsmuster erstellt werden können durch die sequenzielle Betrachtung von Einträgen über mehrere Funkmasten hinweg. Der Artikel weist ebenfalls auf einen Experten hin, der nach Angaben der Süddeutschen Zeitung die Daten zur Ortung als nützlich betrachtet [27].

Ein dritter Fall aus der Schweiz zeigt, wie die Polizei einen Drogendealer mithilfe eines iMSI-Catchers überführen konnte [29]. Der iMSI-Catcher wurde hier dafür verwendet, die Gespräche des Drogendealers zu überwachen, den die Polizei bereits vorher zwei Jahre unter Beobachtung hatte [29]. Dieser Fall zeigt somit, dass auch iMSI-Catcher erfolgreich für die TKÜ Verwendung finden können. Es gibt jedoch auch Kritik an der Anwendung von iMSI-Catchern durch die Polizei. Martin Steiger, ein Mitglied der Digitalen Gesellschaft, äußerte dazu wie folgt: "Die Polizei hat die Möglichkeit, bei jedem Bürger, über den sie Daten gesammelt hat, eine Telefonbuchabfrage durchzuführen."[29]. Tatsächlich könnte man durch iMSI-Catcher einfacher genauere Bewegungsmuster von einzelnen Personen erzeugen.

4 Konzeptentwicklung

Um Funkmastdaten effektiv untersuchen zu können, ist ein grundlegendes Konzept notwendig. Diese Arbeit soll ein erstes grundlegendes Konzept präsentieren, welches für zukünftige Untersuchungen Anwendung finden soll.

Das Konzept besteht aus fünf Schritten:

1. Auswahl der Werkzeuge für die Untersuchung
2. Untersuchung der Daten
3. Erstellung einer Personenliste
4. Extraktion von Bewegungsmustern
5. Sequenzanalyse der Bewegungsmuster

Es ist wichtig zu erwähnen, dass dieses Konzept nur eine Grundlage für die Untersuchungen stellt und deshalb die einzelnen Abläufe gegebenenfalls an die Gegebenheiten des untersuchten Polizeifalles anzupassen sind.

4.1 Auswahl Untersuchungswerkzeuge

Bevor die Untersuchung beginnen kann, müssen die verwendeten Werkzeuge ausgewählt werden. Die Auswahl kann dabei auf bereits existierende oder eigene Programme fallen. In Abschnitt 2.2 wurden bereits drei Werkzeuge aufgelistet, die Anwendung finden können.

Es ist jedoch zu beachten, dass eine Transparenz des Ablaufs der Algorithmen der Software für die juristische Darlegung des Falls bedeutend sein kann. Bei kostenpflichtigen Werkzeugen ist es schwer, einen Einblick in die Funktion der Algorithmen zu bekommen. Ein kostenpflichtiges Werkzeug sollte daher nur verwendet werden, wenn bereits bekannt ist, dass es vor Gericht als Analysewerkzeug nicht infrage gestellt wird.

Dieses Problem kann durch Open-Source-Projekte umgangen werden, jedoch können kostenlose Werkzeuge vor Gericht einen schlechten Eindruck verursachen. Außerdem konnte im Rahmen der Recherche für diese Arbeit keine Open-Source-Software gefunden werden.

Eine dritte Möglichkeit bietet das eigene Erstellen von einer Analysesoftware. Es erleichtert die Protokolierung der Untersuchung. Außerdem sind die genauen Abläufe der Algorithmen durch eigenes Erstellen dieser bekannt. Es ist jedoch anzumerken, dass dies wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Verwendung von bereits existierender Software. Werden regelmäßig Analysen von Funkmastdaten durchgeführt, kann diese Zeit durch Wiederverwendung verringert werden. Für die Erstellung eigener Software sollte dann eine einfache Programmiersprache gewählt werden, die der Analyst selbst gut beherrscht.

Die drei Möglichkeiten zur Wahl der Werkzeuge wurden in Tabelle 2 übersichtlich verglichen.

Tabelle 2: Vergleich der Möglichkeiten zur Werkzeugwahl

	Open Source	Kostenpflichtige Software	selbst Programmiert
Kosten	keine	hoch	keine
Zeitaufwand	gering	gering	hoch
Seriösität	gering	hoch	hoch
Transparenz	hoch	gering	hoch

4.2 Untersuchung der Daten

Zu Beginn der Untersuchungen müssen die Daten genauer betrachtet werden. Diese Untersuchungen lassen sich in drei Teile gliedern:

1. Aufbau der Daten
2. Inhaltliche Analyse
3. Problembetrachtung

Im ersten Schritt legt man dar, auf welche Art und Weise die Daten vorliegen. Dafür ist wichtig, das Dateiformat zu klären. Dies ist wichtig, um zu verstehen, wie und an welchen Stellen die relevanten Informationen der Daten gespeichert sind. Manche Dateiarten sind von Menschen nicht ohne Hilfsmittel lesbar. Somit ist es wichtig, sich geeignete Werkzeuge für die Untersuchung zu suchen oder sich gute Funktionen selbst zu programmieren.

Nachdem die Datenstruktur aufgeschlüsselt wurde, ist es wichtig, die tatsächlich relevanten Attribute auffindig zu machen. Dazu zählen eindeutige Identifizierungsnummern wie die iMSI als auch Informationen zur Übertragung, wie die Art der Übertragung. Hierbei sollten vor allem die Bezeichner der einzelnen Attribute betrachtet werden, da diese sich zwischen Telefonanbietern unterscheiden können. Weiterhin sollte beachtet werden, dass sich die Struktur der Daten einzelner Funkmasteinträge variieren könnte, je nach Wert einzelner Attribute.

Um die Untersuchung zu erleichtern, eignet es sich, die Datenstruktur in eine andere umzuwandeln, die einerseits auch ohne Werkzeuge lesbar ist und andererseits einfacher aufgebaut ist, um Speicherplatz und Rechenaufwand zu verringern. Dafür empfiehlt sich beispielsweise das CSV-Format.

Nachdem der Aufbau der Daten untersucht wurde, folgt in der Datenanalyse noch eine Untersuchung des Dateninhaltes und somit der Funkmasteinträge, ohne die Einträge auf einzelne Personen zu übertragen. Es werden somit allgemeine Informationen aus den Datensätzen erhoben. Falls der Fall mehrere Datensätze umfasst, sollte bei jedem Punkt nach gemeinsamen Faktoren geschaut werden.

Ein Punkt, der untersucht werden sollte, ist beispielsweise die zeitliche Verteilung der Einträge. Ist die Zeitspanne zwischen erster und letzter Übertragung groß genug, kann dies auch in Form einer Heatmap dargestellt werden. Dies bietet die Möglichkeit, nach Auffälligkeiten zu suchen. Darunter fallen Zeitpunkte, an denen besonders viele und besonders wenige Aufzeichnungen der Funkmasten

stattgefunden haben. Dies kann einerseits dem Ermittler helfen, besondere Ereignisse oder Veranstaltungen im Bereich des untersuchten Gebietes auffindig zu machen, andererseits kann es auch genutzt werden, um Tatzeitpunkte zu untersuchen. Bei mehreren Datensätzen sollte auch nach zeitlichen Überschneidungen geschaut werden oder eine Reihenfolge mit den Zeitabständen zwischen den Aufzeichnungen der einzelnen Datensätze erstellt werden.

Weiterhin sollte eine Untersuchung der Einträge pro Identifizierungsnummer folgen. Als Identifizierungsnummer sollte ein Attribut festgelegt werden, das pro Person innerhalb der Daten möglichst einmalig ist und auch häufig vorkommt. Es sollte dadurch untersucht werden, wie viele Personen ungefähr innerhalb der Daten vorkommen. Außerdem kann durch Durchschnitts- und Maximalwertbetrachtung die Verteilung der Einträge pro Person untersucht werden. Je nach Fall können so Personen mit besonders vielen Einträgen oder besonders wenigen Einträgen gezielter betrachtet werden. Personen mit besonders vielen Einträgen stellen dabei wahrscheinlicher Personen dar, die innerhalb des Aufzeichnungsgebietes wohnen. Bei sehr wenigen Einträgen sind es eher Personen, die auf der Durchreise waren. Bei mehreren Datensätzen sollte zusätzlich nach Überschneidungen dieser Identifizierungsnummern geschaut werden. Falls mehrere Aufzeichnungen in mehreren Gebieten relevant sind, sind daher Personen relevanter, die in allen relevanten Gebieten waren.

Auch die untersuchten Gebiete sollten betrachtet werden. Hierfür sollte eine Liste der angefragten Funkmasten erstellt werden. Falls die Koordinaten der Funkmasten in den Daten gespeichert sind, sollten diese mit einer offiziellen Liste von Funkmasten abgeglichen werden. Falls die Daten mit einem iMSI-Catcher aufgezeichnet wurden, entfällt der Abgleich mit der offiziellen Liste. Für die Untersuchung der Koordinaten eignet es sich, diese in einer Karte einzuzeichnen. Wichtig sind für die Untersuchung die Größe des untersuchten Gebietes und die Dichte der Funkmastverteilung. Bei der Erstellung des Bewegungsprofils kann bei kleineren Gebieten mit vielen Funkmasten schneller ein Funkmast ausgelassen werden, aufgrund fehlender Übertragungen, da durch schnelleres Wechseln der Funkmasten möglicherweise keine Übertragung an einzelnen stattgefunden hat. Sind die Funkmasten weiter verteilt, kann es durch die größere Variabilität der Routenwahl schneller dazu kommen, dass Funkmasten umgangen werden. Außerdem besteht die Möglichkeit längerer Pausen zwischen dem Besuch zweier verschiedener Funkmasten. Bei Untersuchung mehrerer Datensätze sollte zusätzlich auf die Überschneidung der Aufzeichnungsgebiete als auch die Distanz zwischen den Gebieten geachtet werden.

Final sollten ebenfalls mögliche Fehler in den Datensätzen geklärt werden. Darunter fallen Einträge mit fehlenden Werten. Hier ist zu klären, wie es zu den Lücken gekommen ist. Auch Werte, die auf den ersten Blick unrealistisch sind, und sonstige Auffälligkeiten sollten betrachtet werden.

4.3 Personenprofile

Nach der Betrachtung der Daten soll im folgenden Schritt eine Liste der in den Daten vorkommenden Personen erstellt werden.

Wie bereits in vorherigen Kapiteln angesprochen wurde, liegen auf Grund von datenschutzrechtlichen Gründen keine genauen Personaldaten wie Namen vor. Die Daten sind demnach pseudonymisiert. Dennoch sollten Identifizierungsnummern vorliegen. Im Rahmen von Funkmastdaten sind hierbei

besonders die iMSI und die iMEI relevant. Eines dieser sollte als Schlüsselelement für die Identifikation verwendet werden. Es sollte die Identifikationsnummer gewählt werden, die in möglichst allen Einträgen der Funkmastdaten existiert. Die iMSI ist zwar auch pseudonymisiert, dennoch sollte diese innerhalb des Datensatzes eine eineindeutige Kennungsnummer sein.

Die iMSI ist eine Kennnummer für die Identifizierung von SIM-Karten beziehungsweise deren Verträgen und die iMEI zur Identifizierung von Handygeräten. Es ist somit möglich, dass eine iMEI mehreren iMSIs zugeordnet werden kann, wenn ein Handy mit mehreren SIM-Karten vorliegt. Auch umgekehrt kann dies der Fall sein, falls eine Person eine SIM-Karte mit mehreren Handys verwendet. Bevor festgelegt wird, welcher dieser zwei Identifikatoren als Schlüsselelement am besten geeignet ist, sollte somit überprüft werden, ob eine iMSI mehreren iMEIs oder eine iMEI mehreren iMSIs zugeordnet werden kann. Falls kein Schlüsselelement aus den Identifizierungsnummern aus dem Datensatz verwendet werden kann, da keiner eindeutig einer Person zugeordnet werden kann, sollte eine eigene eindeutige Kennung beispielsweise anhand einer ID erfolgen. Dies sollte angewendet werden, falls sowohl iMSI als auch iMEI und alle weiteren Identifizierungsnummern wie die Telefonnummer bei mindestens einer Person mehrfach vorliegen würden.

Nach Auswahl des Schlüsselelementes sollte jeder Person möglichst viele Informationen wie die Telefonnummer zugeordnet werden. Dabei sollte ein einheitliches Symbol oder Ähnliches festgelegt werden, um leere Felder für einzelne Informationen zu markieren.

Wenn möglich, sollte auch eine Unterscheidung von ausländischen und einheimischen Personen beispielsweise anhand der Vorwahl der Telefonnummern erfolgen. Dies ist für spätere polizeirechtliche Vorgänge relevant, da die juristischen Vorgänge bei Tätern, die in Deutschland leben, anders verlaufen als bei Tätern aus dem Ausland.

Es ist wichtig zu beachten, dass es auch möglich ist, dass Personen mehrere Handys mit jeweils mehreren SIM-Karten besitzen. Da die Daten pseudonymisiert sind, können nicht zwei Geräte mit jeweils einer SIM einer einzigen Person durch Betrachtung der Funkmastdaten zugeordnet werden. Diese beiden Geräte würden innerhalb des Datensatzes als zwei verschiedene Personen aufgelistet werden. Eine Zuordnung könnte erst im vierten Schritt des Konzeptes geschehen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist es, wie mit Einträgen umgegangen wird, die die gewählten Elemente nicht besitzen und somit nicht einer Person der Personenliste zugeordnet werden können. Hierbei könnte einerseits versucht werden, sie durch die spätere Analyse der Bewegungsmuster einer Person zuzuordnen, wenn der Eintrag in das Bewegungsprofil einer Person passt, andererseits könnte überlegt werden, diese wegfallen zu lassen, was jedoch zu einem Verlust der Daten führt.

4.4 Bewegungsmuster

Nach Extraktion aller Personen müssen diese örtlich und zeitlich eingeordnet werden. Hierfür wird eine Sequenz, die die besuchten Funkmasten auflistet, erstellt.

Falls mehrere Datensätze für die Untersuchung vorliegen, muss entschieden werden, ob eine einzige Sequenz für alle Datensätze erstellt wird oder jeder Datensatz einzeln betrachtet wird. Entscheidend ist dafür die örtliche und zeitliche Überschneidung der Datensätze. Bei Überschneidung sollten die Datensätze gemeinsam untersucht werden. Sind sie zeitlich und örtlich unabhängig, sollten sie getrennt behandelt werden.

Für die spätere Sequenzanalyse sollte eine Liste mit den Funkmasten erstellt werden. Jeder Funkmast sollte dabei eindeutig mit einem einzigen Zeichen definiert werden. Dieses Zeichen können Buchstaben, Zahlen oder Ähnliches sein. Es sollte beachtet werden, dass Daten die Koordinaten der Funkmasten in verschiedenen Formaten aufweisen, wodurch ein Funkmast mehrere Koordinaten hat. Diese Koordinaten sollten dennoch den gleichen Funkmast und somit mit dem gleichen Zeichen markiert werden.

Weiterführend muss entschieden werden, ob die Sequenzen der Bewegungsmuster nur aus den Symbolen der Funkmasten bestehen oder ob ein weiteres Symbol hinzugefügt wird, für die Darstellung von Lücken. Dies sollte anhand der Zeitspanne der Aufzeichnung entschieden werden. Kürzere Aufzeichnungen von nur einigen Stunden benötigen keine Lücken. Man kann hier davon ausgehen, dass die Funkmasten hintereinander besucht wurden. Bei längeren Aufzeichnungen sollte ein Zeichen für eine Lücke hinzugefügt werden. Läuft eine Aufzeichnung mehrere Tage und im Verlaufe eines Tages wird keine Aufzeichnung getätigt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Person innerhalb des Tages nicht in der Region war. Hierfür sollte ein Lückenzeichen verwendet werden.

Falls ein Lückenzeichen verwendet wird, sollte eine Zeit festgelegt werden, die vergangen sein muss, bis eine Lücke eingefügt wird. Diese Zeit sollte an den Datensatz angepasst sein. Liegen die Funkmasten weiter auseinander, so sollte auch die Zeit höher sein. Liegen sie wiederum sehr nahe beieinander, dann sollte diese Zeit kurz gewählt werden.

Bei Datensätzen, die eine sehr große Zeitspanne umfassen, kann es von Vorteil sein, den Datensatz in gleich große Zeitabschnitte zu teilen. Dann wird für jede Person eingetragen, ob sie in diesem Zeitabschnitt bei einem Funkmast war, ansonsten wird ein Lückensymbol eingetragen.

4.5 Sequenzanalyse

Abschließend folgt für die Untersuchung eine Analyse der Bewegungsmuster. Hier empfiehlt es sich, die Sequenzen paarweise auf ihre Ähnlichkeit zu vergleichen.

Falls genügend Informationen zu dem untersuchten Fall vorliegen, kann die Untersuchung durch zusätzliche Sequenzen mit den wichtigsten Zeitpunkten und den dazugehörigen Funkmasten für die Tat ergänzt werden.

Stimmt eine Sequenz in vielen Punkten mit einer anderen überein, ist auszugehen, dass die Personen oft gemeinsam unterwegs waren. Hier ist jedoch zu bedenken, dass bei Sequenzen mit Lückenzeichen dieses Symbol nicht in den Anteil der Übereinstimmung einfließen sollte, da diese Symbole lediglich aussagen, dass eine Person nicht im Aufzeichnungsgebiet war. Somit sollte für Sequenzen mit Zeitabschnitten auch der Anteil der möglichen Übereinstimmungen anhand der Zeitabschnitte mit eingetragenen Funkmasten betrachtet werden.

Hierbei ist außerdem die Dichte der Verteilung der Funkmasten relevant. So können zwei Personen sehr ähnliche Sequenzen haben, wobei nur ein Funkmast in den Sequenzen vorkommt. Wenn dieser innerhalb eines größeren Gebietes der einzige Funkmast ist, kann davon ausgegangen werden, dass Personen in diesem größeren Gebiet wohnen, mit der Möglichkeit, dass diese Personen keinen Kontakt hatten.

Hierbei muss eine Auswahl der Maße zur Bestimmung der Ähnlichkeiten getroffen werden. Eine Möglichkeit bietet die Hamming-Distanz. Diese ist nur möglich, wenn die Sequenzen in Zeitabschnitte geteilt sind, da für die Hamming-Distanz alle Sequenzen gleich lang sein müssen. Hier wird jeweils bestimmt, in wie vielen Positionen die Sequenzen identisch sind. Hierbei ist anzumerken, dass die Sequenzen nicht mehr als ähnlich betrachtet werden, falls die Sequenzen um einen Zeitabschnitt verschoben sind.

Es ist außerdem zu bedenken, dass bei vielen langen Sequenzen die Rechendauer der Vergleiche sehr hoch ist. Es kann dazu führen, dass die Vergleiche mehrere Tage dauern. Heuristische Ansätze zur Ähnlichkeitensuche sind daher empfehlenswert. Es ist jedoch nicht garantiert, dass diese Ansätze die tatsächlich ähnlichsten Sequenzen finden.

Es ist anzumerken, dass nicht nur bestimmt werden kann, ob eine Person zu einer Zeit an einem Ort war, sondern auch, ob eine Person nicht am Tatort zur Tatzeit gewesen sein kann, wenn die Person zu der Tatzeit in einem entfernteren Funkmast gewesen war.

5 Praktische Anwendung des Konzepts

Im folgenden Kapitel sollen alle Schritte des im vorherigen Kapitel entworfenen Konzeptes an einem praktischen Beispiel dargestellt werden. Die Daten des Beispiels stammen von einem realen Polizeifall, der in dieser Arbeit untersucht werden soll.

5.1 Der Fall

Die in dieser Arbeit untersuchten Datensätze mit Funkmastdaten stammen von einer Untersuchung zu einem versuchten Mord an einem Bundespolizisten im Jahr 2024 in Brandenburg. Auf einer Route, auf der der Polizist mit einem Motorrad unterwegs war, wurde ein Draht auf Halshöhe gehängt, sodass dieser den Hals des Polizisten durchtrennen sollte. Der Polizist fuhr hindurch, wobei die Schnur an seinem Helm abrutschte. Der Polizist wurde dabei schwer verletzt, konnte jedoch überleben.

Es liegen lediglich die 3 Datensätze vor. Keine weiteren Fallakten wurden für diese Untersuchung übermittelt. Alle Informationen zu dem Fall stammen von Aussagen des Polizisten, der diese Daten bereitgestellt hat.

Der Fall umfasst 3 Funkmastdatensätze:

1. Vorgang 23005182
2. 2024 Vorgang Angriff auf Bundespolizisten 24028229
3. 2025 Vorgang BSD Magdeburg Alleecenter

Der erste Datensatz Umfasst ein größeres Gebiet und beinhaltet Funkmastdaten von einem Jahr vor der Tat. Dieser Datensatz beinhaltet wahrscheinlich die Tatvorbereitungen des Täters. Der zweite Datensatz umfasst den Tatort und die Tatzeit. Der dritte Datensatz stellt wahrscheinlich ein weiteres Ereignis mit der Tat dar, welches unbekannt ist.

Für die Untersuchung ist somit ein Fokus zu setzen auf Personen, die in mehreren dieser Datensätze auftreten. Da keine weiteren Zeitpunkte für den Tatablauf bekannt sind, können keine möglichen Bewegungsmuster für den Täter erstellt werden.

Da die Daten aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht werden dürfen, wurden diese nicht im Anhang hinterlegt. Die Daten liegen beim Betreuer dieser Arbeit vor.

5.2 Die Werkzeuge

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf kostenpflichtige Software verzichtet. Auch die Verwendung von Open-Source-Software wurde nicht durchgeführt. Dies erleichtert die erneute Anwendung des Konzepts für andere Untersuchungen. Außerdem wird das Konzept nicht abhängig von externer Software.

Es wurde in der Programmiersprache Python eine Toolbox entwickelt, die alle verwendeten Algorithmen beinhaltet. Die Toolbox ist auf GitHub öffentlich zugänglich. Der Link zu dieser Toolbox ist in Anhang D hinterlegt. Die Toolbox umfasst ein Command-Line-Interface, welches durch das Python-Packet ”Click” erstellt wurde. ”Click” ermöglicht das einfache Erstellen von Command-Line-Tools mit möglichst wenig Code und erstellt automatisch eine Hilfeseite [30]. Diese Hilfeseite mit der Liste aller Funktionen der Toolbox kann über den Befehl ”python Main.py” innerhalb des Ordners der Toolbox angezeigt werden. Eine Liste aller Funktionen und die dafür verwendeten Bibliotheken und Module sind in Anhang E hinterlegt.

Für die Untersuchung wurden die folgenden Bibliotheken und Module verwendet:

- collections (Counter)
- csv
- datetime
- folium
- heapq
- hnswlib
- math
- matplotlib.pyplot
- numpy
- os
- phonenumbers (geocorder)
- phonenumbers.phonenumberutil (NumberParseException)
- seaborn
- statistics
- timedelta

Für das Einlesen der Daten wurde das Python-Modul os verwendet. Dies ermöglicht den besseren Umgang mit Dateipfaden gegenüber der einfachen ”open()” Funktion [31]. Für den einfacheren Umgang mit den Daten wurden diese in CSV-Dateien umgewandelt. Hierfür wurde das Modul ”csv” verwendet. Beide Module sind standardmäßig Teil von Python und wurden auch von der Python Software Foundation erstellt.

Für die Erstellung von Statistiken wurden mehrere Module verwendet. Das Modul ”statistics” liefert mehrere Funktionen zur Berechnung von Median, Durchschnitt und weiteren Statistiken. Außerdem wurde aus dem Modul ”collections” die Klasse ”Counter” verwendet, um die Menge beispielsweise von den Einträgen eines Funkmastes zu bestimmen. Der ”Counter” ist eine Unterklasse des Dictionarys, um gezielt Objekte zu zählen [32]. Für die Berechnung von den Top n meisten und wenigsten Vorkommen von Werten wurde das Modul ”heapq” verwendet. ”heapq” ist eine Implementierung des Heap-Queue-Algorithmus und kann dafür verwendet werden, schnell die kleinsten oder größten Elemente eines Datensatzes zu finden [33]. Für verschiedene mathematische Berechnungen wurde außerdem das Modul ”math” verwendet. Alle vier Module sind ebenfalls standardmäßig Teil von Python und wurden auch von der Python Software Foundation erstellt.

Für den Umgang mit Zeitstempeln innerhalb des Datensatzes wurde das Modul ”datetime” verwendet. Diese liefert mehrere Klassen, wie die Klasse ”timedelta” zur Darstellung von der Dauer zwischen zwei Zeitpunkten. Auch dieses Modul ist standardmäßig Teil von Python.

Zur Visualisierung der Daten beispielsweise in Form einer Heatmap wurde die Python-Bibliothek ”Seaborn” verwendet. Seaborn ist eine High-Level-Schnittstelle zu ”matplotlib” und kann verschiedenste Daten in verschiedene Arten von Graphen visuell darstellen [34].

Für den Umgang mit geographischen Werten wurde die Python-Bibliothek ”Folium” verwendet. Es ermöglicht die Erstellung von interaktiven Karten, die als eigenständige HTML-Dateien dargelegt werden [35]. Hiermit kann eine Karte der abgehörten Funkmasten erstellt werden.

Zum Finden des Herkunftslandes der Telefonnummern wurde die Python-Bibliothek ”phonenumbers” verwendet. Diese ist eine Konvertierung von Googles libphonenumber-Bibliothek zu Python [36]. Hierdurch kann das Herkunftsland einer Telefonnummer bestimmt werden.

NumPy ist eine Bibliothek für verschiedenste Funktionen, die für Datenanalysen notwendig sind. NumPy liefert numerische Arrays, die als Grundlage für Data Science und das maschinelle Lernen in Python gelten [37]. Für die Sequenzanalyse in dieser Arbeit ist NumPy somit notwendig.

In dieser Arbeit werden große Mengen an Daten verglichen. Große Mengen an Vergleichen können sehr viel Zeit beanspruchen. Um dies zu umgehen, wurde die Suchmethode ANN verwendet. Eine der effizientesten Varianten von ANN ist HNSW. HNSW ermöglicht einen vollständig graphenbasierten Ansatz von ANN ohne zusätzliche Suchstrukturen, was die Effizienz für große Datenmengen erhöht [18]. Diese Methodik wurde durch die Pythonbibliothek ”hnswlib” in die Toolbox eingebunden.

5.3 Die Daten

Zu Beginn der forensischen Analyse müssen die Daten untersucht werden. Dieser Abschnitt ist in drei Teile geteilt. Zuerst werden die Dateistruktur und deren Aufbau sowie die wichtigsten Inhalte der Daten betrachtet. Darauf folgt eine Analyse des Dateninhaltes. Anschließend erfolgt eine Fehlerbetrachtung, die für die Untersuchung problematische Einträge darstellt.

5.3.1 Aufbau der Daten

Die Daten liegen in Form von Extensible Markup Language (XML) Dateien vor. Zuerst wird geklärt, wie dieses Dateiformat aufgebaut ist und wie die relevanten Informationen vorliegen.

Die XML ist eine Auszeichnungssprache. Sie verwendet sogenannte Tags, die entweder paarweise als Anfang oder Ende eines Textstückes oder einzeln als beispielsweise Zeilenumbruch auftreten [38]. Diese Tags überliefern durch ihren Typ oder durch ein Attribut die Informationen der Markierung [38]. XML stellt dadurch eine für Menschen lesbare Sprache dar, wodurch Erkenntnis über den Dateiinhalt auch ohne Hilfsmittel möglich ist.

XML ermöglicht es, dessen Grammatik dynamisch zu skalieren und zu erweitern [38]. Somit kann für jede Anwendung ein neuer Tag und somit auch eine eigene Spezialsprache erstellt werden. Die Daten sind hierarchisch strukturiert und können beliebig tief verschachtelt werden [38]. Für die Untersuchung einer XML-Datei muss somit zuerst die Struktur erschlossen werden. Weiterhin verursacht diese Verschachtelung, trotz Lesbarkeit der Sprache, Schwierigkeiten beim Lesen, wodurch Werkzeuge unumgänglich sind.

XML-Dateien sind hierarchisch strukturiert. Diese hierarchische Struktur kann als Baumdiagramm dargestellt werden. Das Diagramm zum Aufbau der gegebenen Daten wurde manuell erstellt und ist im Anhang B hinterlegt.

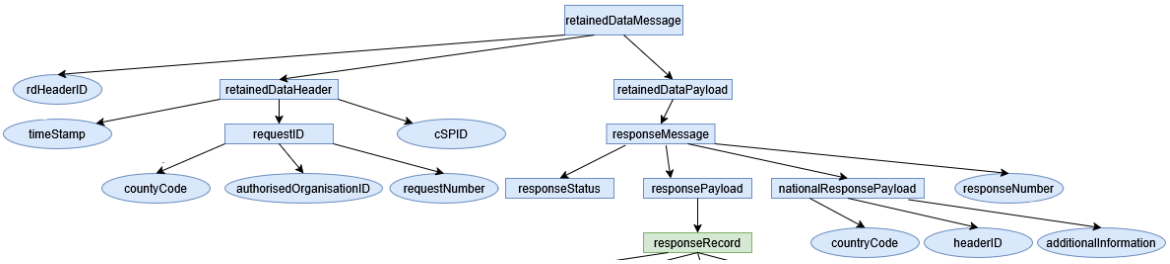

Abbildung 1: Metadatenbereich der XML-Daten

Die Struktur lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Der erste Bereich kann als Metadaten betrachtet werden. Dies sind Informationen, die nur einmal pro Datei eingetragen sind und sich auf die Datei selbst beziehen. Dieser Bereich beinhaltet Informationen wie die ID der Organisation, die die Daten erhoben hat, innerhalb des Systems, das für die Speicherung der Daten zuständig ist, oder aber Informationen zum Zeitpunkt der Abfrage der Dateien. Dargestellt sind diese im Baumdiagramm mit der Farbe hellblau. Dieser Ausschnitt des Diagramms ist in Abbildung 1 zu sehen. Der zweite Bereich ist der tatsächliche Datenbereich. Diese werden innerhalb der Struktur als „response Record" bezeichnet und treten mehrfach innerhalb des Tags "response Payload" auf. Ein Response-Record kann als ein Funkmasteintrag gesehen werden.

Der Aufbau eines Response-Records ist, je nachdem, welche Art von Übertragung stattgefunden hat, unterschiedlich. Die Übertragungsarten lassen sich in vier Gruppen einordnen:

- General Packet Radio Service (GPRS)
- Nachrichten (SMS)
- durchgeführte Anrufe
- abgelehnte Anrufe

GPRS ist ein Standard der Funktechnik für Datenübertragungen über das Internet. Es unterstützt das IP- und das X.25-Protokoll und verwendet Paketvermittlung zur Übertragung [39]. Es findet somit beispielsweise Anwendung im Übertragen von E-Mails oder im Browsen im Netz. Auch SMS können über GPRS übertragen werden. Ein Eintrag kann bereits erstellt werden, wenn das Gerät über eine App, wie eine Wetter-App, eine kurze Updateanfrage an dessen Hauptserver schickt. Da solche Übertragungen heutzutage sehr häufig auftreten, stellen diese auch einen Großteil der Funkmastdaten dar.

Alle Übertragungsarten außer GPRS enthalten mehrere Gesprächsteilnehmer. Es werden jeweils der Empfänger und der Sender aufgeführt. Die Bezeichnung dieser unterscheidet sich zwischen Anruf und Nachricht. Abgelehnte Anrufe haben noch einen dritten Teilnehmer, für den, an den der nicht angenommene Anruf weitergeleitet wird. Es wird nur von der Person im Funknetz personenbezogene Daten wie die iMSI gespeichert. Für die weiteren Teilnehmer wird nur eine "partyNumber" gespeichert.

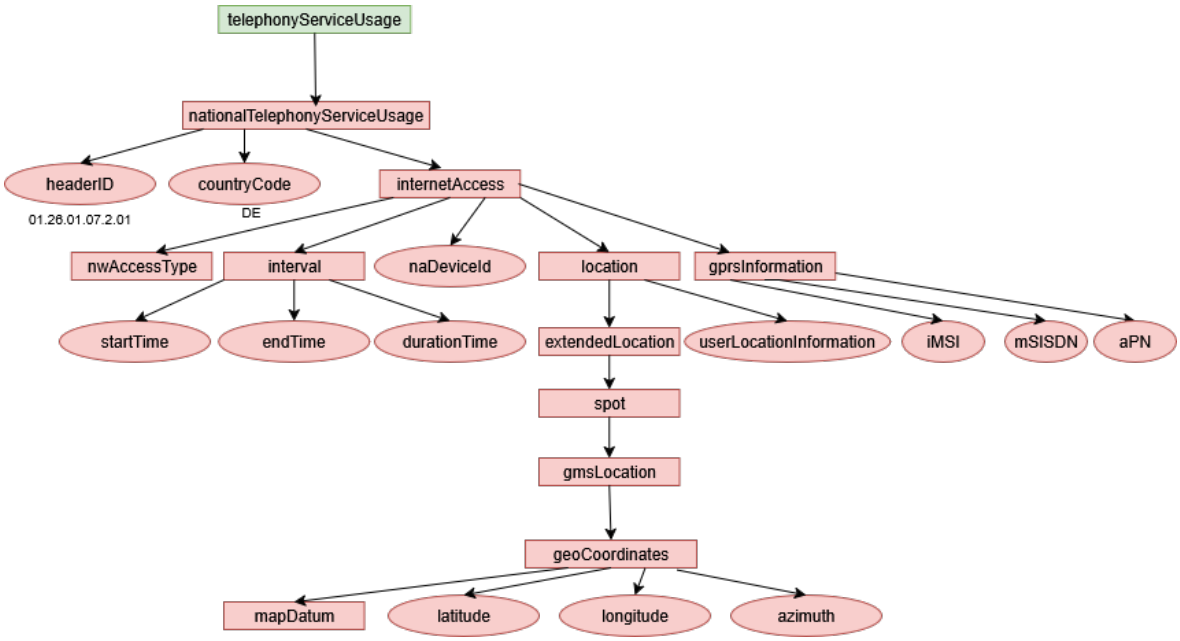

Abbildung 2: GPRS Bereich der XML-Daten

Der Aufbau eines GPRS-Eintrages hat ein komplett eigenständiges Format. Es stellt daher auch innerhalb der Baumstruktur eine eigene Abzweigung dar. Diese ist in Rot markiert und ist als Ausschnitt in Abbildung 2 zu sehen. Gegenüber den anderen Übertragungsarten werden hier keine weiteren Kommunikationsteilnehmer referenziert. GPRS-Einträge besitzen keine iMEI, wodurch diesen Einträgen kein Gerät, sondern nur eine SIM-Karte zugeordnet werden kann.

Die Attribute, die jeder Eintrag besitzt, sind die iMSI, Koordinaten bestehend aus den Längen- und Breitengraden, der Azimut der Funkantenne, Zeitstempel für Start und Ende der Übertragung als auch die Dauer dieser und eine Liste mit zusätzlichen Informationen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass das Format der Koordinaten je nach Eintragsart variiert. Diese können entweder im Dezimalgrad Format (DG-Format) oder im Grad und Dezimalminuten Format (GMM-Format) gespeichert sein.

5.3.2 Inhalt der Daten

Die Analyse betrachtet drei Datensätze. Der erste Datensatz mit dem Namen ”Vorgang 23005182” umfasst 1515 XML-Dateien mit einer Größe von 45,7 GB. Der Datensatz beinhaltet 16.571.748 Einträge. Dies umfasst über 99% der Gesamtmenge an Einträgen und stellt somit den Hauptteil der Daten dar. Übergeben wurden diese Dateien, verteilt auf 7 Unterordner. Diese Aufteilung diente lediglich der besseren Handhabung aufgrund der Datengröße. Der erste Eintrag innerhalb dieses Datensatzes wurde am 03.02.2023 um 10:00:30 Uhr aufgezeichnet und der letzte Eintrag endete am 10.04.2023 um 23:59:58 Uhr. Daraus lässt sich schließen, dass die Aufzeichnung 66 Tage, 12 Stunden, 59 Minuten und 45 Sekunden dauerte. Innerhalb des Datensatzes können 376.173 verschiedene iMSIs gefunden werden.

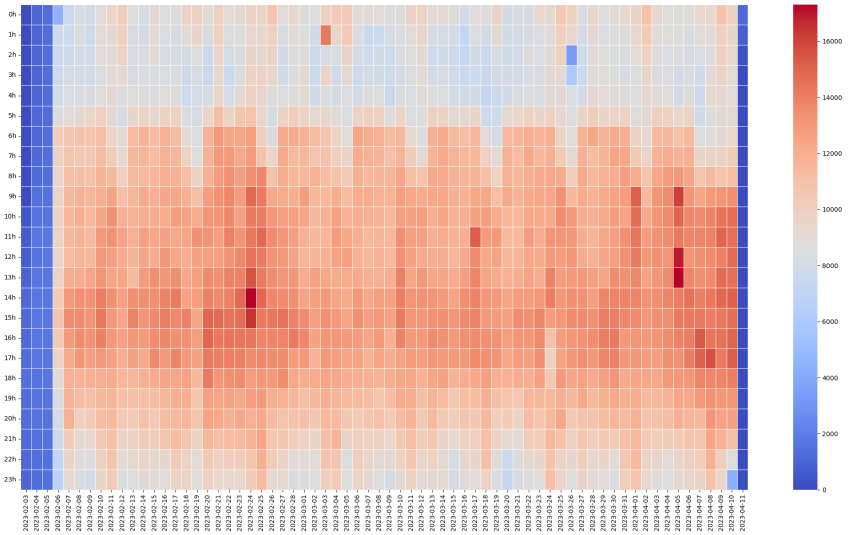

Abbildung 3: Heatmap mit der zeitlichen Verteilung der Einträge des ersten Datensatzes

Die Verteilung der Einträge über den Zeitraum des ersten Datensatzes ist in Abbildung 3 dargestellt. Diese Heatmap wurde in Python unter Verwendung von seaborn und matplotlib.pyplot erstellt. Von links nach rechts sind die einzelnen Tage zu sehen, mit den einzelnen Stunden des Tages von oben nach unten. Rot sind die Bereiche mit besonders hoher Aktivität und blau die mit niedriger Aktivität. Wie hier zu sehen ist, sind im Zeitraum vom 03.02.2023 bis 05.02.2023 nur sehr wenige Einträge aufgezeichnet worden, wodurch davon auszugehen ist, dass nicht alle Funkmastaufzeichnungen zum selben Zeitpunkt gestartet sind. Wie zu erwarten ist, wurden tagsüber mehr Verbindungen aufgezeichnet als nachts. Eine Ausnahme ist am 03.03.2023 um 1 Uhr zu finden. Hier haben besonders viele Übertragungen innerhalb einer Stunde stattgefunden. Der Grund konnte nicht genau festgestellt werden. Eine weitere Auffälligkeit ist am 26.03.2023 um 2 Uhr zu finden. Hier wurden keine neuen Aufzeichnungen erstellt. An diesem Tag fand die Zeitumstellung von Winter- auf Sommerzeit statt. Dadurch lässt sich diese Lücke in den Aufzeichnungen erklären. Die zwei Höchstpunkte am 24.02.2023 und 05.04.2023 sind überschneidend mit Ferienzeiten. Am 24.02. war das Ende der Winterferien in Sachsen und der 05.04. überschneidet sich mit den Osterferien.

Der zweite Datensatz hat den Titel ”2024 Vorgang Angriff auf Bundespolizisten 24028229” und umfasst 3 XML-Dateien mit einer Größe von 12,2 MB. Er umfasst 3.844 Einträge. Der erste Eintrag startete am 26.09.2024 um 02:37:14 Uhr und endete am 28.09.2024 um 01:36:47 Uhr. Es war gegenüber dem ersten Datensatz eine wesentlich kürzere Aufzeichnung von nur 1 Tag, 22 Stunden, 59 Minuten und 33 Sekunden. Zwischen dem letzten Eintrag des ersten Datensatzes und dem ersten Eintrag des zweiten Datensatzes liegen 1 Jahr, 5 Monate, 16 Tage, 2 Stunden, 37 Minuten und 16 Sekunden. Hierbei wurden 2.373 verschiedene iMSIs aufgezeichnet.

Der dritte Datensatz mit dem Namen ”2025 Vorgang BSD Magdeburg Alleecenter” umfasst 53 XML-Dateien mit einer Größe von 11,6 MB. Er umfasst 3.269 Einträge und ist somit der kleinste der drei Datensätze, auch wenn die Daten auf mehr XML-Dateien verteilt sind als die Daten im Datensatz zwei. Die Aufzeichnung des dritten Datensatzes begann am 18.11.2024 um 00:45:32 Uhr

und endete am 20.11.2024 um 00:48:42 Uhr und dauerte somit 2 Tage, 3 Minuten und 10 Sekunden an. Zwischen Datensatz zwei und drei liegen 1 Monat, 20 Tage, 23 Stunden, 8 Minuten und 45 Sekunden. Aufgezeichnet wurden 1.946 verschiedene iMSIs.

Insgesamt liegen 1589 XML-Dateien mit einer Gesamtgröße von 45,8 GB verteilt auf 3 Datensätze vor. Die Untersuchung erstreckt sich über einen Zeitraum von einem Jahr, 9 Monaten, 16 Tagen, 14 Stunden, 48 Minuten und 29 Sekunden. Insgesamt liegen 376.188 verschiedene iMSIs vor. Da dies nicht mit der Summe der iMSIs der einzelnen Datensätze übereinstimmt, ist davon auszugehen, dass manche iMSIs in mehreren Datensätzen vorkommen. 3 gibt einen Überblick über die drei Datensätze.

Tabelle 3: Überblick über die Datensätze

	Vorgang 23005182	Angriff auf Bundespolizisten	BSD Magdeburg Alleecenter
Dateien	1515	3	53
Datengröße	45,7 GB	12,2 MB	11,6 MB
Einträge	16.571.748	3.844	3.269
Start	03.02.2023 10:00:30 Uhr	26.09.2024 02:37:14 Uhr	18.11.2024 00:45:32 Uhr
Ende	10.04.2023 23:59:58 Uhr	28.09.2024 01:36:47 Uhr	20.11.2024 00:48:42 Uhr

Im Durchschnitt hat jede iMSI 33 Einträge. Der Median der Einträge pro iMSI liegt jedoch bei 2 und der Modalwert ist lediglich 1. Die drei iMSIs mit den meisten Einträgen haben dabei 52.384, 48.681 und 39.643 Einträge. Insgesamt haben 176.228 der iMSIs nur einen ihm zugehörigen Eintrag. Somit lässt sich sagen, dass die meisten iMSIs nur wenige Einträge besitzen und nur die wenigsten sehr viele.

Da iMSIs in mehreren Datensätzen vorkommen können, wurden die iMSIs aus den Datensätzen miteinander verglichen. Es stellte sich heraus, dass 71 iMSIs aus dem ersten Datensatz auch im zweiten Datensatz vorkommen. Es gibt dementsprechend Überschneidungen zwischen den zwei Datensätzen. Der dritte Datensatz hat keine Überschneidungen. Gleiches wurde mit den iMEIs durchgeführt. Dabei wurden 15 iMEIs gefunden, die sowohl in Datensatz 1 als auch in Datensatz 2 vorkommen. Der dritte Datensatz ist auch hier alleinstehend.

Folglich wurden die Koordinaten der Funkmasten aus den Datensätzen extrahiert. Diese sind innerhalb der Tabellen 1 bis 3 im Anhang C dargestellt. Zuerst fällt auf, dass die Koordinaten in zwei verschiedenen Formaten vorhanden sind. Außerdem zeigt sich eine sehr ungleichmäßige Verteilung von Einträgen. Datensatz 1 wies hierbei 28 Koordinaten auf. Bei Datensatz 2 liegt dies bei 10 und bei Datensatz 3 mit 17 Koordinaten, wodurch eine Gesamtmenge von 55 Koordinaten vorliegt. Es gibt keine Koordinaten, die in mehreren Datensätzen gleichzeitig vorkommen.

Zur Validierung wurden die Koordinaten mit einer Karte der Bundesnetzagentur abgeglichen. Der Link dazu ist in Anhang D hinterlegt. Es stellte sich heraus, dass innerhalb eines Datensatzes auch zwei bis drei Koordinaten denselben Funkmast adressieren. Dies entspricht in Datensatz 1 die

Koordinaten 12 und 19, 13 und 15 sowie 18 und 20 als Zweierpaare und Nummer 9, 16 und 21 sowie 14, 22 und 26 als Dreierpaar. Bei Datensatz 2 sind dies die Koordinaten 4 und 5 sowie 6 und 9. Datensatz 3 hat die drei Paare 4 und 8, 7 und 11 als auch 9 und 15.

Insgesamt konnten dadurch 43 Funkmasten ausgemacht werden. Alle Koordinaten wurden für die Untersuchung in das DG-Format umgewandelt. Diese Koordinaten wurden auf einer Karte eingezeichnet. Hierfür wurde das Python-Packet ”folium” verwendet. Diese ist in Form einer HTML-Datei als interaktive Karte in Anhang D hinterlegt.

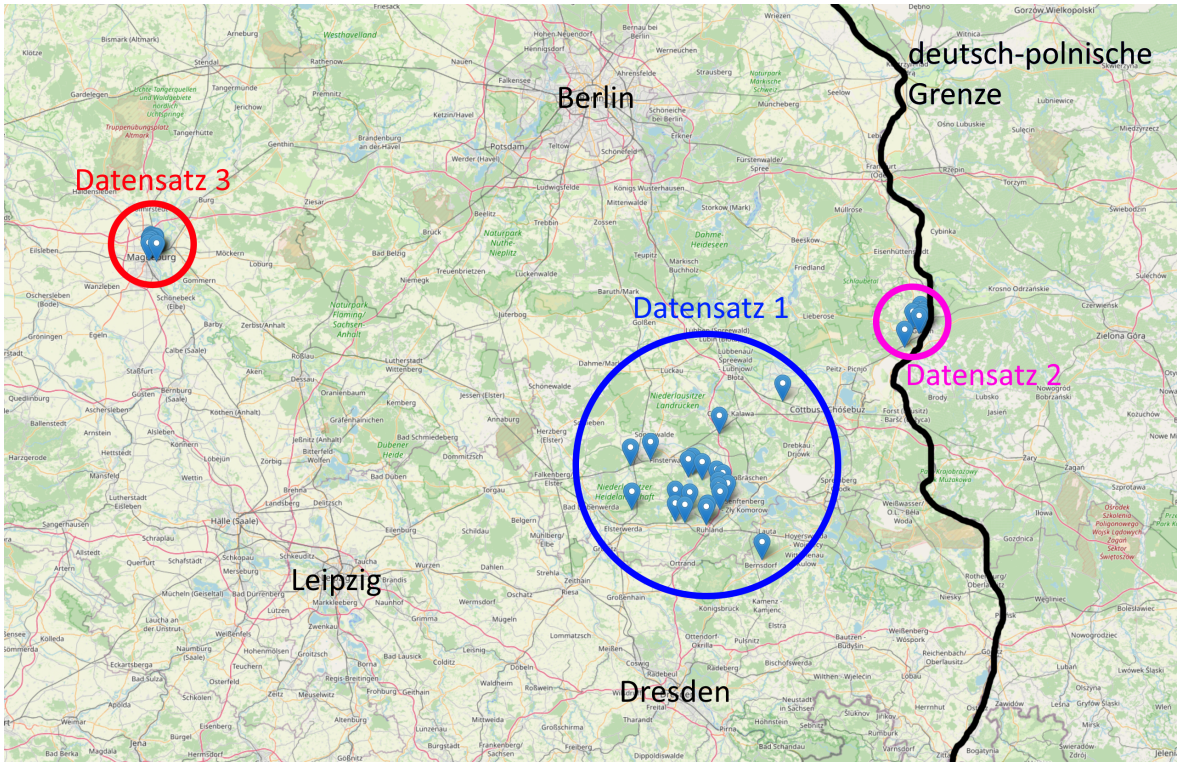

Abbildung 4: Karte mit den Funkmasten

Die Daten umfassen Aufzeichnungen von Funkübertragungen von insgesamt 43 Funkmasten. Die drei Datensätze stellen dabei drei klar abgrenzbare Gebiete dar. Die Funkmasten in Datensatz 1 sind wesentlich weiter gestreut und lassen sich keiner spezifischen Stadt zuordnen. Die Funkmasten sind im Bereich der Autobahn A13 in Brandenburg nahe der Grenze zu Sachsen. Das Gebiet ist in Abbildung 4 blau eingekreist.

Der zweite Datensatz umfasst das Gebiet der Stadt Guben. Es ist eine kleine Stadt in Brandenburg direkt an der Grenze zu Polen, wobei ein Teil der Stadt zu Polen gehört. Das Gebiet liegt nahe am Gebiet des ersten Datensatzes und wurde in Abbildung 4 pink eingekreist.

Der dritte Datensatz stammt aus der Stadt Magdeburg, der Landeshauptstadt des Bundeslandes Sachsen-Anhalt, und ist etwas abgelegen von den anderen Datensätzen. Das Gebiet wurde in Abbildung 4 rot umkreist.

Alle drei Datensätze stammen dementsprechend aus Deutschland. Die Datensätze sind ansonsten örtlich unabhängig. Der Zusammenhang entsteht erst durch die Betrachtung des Falles, zu dem diese Daten gehören. Für weitere Untersuchungen werden somit Informationen zu dem Fall relevant sein.

5.3.3 Fehler in den Daten

Im Verlauf der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass nicht alle Einträge vollständig sind. Einige Einträge umfassen keine iMSI und auch keine weitere Nummer, die zur Identifizierung der Person verwendet werden kann. Dies umfasst 111.707 Einträge im ersten Datensatz, einen im zweiten und zwei im dritten Datensatz. Insgesamt fehlen somit in 111.710 Einträgen sowohl die iMSI als auch weitere Identifikationsnummern und folglich die Zuordnung der Person. Betrachtet man bei diesen Einträgen das Attribut ”otherInformation” genauer, fällt hierbei auf, dass die meisten dieser Einträge im Zusammenhang mit IP multimedia subsystems (IMS) stehen.

IMS ist eine Technik im Bereich der 3G-Funktechnik zur Übertragung von IP-basierten Daten. IMS nutzt dafür spezifische Protokolle, um effektiv mit Internetdiensten zu interagieren [40]. Je nach Implementierungsform können sowohl IPv4 als auch IPv6 Anwendung finden [40]. Es ermöglicht somit die Übertragung von internetbezogenen Daten über das Funknetz. Diese Übertragungsart läuft ohne Übertragung der iMSI ab, wodurch solche Einträge keine iMSI oder andersweitige Identifizierungsmöglichkeiten besitzen.

Ein Eintrag ohne iMSI kann dadurch jedoch nicht begründet werden. Hier gibt es keine Anzeichen für IMS, stattdessen handelt es sich um einen Eintrag von einem Notruf. Gesetzlich müssen nach § 8 Abs. 2 NotrufV seit 2019 für jeden Notruf Identifizierungsnummern für die Rückverfolgung notiert werden [41]. Jedoch könnte es durch die in § 4 Abs. 2 NotrufV festgelegte Priorität [41] der Fall sein, dass durch diese bevorzugte Durchstellung Fehler bei der Protokollierung auf Seiten des Funkbetreibers entstehen.

Im ersten Datensatz lassen sich ebenfalls 371 Einträge ohne Koordinaten feststellen. Allgemein besitzen diese Einträge keine besonderen Informationen, wodurch hier auf einen Fehler in der Protokolisierung geschlossen werden kann.

Während der Validierung der Koordinaten konnte festgestellt werden, dass einige Funkmasten von zwei oder drei Koordinaten markiert werden. Ein Teil davon lässt sich durch die zwei verschiedenen Formate für Koordinaten erklären. Somit kann ein Funkmast Eintragungen in beiden Formaten besitzen. Dies würde jedoch nicht das Auftreten von einer dritten Koordinate erklären. Wie dieser Fehler zustande kommt, ist unbekannt.

Ein wichtiger Punkt, der für weitere Untersuchungen relevant ist, ist der Wechsel von der Winterzeit auf die Sommerzeit innerhalb des ersten Datensatzes. Das gegebene Format für die Zeitstempel ermöglicht zwar die Erkennung der Zeitumstellung, dennoch muss dies für weitere Modellierungen in der Programmierung einfließen.

5.4 Personenprofile

Im folgenden Abschnitt wird eine Liste mit den Personenprofilen erstellt. Dabei wird zuerst dargestellt, welche Informationen in die Personenliste aufgenommen werden, als auch Besonderheiten, auf die geachtet werden muss. Anschließend folgt eine Darlegung der gewonnenen Informationen aus der Personenliste.

5.4.1 Erstellung der Personenprofile

Folgend werden die Personenprofile erstellt. Zur Erstellung wurden alle drei Datensätze verwendet. Diese Personenprofile beinhalten die iMSI, iMEI und die Mobile Station Integrated Services Digital Network Number (mSISDN) aus dem Datensatz. Die mSISDN ist die Telefonnummer mit der Vorwahl. Zusätzlich wird die Nationalität der Person anhand der Vorwahl und die Anzahl der Einträge der Person in den Daten zu den Personenprofilen hinzugefügt.

Es liegen 380.421 iMSIs, 127.159 iMEIs und 277.182 mSISDNs vor. Dabei existieren 135.503 Einträge ohne iMSI, 14.183.580 ohne iMEI und 2.646.479 ohne mSISDN.

Es wurde festgestellt, dass sowohl einer iMSI mehrere iMEIs als auch einer iMEI mehrere iMSIs zugeordnet werden können. Mindestens eine mSISDN ist mehreren iMSIs zugeordnet. Dies ist möglich, beispielsweise durch einen Wechsel des Telefonanbieters. Bei einem Tarifwechsel bieten manche Anbieter die Möglichkeit, die alte Telefonnummer zu behalten. Eine weitere Möglichkeit könnten MultiSIM-Verträge bieten. Hier kann eine Telefonnummer über mehrere SIM-Karten laufen [42]. Ob dies jedoch tatsächlich dazu führen kann, dass eine mSISDN mehreren iMSIs zugeordnet wird, konnte in dieser Arbeit nicht bewiesen werden. Auch die Zuordnung von einer iMSI zu mehreren mSISDNs konnte vorgefunden werden. Eine mögliche Begründung, könnten spezielle Formen von Verträgen sein. Die Firma Satellite bietet beispielsweise eine extra Telefonnummer ohne extra SIM durch die Verwendung von Voice over Internet Protocol (VoIP) an [43]. Auch hier ist unbekannt, wie diese Technik sich auf die Protokollierung der iMSI und mSISDN auswirkt. Eine Untersuchung von Sonderfällen wie VoIP müsste in weiteren Arbeiten genauer untersucht werden.

Da kein genauer Identifizierer gefunden werden konnte, wird zur Erstellung der Personenliste eine Personen-ID generiert. Jede Person besitzt dadurch eine ID mit jeweils variierend vielen iMSIs, iMEIs und mSISDNs. Zusätzlich wurde unter Verwendung der Python-Bibliothek „phonenumbers" anhand der Vorwahl der Telefonnummern das Herkunftsland bestimmt. Falls eine Person mehrere Handynummern besitzt und diese verschiedenen Ländern zugeordnet werden können, werden alle Länder eingetragen.

Die Personenliste wurde folglich erstellt, indem, falls vorhanden, die iMSI, iMEI und mSISDN ausgelesen wurden und, falls keines der drei bereits einer Person zugeordnet wurde, eine neue Person angelegt wurde. Anderenfalls wurden diese Werte der Person hinzugefügt, falls neue Werte gefunden wurden.

5.4.2 Erkenntnisse

Der erste Datensatz ”Vorgang 23005182” umfasst 373.623 Personenprofile. Darunter 192.766 Personen, denen eine deutsche Nummer zugeordnet werden kann, 51.997 mit ausländischer Nummer, 30.147 mit einer Nummer, die keiner Nationalität zugeordnet werden kann, und 98.713 ohne Telefonnummer.

Für Datensatz 2 ”2024 Vorgang Angriff auf Bundespolizisten 24028229” konnten 2.371 Personenprofile erstellt werden. 1.310 Personen besitzen davon eine deutsche Nummer, 59 eine ausländische, 296 mit Nummern, die keiner Nationalität zugeordnet werden können, und 706 ohne Telefonnummer.

Zu Datensatz 3 ”2025 Vorgang BSD Magdeburg Alleecenter” konnten 1.946 Personenprofile erstellt werden. Von diesen konnten 358 Personen eine deutsche Nummer zugeordnet werden, 39 eine ausländische Nummer, 113 Personen mit Nummern, die keiner Nationalität zugeordnet werden können, und 1436 Personen ohne Telefonnummer.

Insgesamt konnten 377.862 Personenprofile erstellt werden. Darunter 194.377 mit deutscher Handynummer, 52.094 Personen mit ausländischer Nummer und 131.390 Personen, denen keine Nationalität zugeordnet werden kann. Einer Person konnte sowohl eine deutsche als auch eine kenianische Nummer zugeordnet werden. Von den 131.390 Personen ohne Nationalität konnte zwar von 30.555 Personen eine Telefonnummer auffindig gemacht werden, jedoch konnte diesen kein Land zugeordnet werden. Somit liegen 100.835 Personen ohne Telefonnummer vor. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurde darauf verzichtet, die gesamte Personenliste dem Anhang hinzuzufügen. 4 zeigt einen sensierten Ausschnitt der Personenliste.

Tabelle 4: Zensierter Ausschnitt aus der Personenliste

PersonID	Einträge	iMSIs	iMEIs	mSISDNs	Nationalität
...	...	...	...	...	...
9	628	620247303xxxxxx	533902018xxxxxx	49176xxxxxxxx	Deutschland
10	1751	620227106xxxxxx	533003503xxxxxx	4917xxxxxxxx	Deutschland
11	315	620227503xxxxxx	539291606xxxxxx	49159xxxxxxxx	Deutschland
12	354	620227405xxxxxx	—	49159xxxxxxxx	Deutschland
13	418	620227202xxxxxx	538433909xxxxxx	4917xxxxxxxx	Deutschland
14	248	620237298xxxxxx	—	49151xxxxxxxx	Deutschland
15	480	620247300xxxxxx	538220909xxxxxx	49176xxxxxxxx	Deutschland
16	369	620227007xxxxxx	539331017xxxxxx	49151xxxxxxxx	Deutschland
17	697	620023001xxxxxx	—	485xxxxxxxx	Polen
18	383	620247300xxxxxx	—	49176xxxxxxxx	Deutschland
19	265	620227109xxxxxx	532229396xxxxxx	49176xxxxxxxx	Deutschland
...	...	...	...	...	...

Es treten mehrere Personen auf, die zwar eine Telefonnummer besitzen, deren Nummer jedoch keinem Land zugeordnet werden kann. Als Beispiel besitzt eine Person, der keine Nation zugeordnet werden konnte, die Telefonnummer +46719xxxxxxxxx. Diese ist indirekt eine schwedische Nummer, die jedoch nur für mobile Breitbanddienste und Telematikdienste verwendet wird [44]. Diese könnte beispielsweise in Ortungsgeräten in LKWs zu finden sein. Da es sich somit nicht um eine klassische schwedische Telefonnummer handelt, wurde sie nicht von dem Programm als schwedisch erkannt. Bei den Telefonnummern, die keiner Nationalität zugeordnet werden konnten, könnte es sich somit um Telefonnummern handeln, die zwar existieren, jedoch aufgrund besonderer Formate und Anwendungsbereiche nicht erkannt wurden. Da es sich hierbei um 30.555 Personen handelt, die eine solche Telefonnummer besitzen, wurden aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht weiter alle Nummern überprüft.

Zwei Personen innerhalb des Datensatzes besitzen jeweils zwei Telefonnummern, wobei nur einer ein Land zugeordnet werden konnte. Die andere besitzt jeweils die Vorwahl +999. Nach der International Telecommunication Union ist diese Vorwahl für zukünftige globale Dienste reserviert und sollte daher nicht für Anrufe verwendbar sein [45]. Dadurch dass dieses Format nicht verwendet wird, könnte es sein, dass sie als Platzhalter für beispielsweise unterdrückte Telefonnummern dient. Da keine Informationen zur Art und Weise der Protokollierung der Aufzeichnungen vorliegen, kann dies jedoch nicht bestätigt werden.

Es konnten mehrere Personen aufgefunden werden, denen viele verschiedene iMSIs und iMEIs zugeordnet wurden. Einer Person konnten beispielsweise 3 iMSIs, 5 iMEIs und zwei Telefonnummern zugeordnet werden. Von dieser Person wurden 756 Aufzeichnungen angefertigt. Weshalb dieser Person so viele verschiedene Nummern zugeordnet werden konnten, ist unbekannt, sollte jedoch im Rahmen der Untersuchung im Auge behalten werden.

5.5 Untersuchung Bewegungsmuster

Im folgenden Abschnitt soll ein Bewegungsmuster für jede Person aus der Personenliste erstellt werden. Zuerst wird aufgezeigt, wie die Bewegungsmuster erstellt wurden, und dann werden erste Erkenntnisse aus den Bewegungsmustern betrachtet. Ein Bewegungsmuster ist eine Sequenz der besuchten Funkmasten in zeitlicher Reihenfolge.

5.5.1 Erstellung Bewegungsmuster

Für die Erstellung der Bewegungsmuster wurde zuerst eine Liste mit allen Funkmasten erstellt. Diese wurden bereits in Unterabschnitt 5.3.2 aufgeführt. Die Funkmasten wurden mit Großbuchstaben des lateinischen Alphabets bezeichnet.

Da festgestellt wurde, dass einige Funkmasten mit mehreren Koordinaten definiert werden, wurde eine Liste mit den Koordinaten erstellt. Diesen wurden daraufhin die Buchstaben zugeordnet. Falls mehrere Koordinaten dem gleichen Funkmast angehören, werden diesen die gleichen Buchstaben zugeordnet. Die Zuordnung geschah dabei händisch. Diese Liste ist in Anhang C hinterlegt.

Für den Fall liegen drei Datensätze vor. Keiner dieser Datensätze überschneidet sich zeitlich und räumlich mit den anderen. Somit wurden für die Erstellung der Bewegungsmuster die Datensätze separat betrachtet.

Der Datensatz ”Vorgang 23005182” umfasst einen sehr großen Zeitraum. Dieser Zeitraum wurde deshalb in Stunden geteilt. Falls eine Person innerhalb einer Stunde keinen Funkmast besucht hat, wurde das Zeichen ”X” eingefügt. Um die Trennung der Stunden erkenntlich zu machen, wurde zwischen jeder Stunde das Symbol ”|” eingefügt. Die Sequenzen bestehen aus 1597 Zeitabschnitten.

Die Datensätze ”2024 Vorgang Angriff auf Bundespolizisten 24028229” und ”2025 Vorgang BSD Magdeburg Alleecenter” umfassen zeitlich einen wesentlich kürzeren Zeitraum als der erste Datensatz. Eine Einteilung in Zeitabschnitten ist nicht vorteilhaft. Somit wurde jeglich eine zeitlich sortierte Sequenz aus den besuchten Funkmasten erstellt. Es wurden keine Zeitlücken hinzugefügt. Falls mehrere Einträge hintereinander von demselben Funkmast auftauchen, ohne dass zwischendrin der Funkmast gewechselt wurde, wird dies als ein Besuch zusammengefasst.

5.5.2 Erkenntnisse

Die erzeugten Sequenzen der zwei kleineren Datensätze sind nicht länger als drei Zeichen. Für weitere Analysen sind diese nicht geeignet. Sie können jeglich verwendet werden, um die Position einer Person innerhalb des Zeitraumes zu bestimmen.

```
Sequenz ohne Eintleilung in Stunden:
B

Ausschnitt der gleichen Sequenz mit Einteilung in Stunden:
...|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|B|
B|B|X|X|X|X|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|
B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|X|X|X|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|B|B|B|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|X|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|X|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|X|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|
B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|X|X|X|X|X|X|B|B|X|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|B|...
```

Abbildung 5: Vergleich einer Sequenz eines langen Zeitraumes mit und ohne Einteilung in Zeitabschnitte

Die Sequenzen des Datensatzes 1 sind in Zeitabschnitte geteilt. Würde diese Einteilung nicht stattfinden, gingen einige Informationen verloren. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Sequenz ohne Zeiteinteilung fehlt die Information, wann eine Person an welchem Ort war und wann sie außerhalb des Aufzeichnungsgebietes war. Eine Information, die besonders bei großen Datensätzen relevant ist.

Die Sequenzen des Datensatzes 1 stellen eine geeignete Grundlage für eine Untersuchung durch Sequenzvergleiche dar. Diese Sequenzen sind somit die Grundlage der Untersuchung des nächsten Kapitels. Datensatz 2 wird jegiglich verwendet für eine besondere Betrachtung der Personen, die sowohl in Datensatz 1 als auch in Datensatz 2 vorkommen. Datensatz 3 wird nicht weiter in der Untersuchung betrachtet, da dieser keine weiteren Fallrelevanten Informationen beinhaltet.

5.6 Analyse der Bewegungsmuster

Im folgenden Abschnitt soll ein paarweiser Vergleich der Bewegungsmuster von den Personen aus dem Datensatz ”Vorgang 23005182” durchgeführt werden. Außerdem folgt eine genauere Betrachtung der Personen, die in mehreren Datensätzen vorkommen.

5.6.1 Durchführung

Für die Analyse der Bewegungsmuster sollen die Sequenzen der Bewegungsmuster paarweise miteinander verglichen werden. Hierfür wurde die Hammingdistanz aller Sequenzen zueinander berechnet. Die Hammingdistanz berechnet die Menge an unterschiedlichen Positionen zweier gleichlanger Zeichenketten. Je geringer die Hammingdistanz, desto mehr stimmen die zwei Sequenzen überein. Da alle Sequenzen durch die Einteilung in Zeitabschnitte gleich lang sind, ist die Berechnung der Hammingdistanz möglich.

Es ist anzumerken, dass das Vergleichen der Sequenzen nicht mit einfachem Brute-Force möglich ist. Es sind dafür zu viele Vergleiche. Es liegen 373.623 Sequenzen vor. Somit müssten 69.796.886.253 Paare verglichen werden. Jede Sequenz ist 1.597 Zeitabschnitte lang. Somit müssten für einen vollständigen Vergleich 111.465.627.346.041 Vergleichsoperationen durchgeführt werden. Dies ist innerhalb eines für diese Arbeit möglichen Zeitraumes nicht möglich durchzuführen, daher muss auf heuristische Methoden zurückgegriffen werden.

Um dennoch Vergleiche durchzuführen, wurde die ANN-Methode angewandt. ANN ist eine abgeleitete Variante des k nearest neighbor (KNN), das nur die Punkte zurückgibt, deren Distanz von der Abfrage nur eine bestimmte Entfernung von dem wahren k-ten Nachbarn beträgt [15]. Erzielt wurde dies durch einen HNSW-Algorithmus. HNSW erstellt eine mehrschichtige Struktur, die aus einem hierarchischen Satz von Diagrammen für verschachtelte Teilmengen der gespeicherten Elemente besteht [18]. Dadurch kann eine effiziente Anwendung von ANN erfolgen. Von den 100 nächsten Nachbarn jeder Sequenz wurde dann die Hammingdistanz berechnet.

Als Distanzmaß für den HNSW-Algorithmus wird zur Bestimmung der Distanz das euklidische Distanzmaß verwendet. Hierfür müssen den einzelnen Buchstaben der Sequenzen Zahlen zugeordnet werden. Diese Zahl entspricht in dieser Untersuchung der Position im Alphabet. Eine Ausnahme wurde für das Lückenzeichen ”X” gemacht. Diesem wurde der Wert 0 zugeordnet. Dadurch hat das Lückensymbol keinen Einfluss auf das Distanzmaß.

Da nur die Positionen relevant sind, die auch einen Eintrag besitzen, wurde zusätzlich die Menge an möglichen übereinstimmenden Positionen berechnet, welche der Menge an nicht leeren Zeitabschnitten der ersten Sequenz entspricht. Zusätzlich wurde eine Übereinstimmungsrate in Prozent aus der Anzahl der übereinstimmenden Positionen durch die Anzahl der möglichen Positionen berechnet.

5.6.2 Erkenntnisse

Durch die Anwendung von HNSW konnte die für die Vergleiche benötigte Zeit auf 10 Minuten reduziert werden. Es konnten für jede Sequenz die 100 ähnlichsten Sequenzen gefunden werden. Einige Sequenzen weisen eine sehr hohe Übereinstimmungsrate auf. Die Tabelle 5 stellt einen Ausschnitt der Ergebnisse dar.

Tabelle 5: Ausschnitt der Ergebnisse des Sequenzvergleiches

Sequenz 1	Sequenz 2	gleiche Positionen	mögliche Positionen	Übereinstimmungsrate
...	...	...	...	...
1	105	1173	1174	99.91482112
1969	3667	0	317	0
4306	38291	4	28	14.28571429
5367	5932	3	31	9.677419355
5720	34123	0	70	0
7550	10488	0	59	0
...	...	...	...	...

Mehrere haben eine Übereinstimmung von 100%. Es ist anzumerken, dass diese Personen nicht garantiert Kontakt haben. Ein Beispiel stellen zwei Personen dar, die eine Übereinstimmung von fast 100% besitzen. Die Sequenz der ersten Person hat in 1174 Zeitabschnitten einen Wert eingetragen. Alle Zeitabschnitte beinhalten jedoch den Funkmast B. Dieser ist weit abgelegen von den anderen Funkmasten und ist ein Funkmast inmitten der Stadt Bernsdorf. Es kann somit sein, dass beide Personen lediglich in dieser Stadt wohnen und sonst keine weiteren Gemeinsamkeiten haben.

Es existieren 71 iMSIs, die sowohl im ersten Datensatz ”Vorgang 23005182” als auch im zweiten Datensatz ”2024 Vorgang Angriff auf Bundespolizisten 24028229” vorkommen. Diese 71 iMSIs konnten 71 verschiedenen Personen zugeordnet werden. Die Mehrheit dieser Personen besitzt nicht mehr als 10 Einträge im ersten Datensatz. Diese Personen können als Durchreisende gesehen werden. Lediglich eine Person fällt aus diesem Muster, mit 42 Einträgen. Diese Einträge umfassen die Funkmasten Q und N.

Der Funkmast Q liegt im Norden der Stadt Schipkau und N liegt bei der Lausitzring-Rennstrecke. Es kann sich somit um eine Person handeln, die als Besucher zu einer Veranstaltung dieser Rennstrecke unterwegs ist.

6 Diskussion

Im folgenden Abschnitt soll die Bedeutung der Erkenntnisse aus dieser Arbeit betrachtet werden. Dabei soll auf dei folgenden drei Punkte genauer eingegangen werden:

1. Welche Erkenntnisse konnten für die Aufklärung des Falles gewonnen werden?
2. Welchen nutzen liefert das Konzept für die Polizei?
3. Welchen Beitrag liefern die Angewanden Methoden zum effizienten Sequenzvergleich?

6.1 Erkenntnisse für den Fall

Zu Beginn der Untersuchung lagen die Daten in einer für den Menschen nicht überschaubaren Form vor. Durch Anwendung des entwickelten Konzeptes konnte dargestellt werden, welche Person zu welchem Zeitpunkt an welchem Ort war.

Für die weitere forensische Untersuchung des Falles fehlten jedoch Fallakten. Ohne die Fallakten konnte kein direkter Bezug zwischen Daten und Fall erstellt werden. Es konnten daher nur in einem begrenzten Ausmaß Tatverdächtige ermittelt werden. Ohne Fallakten und somit ohne relevante Tatzeiten und Tatorte konnte nur eine Betrachtung der Personen erfolgen, die in mehreren Datensätzen vorkommen.

Die drei Datensätze zu der Untersuchung sind jedoch kritisch zu betrachten. Alle drei Datensätze sind zeitlich und örtlich unabhängig und in Kombination mit den fehlenden Tatzeiten und Tatorten kann somit nur nach Personen gesucht werden, die in mehreren dieser Datensätze vorkommen. Es konnte jedoch keine Person gefunden werden, die in allen drei Datensätzen vorkommt, da der dritte Datensatz ”2025 Vorgang BSD Magdeburg Alleecenter” keine Überschneidungen mit den anderen beiden Datensätzen besitzt. Zusätzlich umfasst dieser Datensatz einen sehr kurzen Zeitraum, wodurch nur geprüft werden kann, ob eine Person vor Ort war oder nicht. Somit wurde dieser Datensatz für die Untersuchung in dieser Arbeit irrelevant.

Die anderen beiden Datensätze wiesen 71 Personen auf, die in beiden vorkommen. Diese waren jedoch überwiegend Personen, die sehr wenig Einträge insgesamt besitzen und daher eher auf Durchreisende hinweisen.

Es konnte dennoch erfolgreich eine Personenliste erstellt werden mit jeweiligen Bewegungsmustern. Diese bieten eine gute Grundlage für weitere Untersuchungen zu diesem Fall.

6.2 Erkenntnisse für die Polizei

Diese Arbeit liefert ein grundlegendes Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten. Die praktische Anwendung dieses Konzeptes zeigte, dass relevante Informationen für einen Fall durch das Konzept übersichtlich dargestellt werden können.

Da zu dem Zeitpunkt der Arbeit kein weiteres öffentlich zugängliches Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten gab, liefert dies eine Grundlage für die Entwicklung eines offiziellen Konzeptes für die Polizei.

Es kann der Fall vorliegen, dass die Polizei ein Konzept bereits besitzt, dieses jedoch nicht öffentlich zugänglich macht. In diesem Fall kann das in dieser Arbeit entworfene Konzept zusätzliche Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des möglicherweise bereits existierenden Konzeptes liefern. Außerdem kann durch die öffentliche Zugänglichkeit dieser Arbeit ein erster Einblick für die Allgemeinheit in den Umgang mit Funkmastdaten geliefert werden.

Zusätzlich liefert diese Arbeit eine Toolbox mit allen für die Durchführung des Konzeptes verwendeten Funktionen. Dies liefert eine Grundlage zur Entwicklung weiterer Programme für die Untersuchung von Funkmastdaten. Es existieren zwar bereits Programme, jedoch sind diese im Gegensatz zu dieser Toolbox nicht Open Source. Somit konnte ein erstes Open-Source-Projekt für diese Form der Untersuchung erstellt werden.

Die Bearbeitung des Falles zeigt, dass durch diese Funkmastdaten eine Übersicht erstellt werden kann, welche Person zu welchem Zeitpunkt an welchem Ort war. Dies kann unterstützend für weitere Ermittlungsvorgänge eingesetzt werden.

6.3 Erkenntnisse für Sequenzvergleiche

Ein direkter paarweiser Vergleich aller Sequenzen ist durch einfaches Vergleichen der Zeichen zeitlich nicht möglich, auch wenn dies die genauesten Ergebnisse liefern würde.

Für den Vergleich von den Bewegungsmustern wurden deshalb die N-ähnlichsten durch einen HNSW-Algorithmus mittels euklidischen Distanzmaß bestimmt. Dies ermöglichte einen zeiteffizienten Vergleich, der nur wenige Minuten benötigte. Jedoch können heuristische Methoden nicht garantieren, dass das Ergebnis die tatsächlich N-ähnlichsten Frequenzen beinhaltet. Ein weiterer Punkt, der zu beachten ist, ist, dass das euklidische Distanzmaß eine mathematische Darstellung der Frequenzen benötigt.

Außerdem ist es nicht möglich, da ein direkter paarweiser Vergleich aller Sequenzen nicht möglich ist, darzustellen, wie gut die heuristische Methode ist. Hierfür müsste festgestellt werden, wie ähnlich das Ergebnis der heuristischen Methode dem direkten paarweisen Vergleich ist.

Zusätzlich wurde für jede Sequenz die Hamming-Distanz berechnet. Dies ist nur möglich, wenn alle Sequenzen gleich lang sind. Dies ist immer gegeben, wenn die Sequenzen in Form von Zeitabschnitten dargestellt sind. Dies ist zielführend, wenn die Zeit, wann eine Person an einem bestimmten Ort war, von Bedeutung ist.

Durch diese Methode können Sequenzen, die zeitlich verschoben sind, nicht als ähnlich erkannt werden. Wenn somit zwar der Tatablauf bekannt ist, die genauen Zeiten jedoch variieren, können diese Tatsequenzen nicht in den Bewegungsmustern gefunden werden. Es können somit keine lokalen Alignments gefunden werden. Für weitere Arbeiten sollte somit ein Weg für das Finden lokaler Alignments dargelegt werden.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten erstellt, welches an einem praktischen Beispiel getestet wurde. Das Beispiel beinhaltete drei Datensätze zu einem realen Polizeifall.

Das Konzept umfasst 5 Schritte. Zuerst werden die Werkzeuge ausgewählt. Hierfür wurde eine eigene Toolbox in Python programmiert.

Darauf folgt die Untersuchung der allgemeinen Datenstruktur und deren Aufbau. Im nächsten Schritt wurden die Personen aus den Daten extrahiert. Nach der Erstellung der Personenliste folgt eine Erstellung der Bewegungsmuster als Sequenz aus den besuchten Funkmasten. Schlussendlich folgte der Sequenzvergleich, wobei diese Sequenzen auf ihre Ähnlichkeit geprüft wurden.

Für die Sequenzanalyse mussten heuristische Methoden angewandt werden, da sonst die Analyse nicht in einem zeitlich möglichen Rahmen durchgeführt werden konnte. Dies konnte durch einen HNSW-Algorithmus gelöst werden.

Die Durchführung des Konzeptes an dem praktischen Beispiel konnte mehrere interessante Daten für weitere Untersuchungen liefern. Es entstand eine Liste aller Personen und zusätzlich die Informationen, zu welcher Zeit diese Person an welchem Ort war. Eine vollständige Untersuchung konnte jedoch nicht durchgeführt werden, da neben den Datensätzen keine Fallakten oder Ähnliches vorlagen.

8 Ausblick

Diese Arbeit liefert die Grundlagen für ein einheitliches Konzept für die Untersuchung von Funkmastdaten. Das Konzept konnte bereits an einem Fall getestet werden. Weitere Anwendungen an realen Fällen werden notwendig sein, um die Qualität des Konzeptes zu überprüfen. Insgesamt muss das Konzept weiter getestet und auch weiterentwickelt werden. Allgemein soll dies dazu beitragen, dass die Polizei ein allgemeines Konzept für die Untersuchung von Funkmasdaten anwendet, welches zusätzlich öffentlich einsehbar ist.

Die Toolbox liefert eine Grundlage für die Entwicklung von Open-Source-Software. Zukünftig ist wichtig, weitere Software für die Untersuchung von Funkmastdaten zu entwickeln, die auch ohne zusätzliche Kosten angewandt werden kann. Dies würde die Kosten für die Polizei reduzieren.

Die den Vergleich der Bewegungsmuster betreffenden Algorithmen für Sequenzvergleiche konnten bereits angewandt werden. Hier wird weitere Forschung benötigt, um die Ergebnisse und Funktionalität der Vergleiche zu untersuchen und zu verbessern. Aus Mangel an Informationen zu dem Fall konnte der Nutzen der Sequenzvergleiche nicht ausreichend getestet werden. Weitere Tests an weiteren Polizeifällen sind hierfür notwendig.

Auch könnte in zukünftigen Arbeiten eine genauere Modellierung der Bewegungen beispielsweise mit Betrachtung der Reichweite und dem Öffnungswinkel der Funkmasten erfolgen.

Anhang A: Daten

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurden die Funkmastdaten aus dem Polizeifall nicht der Arbeit angehängt. Die Daten liegen bei dem Betreuer dieser Arbeit vor.

Anhang B: Vollständige XML-Datenstruktur

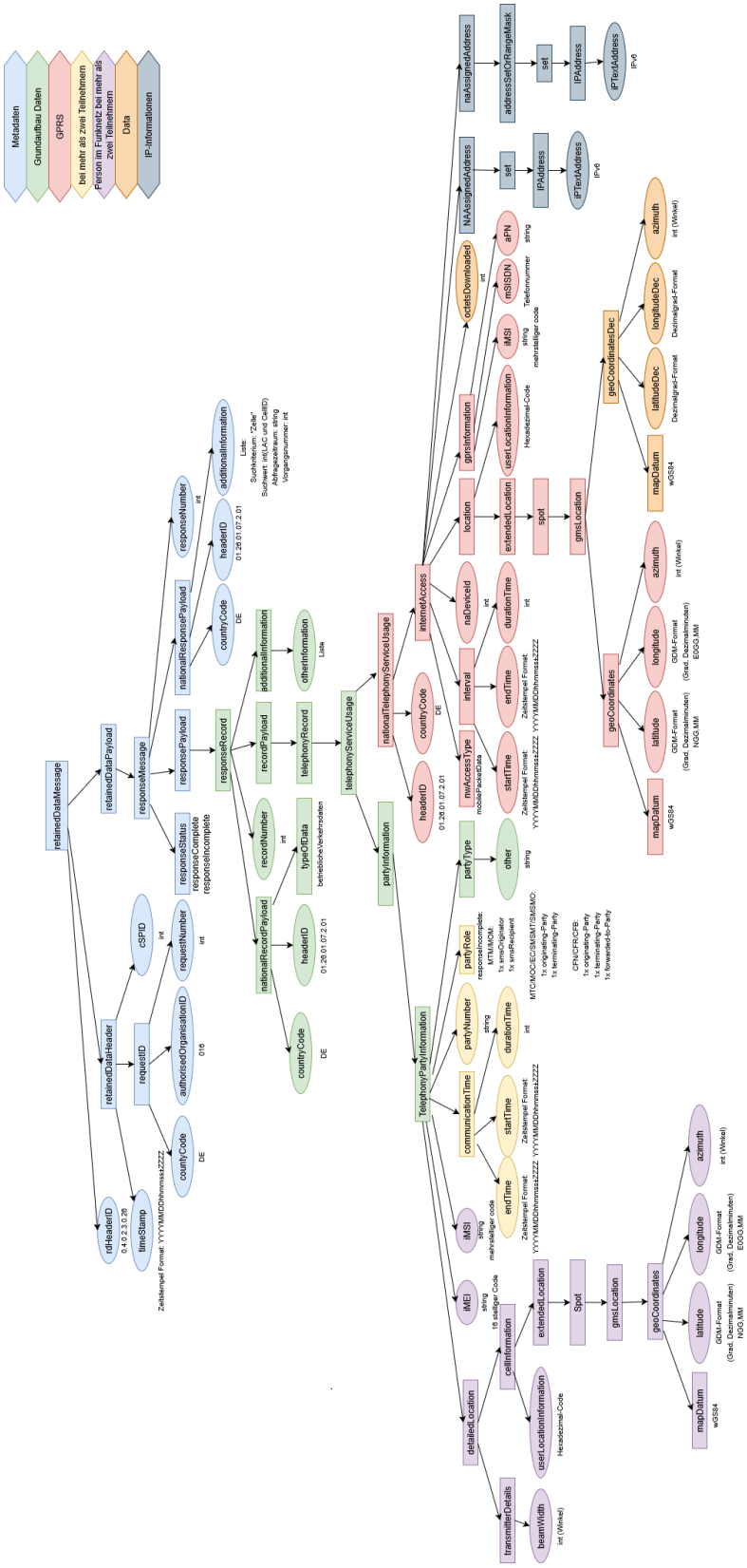

Abbildung 6: Baumdiagramm mit der XML-Struktur des Datensatzes

Anhang C: Tabellen mit den Koordinaten aus den Datensätzen

Tabelle 6: Koordinaten aus Datensatz 1

Nummer	Zeichen	Latitude	Longitude	Einträge
1	A	N51.4689	E013.8498	505850
2	B	N51.3818	E014.0747	225577
3	C	N51.6171	E013.5485	139644
4	D	N51.4749	E013.7655	185120
5	E	N51.4788	E013.7282	82702
6	F	N51.5117	E013.7272	116193
7	G	N51.6945	E013.9028	43535
8	H	N51.5365	E013.9017	72948
9	I	N51.5046	E013.7854	87160
10	J	N51.5073	E013.5542	42042
11	K	N51.7749	E014.1553	19019
12	L	N51.58	E013.8358	45797
13	M	N51.5538	E013.9163	63277
14	N	N51.5272	E013.9358	2280
15	M	N513314.14	E0135458.4	522776
16	I	N513016.9	E0134707.9	321221
17	O	N513539.5	E0134748	208409
18	P	N512839.8	E0135124.4	14558
19	L	N513448	E0135009	3587944
20	P	N512839	E0135125	1755898
21	I	N513017	E0134708	1764284
22	N	N513137	E0135610	781982
23	Q	N513121	E0135359	641989
24	R	N513343	E0135328	183970
25	S	N513512	E0134650	11613
26	N	N513138	E0135609	42245
27	T	N513026.5	E0135420.6	700602
28	U	N513746.02	E0133743.91	87442

Tabelle 7: Koordinaten aus Datensatz 2

Nummer	Zeichen	Latitude	Longitude	Einträge
1	A	N515706.2	E0144238	796
2	B	N515427	E0143826.8	343
3	C	N515802.84	E0144218.32	86
4	D	N515715.5	E0144129.8	212
5	D	N515715	E0144130	782
6	E	N515713	E0144307	435
7	F	N515641	E0144232	972
8	G	N515702	E0144027	26
9	E	N51.9538	E014.7187	25
10	H	N51.9406	E014.6997	9

Tabelle 8: Koordinaten aus Datensatz 3

Nummer	Zeichen	Latitude	Longitude	Einträge
1	A	N520815.13	E0113825.21	461
2	B	N520745.43	E0113753.77	349
3	C	N520703.12	E0113935.58	66
4	D	N520731.39	E0113753.93	710
5	E	N520803.92	E0113922.61	29
6	F	N520751.17	E0113819.83	693
7	G	N520750.63	E0113755.89	151
8	D	N520731	E0113754	51
9	H	N520743	E0113816	295
10	I	N520758	E0113800	24
11	G	N520750	E0113756	142
12	J	N52.1201	E011.6278	6
13	K	N52.1317	E011.6326	40
14	L	N52.1389	E011.6385	11
15	H	N52.1287	E011.6373	83
16	M	N52.1347	E011.6451	6
17	N	N52.133	E011.655	13

Anhang D: Ressourcen

Bezeichnung	Link
Toolbox	`https://github.com/SudoNico/Toolbox-Funkmastdatenanalyse`
Karte mit Funkmasten	`https://www.dropbox.com/scl/fi/12dbeg96fa3dk8kyknohk/Map.html?rlkey=lb3e9o5d3me864polm59ccvuo&st=mc67fzcj&dl=0`
Karte Bundesnetzagentur	`https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/TK/Funktechnik/EMF/start.html`

Tabelle 9: Übersicht relevanter Links zu verwendeten Ressourcen

Anhang E: Toolbox

Funktion	Beschreibung	Bibliotheken/Module
new-project	Erstellt einen Ordner mit allen relevanten Unterordnern für die Untersuchung	os
import-xml	Liest alle XML-Dateien einer TKÜ ein und speichert diese als CSV-Datei im Projekt	os, csv
remove-double	Entfernt Einträge, die mehrfach in den CSV-Dateien vorkommen	os, csv
remove-empty	Entfernt Einträge, die für ein bestimmtes Attribut keinen Wert besitzen	os, csv
mean	Berechnet Durchschnitt, Median und Modalwert für ein Attribut	os, csv, statistics
min-max	Gibt die *n* größten oder kleinsten Werte eines Attributs wieder	os, csv, heapq
counts	Listet alle Werte eines Attributs auf und gibt an, wie oft diese vorkommen	os, csv, collections (Counter)
time-range	Gibt an, wann der erste Eintrag begonnen hat, der letzte geendet hat und die Zeit dazwischen	os, csv, datetime
heatmap	Erstellt eine Heatmap mit der Verteilung der Einträge über Tage und Stunden	os, csv, datetime, timedelta, seaborn, matplotlib.pyplot
add-coordinates	Erstellt eine Liste mit allen Koordinaten aus dem Datensatz	os, csv, collections (Counter)
create-map	Erstellt eine interaktive HTML-Karte mit allen Koordinaten aus der Koordinatenliste	os, csv, folium
check-cross-project	Überprüft, ob Werte eines Attributs in mehreren Projekten vorkommen	os, csv
personlist	Erstellt eine Liste aller Personen im Datensatz	os, csv, math, phonenumbers (geocoder), phonenumbers.phonenumberutil (NumberParseException)
count-nations	Listet alle Nationalitäten der Personen aus der Personenliste auf und wie oft diese vorkommen	os, csv, collections (Counter)
movement-sequence	Erstellt für jede Person im Datensatz ein Bewegungsmuster	os, csv, math, phonenumbers (geocoder), phonenumbers.phonenumberutil (NumberParseException), datetime, timedelta
compair-sequences	Berechnet die K Approximate Nearest Neighbors (ANN) für jede Sequenz und berechnet für diese den Grad der Übereinstimmung	os, csv, numpy, hnswlib
search	Sucht einen Wert in einer Datei	os, csv

Tabelle 10: Übersicht der Funktionen der Toolbox und der verwendeten Bibliotheken und Module

Literaturverzeichnis

[1] S. Kemp, *Digital 2022: Global Overview Report*, 26. Jan. 2022. Adresse: https://datareportal.com/reports/digital-2022-global-overview-report (besucht am 22. 08. 2025).

[2] M. Haas, *Smartphone-Markt: Konjunktur und Trends*, 20. Feb. 2025. Adresse: https://bitkom-research.de/node/1132 (besucht am 22. 08. 2025).

[3] B. für Justiz, *Veröffentlichung der Statistiken zu Maßnahmen der Telekommunikationsüberwachung und zur Erhebung von Verkehrsdaten*, 22. Aug. 2023. Adresse: https://www.bundesjustizamt.de/DE/ServiceGSB/Presse/Pressemitteilungen/2023/20230822.html (besucht am 22. 08. 2025).

[4] S. Zdun, „Telekommunikationsüberwachung“, in *Wörterbuch zur Inneren Sicherheit*, H.-J. Lange und M. Gasch, Hrsg. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006, S. 325–329, ISBN: 978-3-531-90596-9. DOI: 10.1007/978-3-531-90596-9_79. Adresse: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-531-90596-9_79#citeas (besucht am 10. 09. 2025).

[5] D. Wehrle, D. Suchodoletz und K. Meier, „GSM – Zwischen neuer Freiheit und Massenüberwachung, Gefährdung der fragilen Sicherheit in Mobilfunknetzen durch Ortung und IMSI-Catcher“, *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, Jg. 12, S. 227–238, 21. Dez. 2010. Adresse: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/piko.2010.039/html (besucht am 15. 07. 2025).

[6] V. Brückner, „Funktechnik (Mobilfunk, Richtfunk, Sattelitenfunk)“, in *Globale Kommunikationsnetze: über Digitalisierung, elektromagnetische Wellen, Glasfasern und Internet*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 137–170, ISBN: 978-3-658-37631-4. DOI: 10.1007/978-3-658-37631-4_8. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-658-37631-4_8.

[7] S. Park, A. Shaik, R. Borgaonkar, A. Martin und J.-P. Seifert, „White-Stingray: Evaluating IMSI Catchers Detection Applications“, in *11th USENIX Workshop on Offensive Technologies (WOOT 17)*, Vancouver, BC: USENIX Association, 2017. Adresse: https://www.usenix.org/conference/woot17/workshop-program/presentation/park (besucht am 08. 08. 2025).

[8] Bundesregierung, *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Andrej Hunko, Dr. Sahra Wagenknecht, Ali Al-Dailami, weiterer Abgeordneter und der Gruppe BSW – Drucksache 20/10538 –*, Einsätze von sogenannten stillen SMS, WLAN-Catchern, IMSI-Catchern, Funkzellenabfragen (2023), 26. März 2024. Adresse: https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-996616 (besucht am 19. 08. 2025).

[9] B. Senat, *Welche Software nutzt die Bremer Polizei zur Kriminalitätsbekämpfung?*, Antwort des Senats auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU vom 22. Juni 2021. Adresse: https://www.transparenz.bremen.de/metainformationen/top-10-welche-software-nutzt-die-bremer-polizei-zur-kriminalitaetsbekaempfung-170079 (besucht am 18. 07. 2025).

[10] Esri, „ArcGIS Pro“, Funkzellendaten in Feature-Class (Crime Analysis and Safety), Adresse: https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/crime-analysis/cell-site-records-to-feature-class.htm (besucht am 20. 07. 2025).

[11] P. T. Inc., „Gotham“, 2025. Adresse: https://www.palantir.com/platforms/gotham/ (besucht am 19. 07. 2025).

[12] W. Wei, X. Li, K. Liu und S. Tan, „A Brief Analysis of Palantir Gotham: A Collaborative and Interactive Big Data Visualization Analysis Software Based on Dynamic Ontology“, in *2024 10th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA)*, 2024, S. 769–776. DOI: 10.1109/BigDIA63733.2024.10808897.

[13] P. Kift und Y. W. Wee, „Data Protection in Palantir Foundry“, *Medium*, 2020. Adresse: https://blog.palantir.com/data-protection-in-palantir-foundry-5ab9f346195 (besucht am 19. 07. 2025).

[14] „Generalized Hamming Distance“, *Information Retrival*, Nr. 5, S. 353–375, 2002. Adresse: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020499411651#citeas (besucht am 04. 09. 2025).

[15] T. Liu, A. Moore, K. Yang und A. Gray, „An Investigation of Practical Approximate Nearest Neighbor Algorithms“, in *Advances in Neural Information Processing Systems*, L. Saul, Y. Weiss und L. Bottou, Hrsg., Bd. 17, MIT Press, 2004. Adresse: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2004/file/1102a326d5f7c9e04fc3c89d0ede88c9-Paper.pdf (besucht am 01. 09. 2025).

[16] B. Kulis und K. Grauman, „Kernelized Locality-Sensitive Hashing“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 34, Nr. 6, S. 1092–1104, 2012. DOI: 10.1109/TPAMI.2011.219. Adresse: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6072216 (besucht am 13. 09. 2025).

[17] H. Shah, „A Comparative Study of HNSW Implementations for Scalable Approximate Nearest Neighbor Search“, Juli 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.175321947.71782908/v1. Adresse: https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.175321947.71782908 (besucht am 04. 09. 2025).

[18] Y. A. Malkov und D. A. Yashunin, „Efficient and Robust Approximate Nearest Neighbor Search Using Hierarchical Navigable Small World Graphs“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 42, Nr. 4, S. 824–836, 2020. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2889473. Adresse: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8594636 (besucht am 01. 09. 2025).

[19] X. Huang, „On global sequence alignment“, *Bioinformatics*, Jg. 10, Nr. 3, S. 227–235, Juni 1994, ISSN: 1367-4803. DOI: 10.1093/bioinformatics/10.3.227. Adresse: https://academic.oup.com/bioinformatics/article/10/3/227/216793 (besucht am 05. 09. 2025).

[20] V. O. Polyanovsky, M. A. Roytberg und V. G. Tumanyan, „Comparative analysis of the quality of a global algorithm and a local algorithm for alignment of two sequences“, *Algorithms for Molecular Biology*, Jg. 6, Nr. 25, Nov. 2011. Adresse: https://link.springer.com/article/10.1186/1748-7188-6-25 (besucht am 05. 09. 2025).

[21] L. Ligowski und W. Rudnicki, „An efficient implementation of Smith Waterman algorithm on GPU using CUDA, for massively parallel scanning of sequence databases“, in *2009 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, 2009, S. 1–8. DOI: 10.1109/IPDPS.2009.5160931. Adresse: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5160931 (besucht am 05. 09. 2025).

[22] K. C. Samal, J. P. Sahoo, L. Behera und T. Dash, „Understanding the BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) program and a step-by-step guide for its use in life science research“, *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, Jg. 36, Nr. 1, S. 55–61, 2021. Adresse: https://arccjournals.com/journal/bhartiya-krishi-anusandhan-patrika/BKAP283 (besucht am 13. 09. 2025).

[23] E. P. und Europäischer Rat, *Richtlinie (EU) 2016/680 des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016*, Richtlinie (EU) 2016/680 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten durch die zuständigen Behörden zum Zwecke der Verhütung, Ermittlung, Aufdeckung oder Verfolgung von Straftaten oder der Strafvollstreckung sowie zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung des Rahmenbeschlusses 2008/977/JI des Rates. Adresse: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32016L0680 (besucht am 27. 07. 2025).

[24] B. für Justiz, *§ 100a - Strafprozeßordnung (StPO)*, neugefasst durch B. v. 07.04.1987 BGBl. I S. 1074, 1319; zuletzt geändert durch Artikel 2 Abs. 1 G. v. 07.11.2024 BGBl. 2024 I Nr. 351 Geltung ab 01.01.1975. Adresse: https://www.buzer.de/100a_StPO.htm (besucht am 17. 07. 2025).

[25] B. für Justiz, *Verordnung über die technische und organisatorische Umsetzung von Maßnahmen zur Überwachung der Telekommunikation (Telekommunikations-Überwachungsverordnung)*, Telekommunikations-Überwachungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 11. Juli 2017 (BGBl. I S. 2316), die zuletzt durch Artikel 33 des Gesetzes vom 6. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 149) geändert worden ist. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/tk_v_2005/BJNR313600005.html#BJNR313600005BJNG000101123l (besucht am 17. 07. 2025).

[26] „Visselhöveder Blutrache-Prozess: Funkzellendaten liefern Hinweise“, *kreiszeitung*, Adresse: https://www.kreiszeitung.de/lokales/rotenburg/visselhoevede-ort52324/visselhoeveder-blutrache-prozess-neue-erkenntnisse-9510956.html (besucht am 19. 07. 2025).

[27] „BND übermittelt afghanische Funkzellendaten an NSA“, *der Spiegel*, Adresse: https://www.spiegel.de/politik/ausland/bnd-uebermittelt-afghanische-funkzellendaten-an-nsa-a-915934.html (besucht am 19. 07. 2025).

[28] „BND gibt Handynummern an andere Geheimdienste weiter“, *der Spiegel*, Adresse: https://www.spiegel.de/politik/ausland/spaehaffaere-bnd-soll-handynummern-an-geheimdienste-weitergegeben-haben-a-915819.html (besucht am 19. 07. 2025).

[29] M. Zumbrunn, „Imsi-Catcher: Umstrittene Überwachungsmethode sorgt für Wirbel“, *SRF News*, 16. Dez. 2013. Adresse: https://www.srf.ch/news/schweiz/schweiz-imsi-catcher-umstrittene-ueberwachungsmethode-sorgt-fuer-wirbel (besucht am 04. 08. 2025).

[30] Palletsprojects, *Click*. Adresse: https://click.palletsprojects.com/en/stable/#about-project (besucht am 18. 08. 2025).

[31] P. S. Foundation, *os — Miscellaneous operating system interfaces*, 18. Aug. 2025. Adresse: https://docs.python.org/3/library/os.html (besucht am 18. 08. 2025).

[32] P. S. Foundation, *collections — Container datatypes*, 18. Aug. 2025. Adresse: https://docs.python.org/3/library/collections.html#collections.Counter (besucht am 18. 08. 2025).

[33] P. S. Foundation, *heapq — Heap queue algorithm*, 18. Aug. 2025. Adresse: https://docs.python.org/3/library/heapq.html (besucht am 18. 08. 2025).

[34] M. L. Waskom, „seaborn: statistical data visualization“, *Journal of Open Source Software*, Jg. 6, Nr. 60, S. 3021, 2021. DOI: 10.21105/joss.03021. Adresse: https://doi.org/10.21105/joss.03021 (besucht am 18. 08. 2025).

[35] Folium, *Welcome to the Folium Resource Hub*. Adresse: https://docs.python.org/3/library/datetime.html (besucht am 18. 08. 2025).

[36] P. S. Foundation, *phonenumbers 9.0.12*, 15. Aug. 2025. Adresse: https://pypi.org/project/phonenumbers/ (besucht am 18. 08. 2025).

[37] J. Unpingco, „Numpy“, in *Python Programming for Data Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 103–126, ISBN: 978-3-030-68952-0. DOI: 10.1007/978-3-030-68952-0_4. Adresse: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68952-0_4 (besucht am 01. 09. 2025).

[38] G. Rothfuss und C. Ried, Hrsg., *Content Management mit XML, Grundlagen und Anwendungen* (Xpert.press), 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 13. März 2013, S. 130–133, Springer Book Archive, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, ISBN: 978-3-642-98075-6. Adresse: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-98075-6 (besucht am 15. 07. 2025).

[39] R. Kalden, I. Meirick und M. Meyer, „Wireless Internet access based on GPRS“, *IEEE Personal Communications*, Jg. 7, Nr. 2, S. 8–18, 2000. Adresse: https://ieeexplore.ieee.org/document/839328 (besucht am 15. 07. 2025).

[40] P. Agrawal, J.-H. Yeh, J.-C. Chen und T. Zhang, „IP multimedia subsystems in 3GPP and 3GPP2: overview and scalability issues“, *IEEE Communications Magazine*, Jg. 46, Nr. 1, S. 138–145, 2008. Adresse: https://ieeexplore.ieee.org/document/4427242 (besucht am 15. 07. 2025).

[41] B. für Justiz, *Verordnung über Notrufverbindungen*, Verordnung über Notrufverbindungen vom 6. März 2009 (BGBl. I S. 481), die zuletzt durch Artikel 34 des Gesetzes vom 6. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 149) geändert worden ist. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/notrufv/BJNR048100009.html (besucht am 17. 07. 2025).

[42] Vodafone, „MultiSIM: ein Vertrag, mehrere SIM-Karten“, Du möchtest Deinen Handytarif auf mehreren Geräten nutzen? Wir zeigen Dir, wie's geht., Adresse: https://www.vodafone.de/privat/handys-tablets-tarife/zusatzkarten/multisim.html (besucht am 08. 08. 2025).

[43] Satellite, „Virtuelle Handynummer: Jetzt per App“, 9. Sep. 2022. Adresse: https://www.satellite.me/blog/app-statt-sim-karte-virtuelle-handynummer-von-satellite (besucht am 08. 08. 2025).

[44] S. Post und T. Authority, *The Swedish numbering plan for telephony accordning to ITU-T Recommendation E.164*, 8. Jan. 2024. Adresse: https://www.pts.se/en/internet-and-telephony/numbering-and-addressing/ (besucht am 13. 08. 2025).

[45] telecommunication standardization sector of International Telecommunication Union, *LIST OF RECOMMENDATION ITU-T E.164 ASSIGNED COUNTRY CODES*, 15. Dez. 2016. Adresse: https://www.itu.int/pub/T-SP-E.164D-2016 (besucht am 13. 08. 2025).

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich – Nico Schmalz – an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder anderweitig veröffentlicht.

Mittweida, 02. Oktober 2025	
Ort, Datum	Nico Schmalz